



Automatisiertes Prüfsystem für Rotorblätter von Windkraftanlagen



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0327556 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Erstellt am: 22.09.2008
Erstellt von: Dipl. Ing. Jürgen Wagner (Projektleiter)
Dipl. Ing. Georgios Pechlivanoglou

Gefördert durch: Bundesministerium für Umweltschutz (BMU)
Förderkennzeichen: 0327556
Projektlaufzeit: 01.10.2005 – 31.03.2008
Projektpartner: Wilhelm-Klauditz-Institut der Fraunhofer Gesellschaft



Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung.....	3
2. Stand der Technik	5
3. Entwicklung der Roboterplattform.....	11
3.1 Entwicklung der Roboterplattform Version 1.0	11
3.2 Entwicklung der Roboterplattform Version 1.1	16
3.3 Test der Roboterplattform Version 1.1	22
3.4 Entwicklung der Roboterplattform Version 1.2	25
3.5. Steuerung – Hardware und Software (AP 8)	34
3.6 Testplattform.....	38
3.7 Test der Roboterplattform Version 1.2	39
3.8 Entwicklung der Roboterplattform Version 1.3	42
3.9 Test des Roboterplattform Version 1.3 am Fraunhofer Institut	45
3.10 Entwicklung der Roboterplattform Version 1.4	47
3.11 Test der Roboterplattform Version 1.4	56
3.12 Entwicklung der Roboterplattform Version 2	58
3.13 Test der Roboterplattform Version 2	64
3.14 Test der Roboterplattform Version 2 an der Windkraftanlage	67
3.15 Schlußfolgerung - Ausblick	74
4. Entwicklung der Basisstation.....	75
4.1 Spezifikation der Basisstation	75
4.2 Konstruktive Umsetzung	76
5. Entwicklung der Prüftechnik	80
5.1 Rein optische Untersuchungstechnik	80
5.2 Thermographische Prüftechnik	86
6. Fortschritte auf dem Gebiet an anderen Stellen	89
6.1 Force Technology	89
6.2. RIWEA.....	90
7. Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	92
7.1 Dewek 2008.....	92
7.2 Präsentation auf der LIGNA 2007	92
7.3 Präsentation auf der Husumwind 2008	95



1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Projektes bestand in der Konstruktion, der Fertigung und der Optimierung einer autonomen Plattform (Robotersystem) zur zerstörungsfreien Prüfung und Inspektion der Rotorblätter moderner Windkraftanlagen. Hierzu waren viele Einzelaufgaben zu lösen. Die Aufgabenstellung ist komplex, daher bedurfte es eines ausgedehnten Entwicklungsprozesses, der mehrere Entwicklungsschleifen beinhaltete. Die wichtigsten technischen Herausforderungen waren:

- 1) Das Robotersystem muss in der Lage sein autonom über einen Mindestzeitraum, der der benötigten Inspektionsdauer eines Rotorblattes entspricht, zu arbeiten.
- 2) Das Robotersystem muss ein Rotorblatt in einer vertretbaren Zeit untersuchen können, so dass es letztlich möglich ist, sämtliche drei Rotorblätter einer Windkraftanlage an einem Arbeitstag zu untersuchen.
- 3) Das Robotersystem muss fähig sein, verschiedene Sensoren oder Kameras zur zerstörungsfreien Prüfung mitzuführen. Es muss eine leichte Austauschbarkeit der verwendeten Prüfgeräte gewährleistet werden.
- 4) Das Gesamtsystem muss so ausgelegt sein, dass jeglicher Personen- oder Sachschaden beim Einsatz ausgeschlossen werden kann.
- 5) Das Robotersystem muss in der Lage sein, komplexe Bewegungsabläufe auszuführen.
- 6) Das Robotersystem muss in Leichtbauweise ausgeführt sein und eine möglichst große Nutzlast zum Mitführen der nötigen Prüfgeräte zur Verfügung stellen.
- 7) Das Robotersystem muss in der Lage sein, gekrümmte Flächen zu begehen, wobei sowohl negative wie auch positive Krümmen bewältigt werden müssen. Ein Krümmungsradius von einem Meter sollte bewältigt werden können.



- 8) Das Robotersystem muss in der Lage sein die „Ränder“ des Rotorblattes also die Rotorblattvorderkante und –hinterkante zu erkennen und entlang dieser Kanten zu arbeiten.
- 9) Das Robotersystem muss ein Maximum der Blattoberfläche begehen und damit untersuchen können.
- 10) Der Roboter muss über ein System zur Positionserfassung verfügen, um die während der Untersuchung zurückgelegte Wegstrecke zu dokumentieren.
- 11) Eine Bildbearbeitungssoftware, mit deren Hilfe eine große Anzahl Einzelbilder zu einem Gesamtbild hoher Auflösung zusammengesetzt werden kann, muß bereit gestellt werden. Diese Datenbasis kann dann vor Ort oder zu jedem beliebigen späteren Zeitpunkt bearbeitet und analysiert werden.
- 12) Es ist eine Software zur automatischen Fehlererkennung bereit zu stellen, um die vom Robotersystem aufgenommen Bilder automatisch auf Schadstellen untersuchen zu können. Identifizierte Schadstellen sollen mit ihrer Position in einer eigenen Datei dokumentiert werden.



2. Stand der Technik

Es finden sich zahlreiche Designs und Patente in der Literatur, deren Aufgabe es ist geneigte Flächen begehen zu können. Viele dieser Konzepte stammen aus dem Bereich der Fassadenreinigung. Die Haftung an der Fläche wird in der Regel mit Saugfüßen erreicht. Es finden sich Varianten, die in der Lage sind ihr Eigengewicht selbst zu tragen, wie auch Roboter die seilgeführt über die schräge oder senkrechte Fläche geleitet werden.

Die relevantesten Beispiele alternativer Konzepte finden sich im Folgenden:

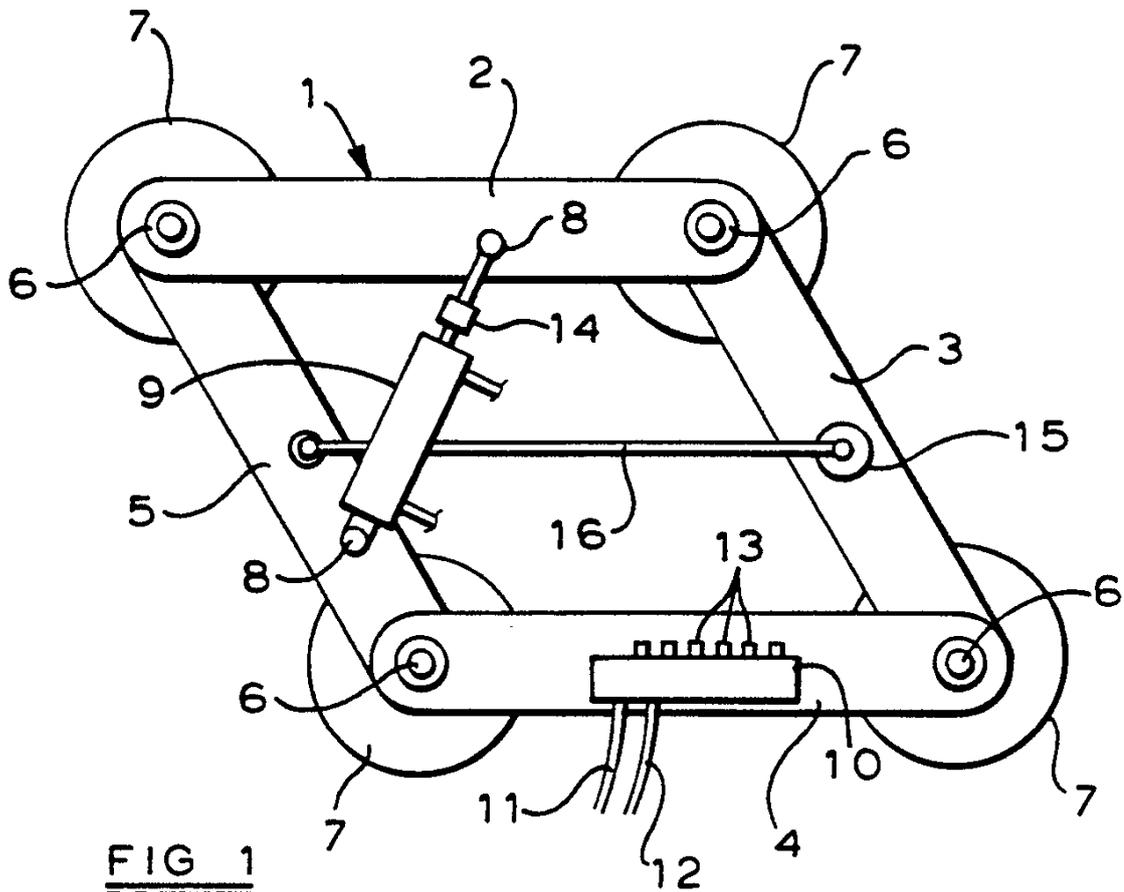


Abb.2-1: Einfaches Roboterkonzept, das nur auf ebenen Flächen einsetzbar ist. Der Antrieb erfolgt über einen Pneumatik- oder Hydraulikzylinder. Die Saugfüße können individuell evakuiert werden, dadurch ist im Zusammenspiel mit der "Trapezmechanik" eine Richtungsänderung möglich. Dieser Roboter wurde 1989 von Portsmouth Polytechnic Enterprise (Pat. Nr. GB2238992) konzipiert.

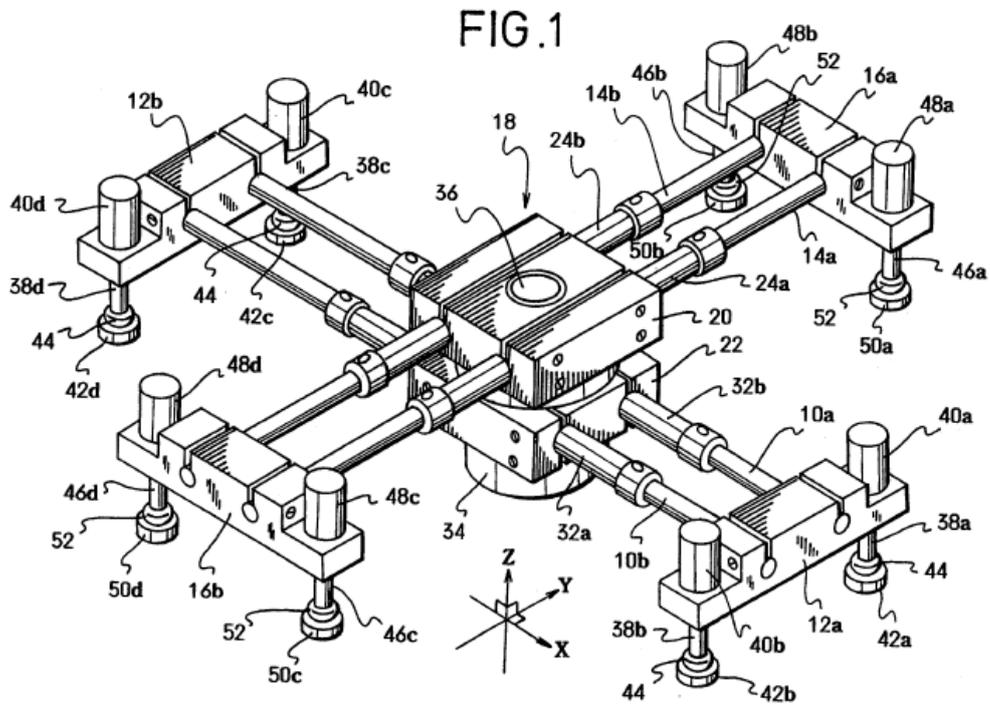
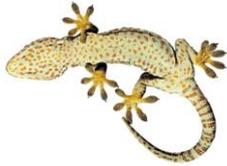


Abb. 2-2: Konzept eines Kletterroboters. Das Design ist dem Ausgangskonzept des „Gecko“ ähnlich. Es verfügt über Linear-, Dreh-, Hubeinheit. Der Kontakt zur Oberfläche wird über Saugfüße gewährleistet. Das Konzept wurde 1992 von K. Yanagisawa (Pat.Nr. US5351626) erarbeitet.

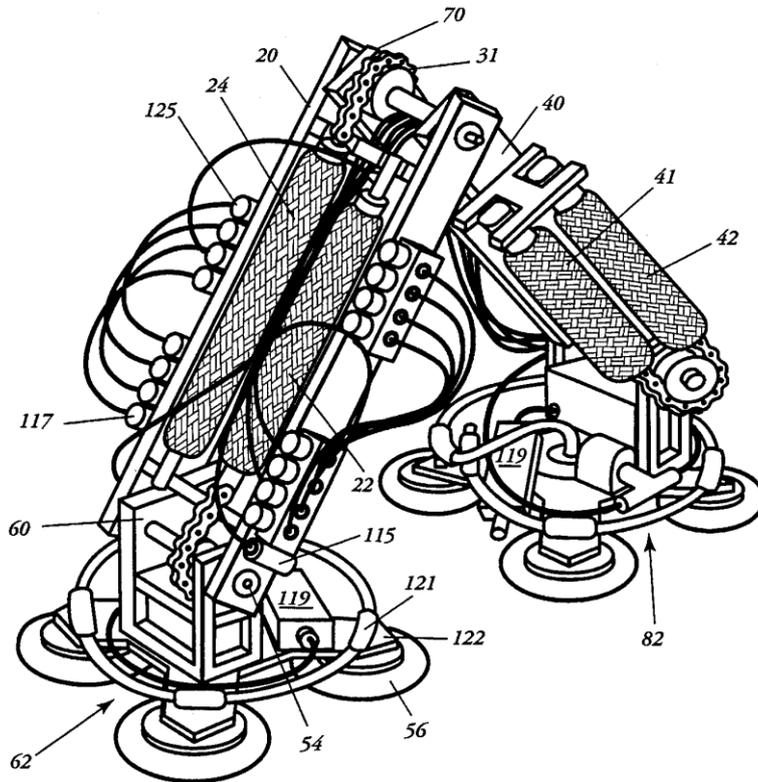


Abb.2-3: Konzept eines Kletterroboters. Dieser Roboter sollte in der Lage sein auch gekrümmte Flächen zu begehen. Die Konstruktion erinnert an das Design eines Ellenbogens. Das Konzept wurde 1994 an Vanderbilt Universität 1994 (Pat. Nr. US5551525) erarbeitet.

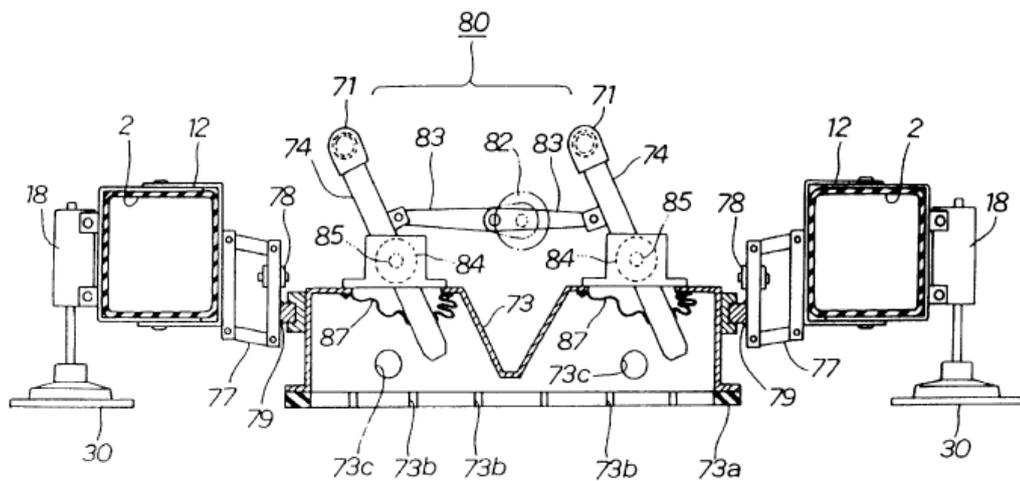
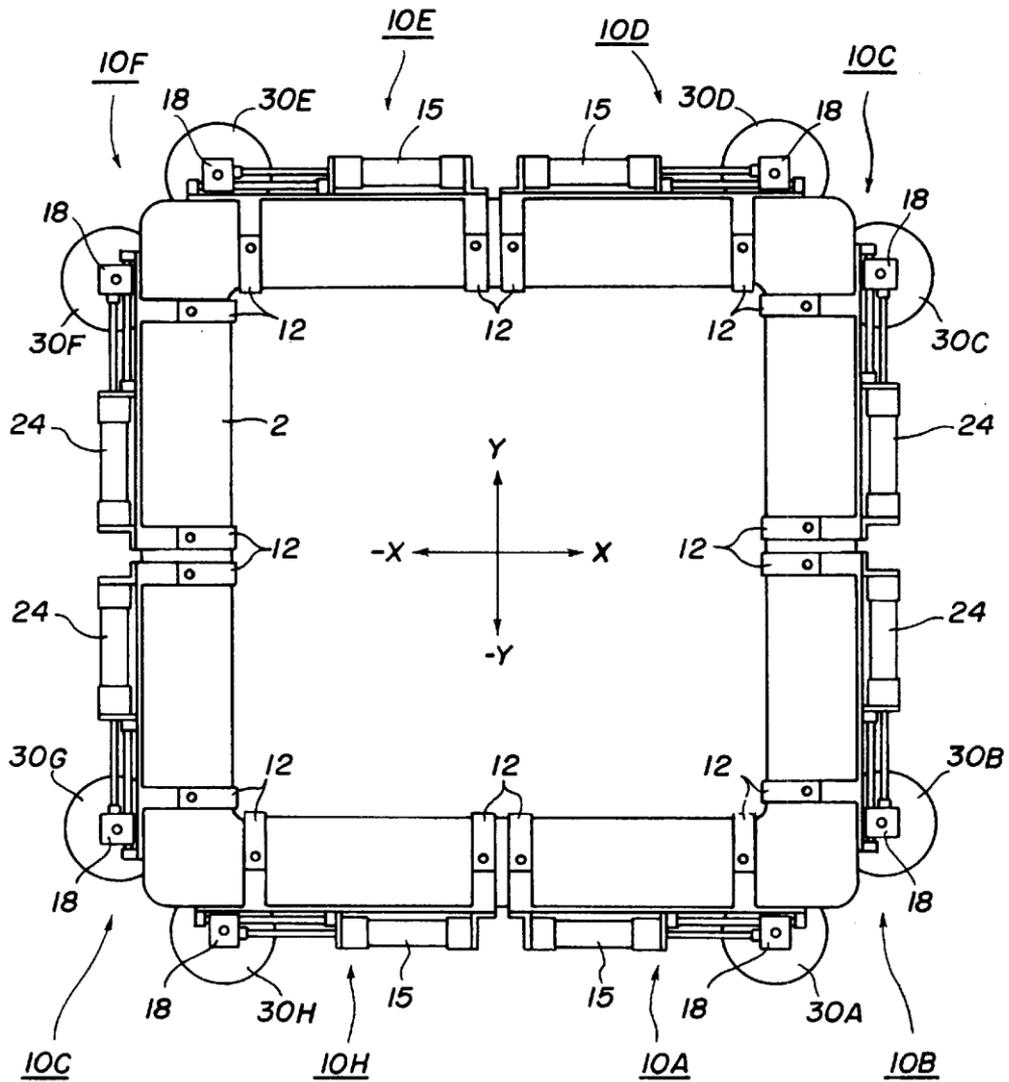


Abb. 2-4: Mechanisch sehr kompliziertes Konzept eines Kletterroboters. Das Konzept wurde 1996 von Honda (Pat. Nr. US5839532) erarbeitet.

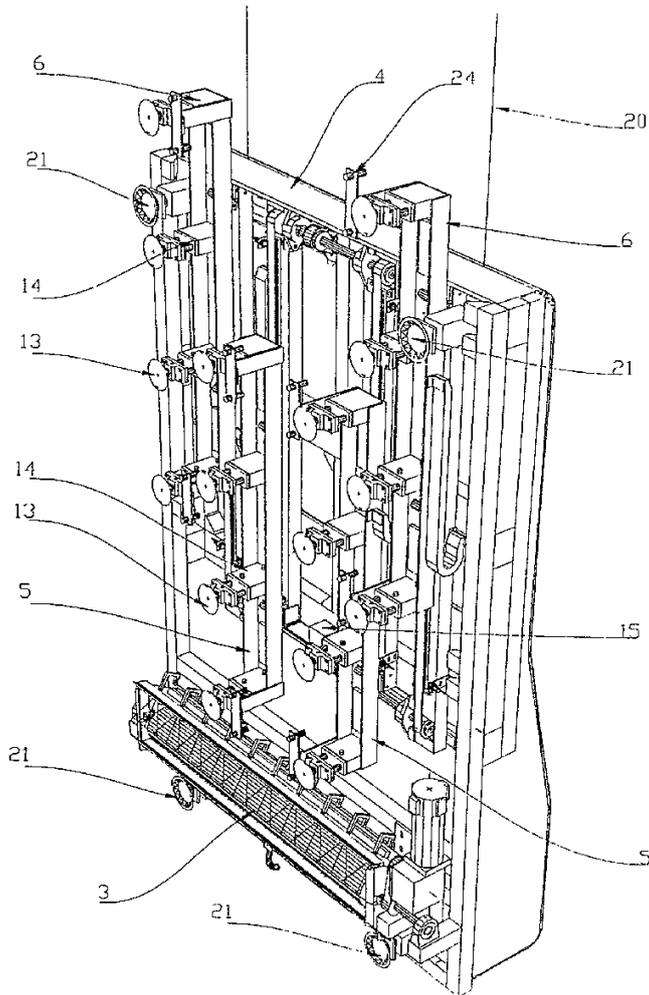


Abb.2-5: Konzept eines Kletterroboters. Dieser Roboter ist nur in der Lage ebene Flächen zu begehen. Er kann sein Eigengewicht nicht tragen und ist nicht in der Lage signifikante Richtungsänderungen auszuführen. Das Konzept wurde 1998 vom Fraunhofer Institut (Pat. Nr. DE 19835038) erarbeitet.

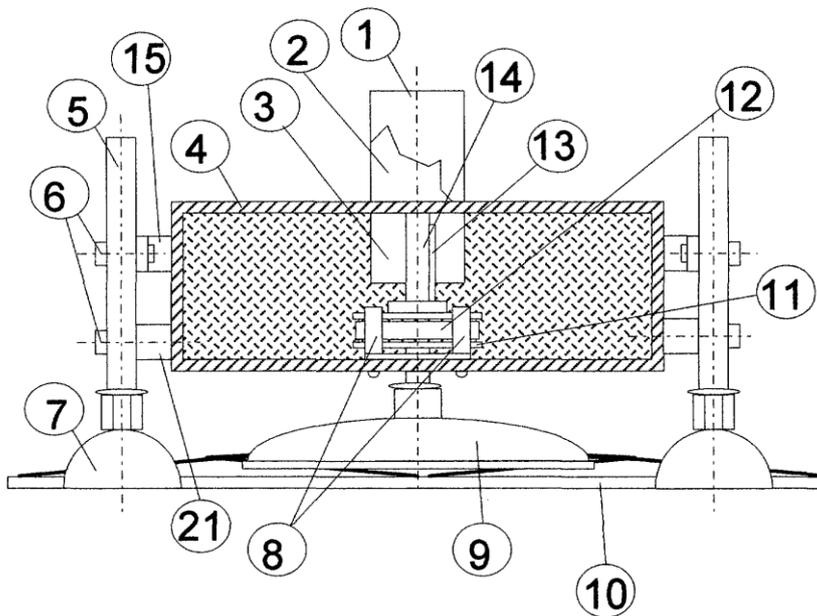


Abb.2-6: Konzept eines Kletterroboters. Dieser Roboter sollte zum Reinigen von Solarpanels dienen. Er ist jedoch nicht in der Lage gekrümmte Flächen zu begehen. Er wurde 1999 von A. Ridha (Pat. Nr. DE 19907437) erarbeitet.

Auffällig ist die Tatsache, dass zwar sehr viele Konzepte und Patente zum Thema Kletterroboter existieren, jedoch sehr wenige Produkte und diese in der Regel nur als Prototyp. Hierdurch zeigt sich, dass gerade bei der Problemstellung Kletterroboter die Umsetzung eines Konzeptes zu einem Prototypen auf viele oft unvorhergesehene Schwierigkeiten stößt. Ein Grund dafür liegt sicher in der oft unterschätzten Problematik der geforderten Leistungsdichte der nötigen Aktuatoren und Komponenten. So lässt sich in der Konzeptskizze z.B. leicht eine Dreheinheit einzeichnen mit geringem Gewicht und hohem Drehmoment. Diese dann zu realisieren ist jedoch oft sehr schwierig. Ein Kletterroboter, der eine beliebig gekrümmte Oberfläche, wie es ein Rotorblatt darstellt, zuverlässig begehen kann, dies in akzeptabler Geschwindigkeit und mit der Fähigkeit die nötige Sensortechnik zu tragen, ist nicht existent. Eine eigene Entwicklung daher unumgänglich.



3. Entwicklung der Roboterplattform

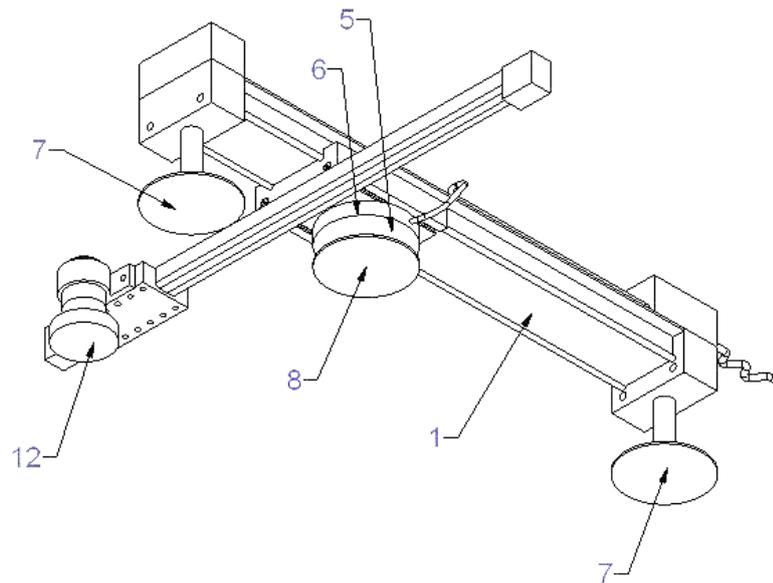


Abb.3-1: Konzeptionelles Anfangsdesign der Roboter-Plattform zur Rotorblattinspektion

1. Lineareinheit; 5. Hubeinheit; 6. Dreheinheit 7. Saugfüße; 8. Saugfuß; 12 Werkzeug/Messzeug (z.B. Ultraschallmesskopf) auf Quertraverse

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Entwicklungsschritte, die nötig waren, um die zuvor erwähnten Aufgaben zu erfüllen, detailliert beschrieben. Dabei wurden auch Umwege gegangen und Sackgassen betreten. Dies liegt in der Natur eines jeden Entwicklungsprozesses. Die im Folgenden vorgestellten Entwicklungsschritte repräsentieren die Arbeitspakete (AP) 1, 2, 3 und 4.

Abb.3-1 zeigt das Ausgangskonzept der Entwicklung. Es stellt einen Kletterroboter dar, der sich nach dem Prinzip der „Schildkrötengrafik“ („Turtelgrafik“) fortbewegen soll. Dies beschreibt einen ebenen Bewegungsablauf durch serielles Zusammensetzen von Linear- und Rotationsbewegung.

3.1 Entwicklung der Roboterplattform Version 1.0

Die Art der Versorgung des Robotersystems mit Energie stellte sich als eine der wichtigsten Einflussgrößen der Roboterkonstruktion heraus. Es war die Frage zu klären, welche Energieform eignet sich am besten die gestellten Aufgaben zu erfüllen.



Elektrische Energie oder pneumatische Energie? Führt man die Energie von Außen zu oder stellt man sie durch einen Energiespeicher an Bord des Roboters zur Verfügung?

Elektromechanische Lösung – Schrittmotoren als Antrieb für Linear- und Rotationsbewegung.

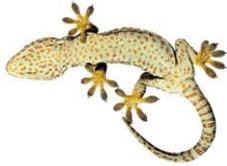
Das Ursprungskonzept folgte der Standardlösung vieler existierender Roboterdesigns, bei welchen die Roboterbewegung durch positionsteuerbare Motoren wie z.B. Schrittmotoren ermöglicht wird.

Diese Motoren haben den Vorteil relativ kompakt und leistungsstark zu sein. Weiterhin ist eine Dokumentation der Roboterbewegung durch Nachverfolgen der Steuerbefehle der Schrittmotoren leicht möglich. Ein weiterer Vorteil ist die präzise Ansteuerbarkeit. Schrittmotoren unterteilen die Drehbewegung in z.B. 180 Schritte pro Umdrehung, sie können also bezüglich Ihrer Antriebsachse auf 2° genau positioniert werden. So ist es möglich, den Roboter eine genau definierte lineare oder rotatorische Bewegung ausführen zu lassen, indem man den Motor die entsprechende Schrittzahl ausführen lässt.

Mögliche Fehler in der Wegdokumentation können durch Schlupferscheinungen auftreten. Schlupf kann sich ergeben durch eine Relativbewegung (Rutschen) zwischen Saugnäpfen und Rotorblattoberfläche. Eine weitere Ursache für Schlupf kann im „Durchrutschen“ des Rotors des Schrittmotors gegenüber dem Magnetfeld des Stators liegen. Ein solches Durchrutschen tritt auf, wenn das zur gewünschten Bewegung nötige Moment nicht mehr vom Motor bereitgestellt werden kann.

Nachteilig ist das ungünstige Drehzahl/Drehmomentverhalten von Schrittmotoren. Das Drehmoment sinkt mit steigender Drehzahl ab, ab einer bestimmten Grenzdrehzahl sogar sehr schnell. Dies führt in dem betrachteten Anwendungsfall zu einer starken Begrenzung der möglichen Geschwindigkeit, da bei höherer Drehzahl die resultierende Antriebskraft zu gering ist, um den Roboter in allen Situationen und Lagen anzutreiben.

Ein weiterer Nachteil ist in den relativ hohen Strömen (hier ungefähr 3A/Motor) zu sehen, die zum Betrieb der Schrittmotoren bereitgestellt werden müssen. Dies führt bei externer Zuleitung zu Versorgungsleitungen mit großen Querschnitt und damit hohem Gewicht. Mit zunehmender Zuleitungslänge wird der Roboter durch diese Kabellast zusätzlich beansprucht. Bei Bereitstellung der elektrischen Energie direkt auf dem Roboter durch Batterien ergibt sich ein analoges Gewichtsproblem.



Die Version 1.0 der Roboterplattform wurde bezüglich der Drehbewegung sowie der Linearbewegung von Schrittmotoren getrieben. Die nötige Hubbewegung wurde durch zwei Pneumatikzylinder realisiert. Die Drehbewegung wurde durch einen Zahnriementrieb, die Linearbewegung durch einen Spindeltrieb (später Zahnstangentrieb) realisiert.

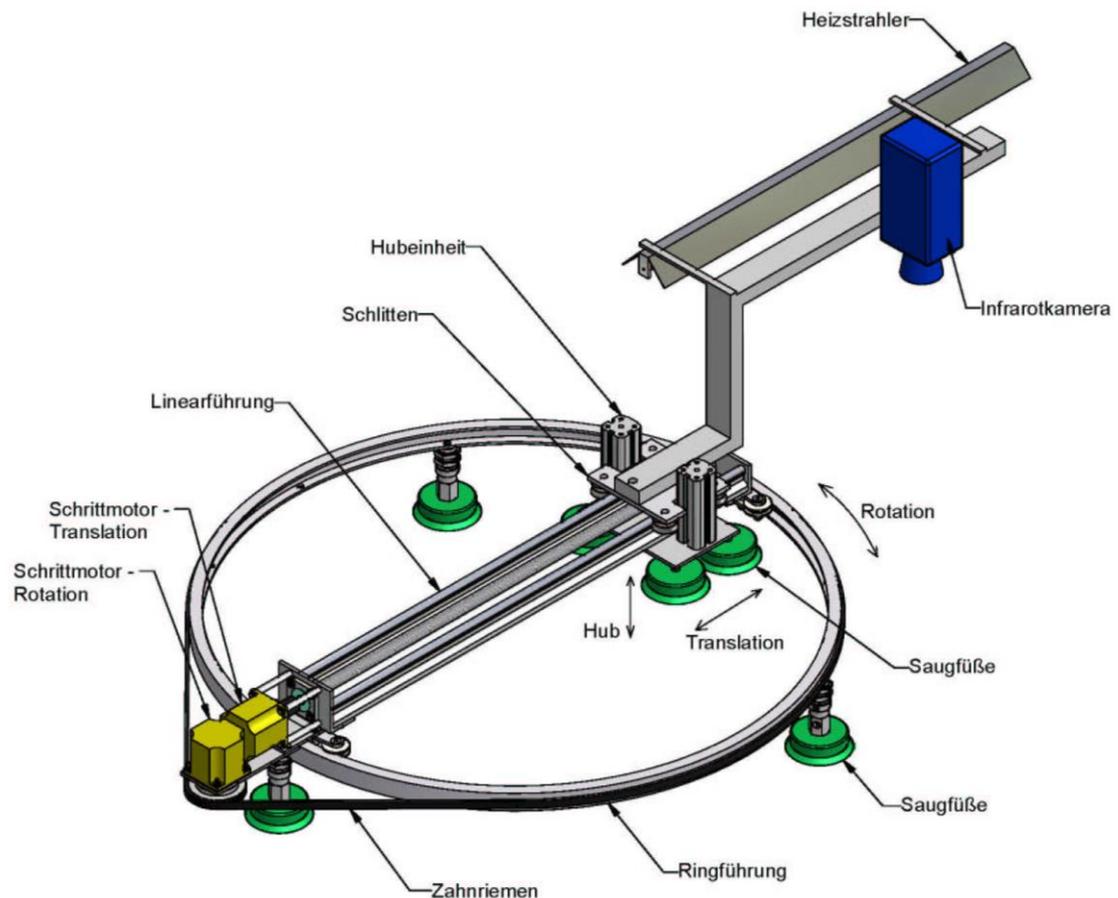
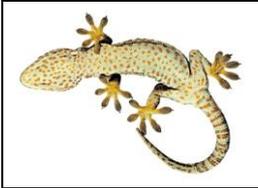


Abb.3.1-1: CAD-Model des Roboters mit Schrittmotorantrieb. Drehbewegung mittels Zahnriemen, Linearbewegung durch Spindeltrieb. (Quelle: Idaswind GmbH)

Die mechanische Plattform des Robotersystems

Im Unterschied zum konzeptionellen Anfangsdesign (Abb.2.1) wurde ein Design gewählt, dass aus einer Außenringeinheit mit drei um 120° versetzten Saugfüßen und einer in dieser Außenringeinheit drehbar gelagerten Brücke besteht. Die Brücke setzt sich aus einer Lineareinheit mit verschiebbaren Schlitten, sowie Lagerinnenringsegmenten zusammen. Am Schlitten der Lineareinheit befindet sich das Hubsystem mit vier daran befestigten Saugfüßen. Im Ergebnis lassen sich entsprechend der eingangs beschriebenen „Turtlegraphik“ möglich ist.



Ringeinheit

Die Grundstruktur der Ringeinheit bilden zwei durch mehrere Hülsen auf Abstand gehaltene Aluminiumringe. Diese bildet eine biegesteife Basis nach dem Prinzip des I-Trägers als Grundrahmen der Ringeinheit. Der obere Ring dient als Lauffläche der Rollen der Brücke. Die drei am Ring befestigten Saugfüße sind über eine Vakuumleitung mit einer Vakuumpumpe verbunden. Nachteilig an dieser Reihenschaltung der Saugfüße ist die nicht vorhandene Redundanz gegen Leckage. Der Vorteil besteht in der Einfachheit und dem geringen Gewicht dieser Lösung.

Brücke

Auf dem Schlitten der zur Brücke gehörenden Lineareinheit befindet sich die Ventilsteuerung für die Pneumatikzylinder, die Leistungselektronik der Schrittmotoren sowie die beiden unabhängigen Vakuumerzeuger für die beiden gegeneinander verschieb- und verdrehbaren Saugfußkreise. Weiterhin ist an dem Schlitten die Hubeinheit befestigt, mittels der die vier Saugfüße vertikal verschoben werden können. Die Hubeinheit wird von zwei parallel arbeitenden Pneumatikzylindern getrieben. Der Schlitten ist mit Gleitlagern (IGUS) ausgerüstet, die ein leichtes Verschieben auf der Linearführung ermöglichen. An den Enden der Linearführung sind zwei Ringsegmente (im gleichen I-profilartigen Aufbau wie der Außenring selbst) mit Laufrollen angebracht, die zusammen mit dem oberen Ring der Ringeinheit das gesamte Drehlager bilden (siehe Abb. 3.1-1 bzw. Abb.3.1-2).

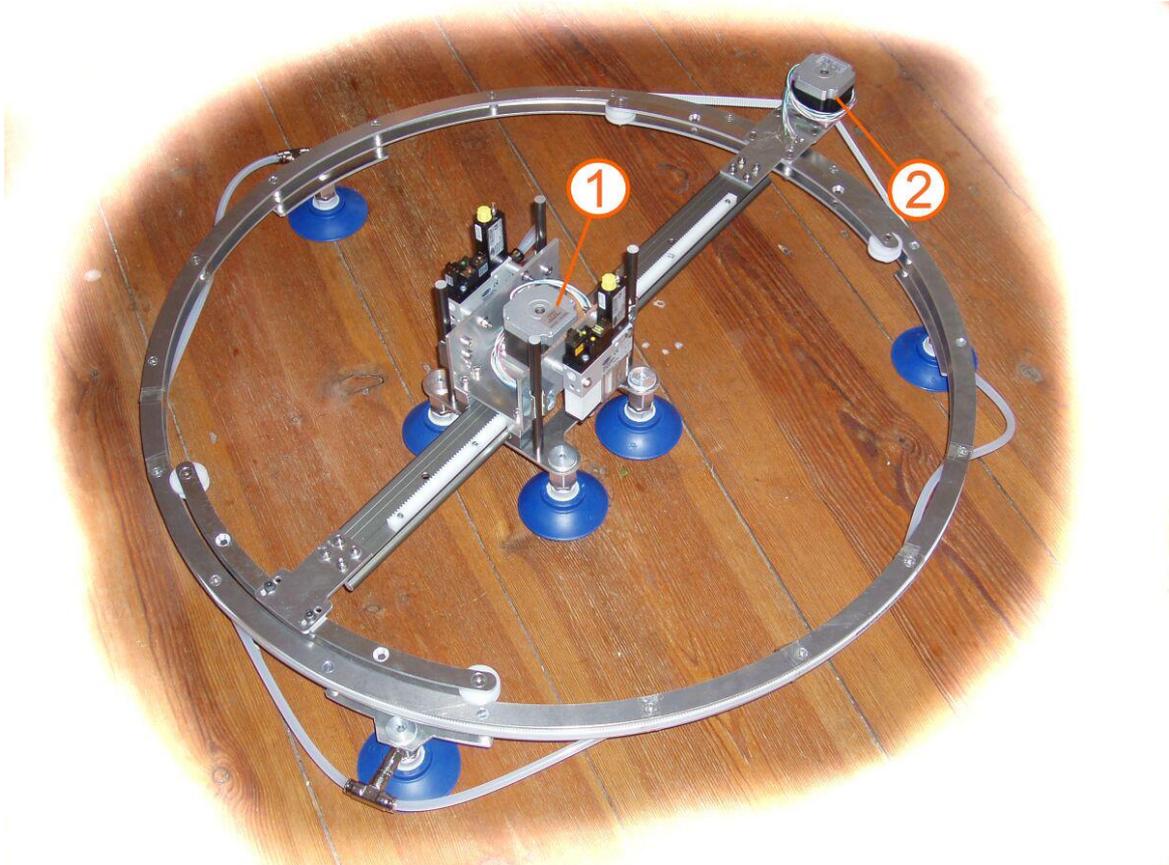
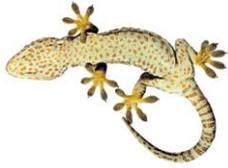
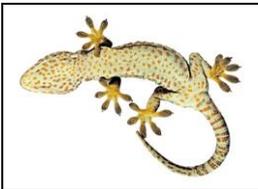


Abb.3.1-2: Realisierter Prototyp, ausgerüstet mit Schrittmotoren zur Linear- und Drehbewegung sowie Pneumatikzylindern zur Hubbewegung. (Quelle: Idaswind GmbH)

Das Ansaugen des Roboters an die zu begehende Oberfläche wurde durch Vakuumsaugfüße (Fa. Schmalz Vakuumtechnik) erreicht. Das Vakuum wurde mit einer geregelten Venturidüse erzeugt. Eine solche Vakuumpumpe benötigt lediglich Druckluft als Energie, die über eine mitgeführte Druckluftleitung bereitgestellt wird. Die Regelung der Vakuumpumpe ermöglicht einen druckluftsparenden Betrieb, da nach einmaligem Ansaugen nur nachgepumpt wird, wenn das Vakuum einen einstellbaren Schwellwert unterschreitet. Für die Auswahl der Saugfüße spielen folgende Parameter eine Rolle:

- Die Flexibilität, bzw. Elastizität im nicht angesaugten Zustand beeinflusst die Fähigkeit der Saugfüße sich an Krümmung und Unebenheit anzupassen.
- Die Steifigkeit im angesaugten Zustand bestimmt die Stabilität des Roboters auf der zu begehenden Oberfläche.
- Das Gewicht des Saugfußes
- Maximale Haltekraft in Abhängigkeit von der Beanspruchungsrichtung
- Das Volumen des Saugfußes sollte möglichst gering sein, da es den Vakuumverbrauch und damit letztlich den Druckluftverbrauch bestimmt.



- Die Abdichtungseigenschaften bestimmen den Leckageverlust und die Toleranz gegen Oberflächendefekte.

Die ausgewählten Saugnäpfe gewährleisteten eine Haltekraft von 300N in vertikaler Richtung auf sauberer glatter Oberfläche. Dies entspricht einer 2.1-fachen Sicherheit, bezogen auf die aus Eigengewicht und Nutzlast zusammengesetzte Belastung von 140N.

Der Test des Prototypen zeigte, dass die Antriebsleistung der Schrittmotoren für Bewegung mit akzeptabler Geschwindigkeit an der senkrechten Wand nicht ausreichend war. Leistungsstärkere Motoren hätten wiederum zu höherem Eigengewicht, sowie durch höheren Stromverbrauch zu entweder größerem Zuleitungsgewicht oder größerem Batteriegewicht (je nach Energieversorgungskonzept) geführt. Der Vorteil der höheren Antriebsleistung wird durch höheres Gewicht erkauft und dadurch wieder egalisiert. Es musste also ein anderer Weg beschritten werden.

3.2 Entwicklung der Roboterplattform Version 1.1

Pneumatische Lösung – Pneumatikzylinder als Antrieb für Linear-, Rotations- und Hubbewegung.

Der nächste Entwicklungsschritt bestand in der Umrüstung zum rein pneumatischen Antrieb. Hierzu mussten, neben dem Ersetzen der elektrischen Motoren durch doppelwirkende Pneumatikzylinder, diverse konstruktive Änderungen vorgenommen werden. Alle drei Basisbewegungen (Linear-, Rotation- und Hubbewegung) wurden nun von Pneumatikzylindern ausgeführt. Pneumatikzylinder besitzen ein gutes Verhältnis Zylinderkraft zu Zylindergewicht. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass als Energieversorgung die zur Erzeugung des Vakuums sowieso vorhandene Druckluft genutzt werden kann, die schweren elektrischen Zuleitungen zur Vorsorgung der Schrittmotoren somit entfallen können. Die Pneumatikzylinder stellen genügend Antriebsleistung zur Verfügung, um den Roboter in jeder Raumlage und bei geforderter Zuladung mit ausreichender Geschwindigkeit anzutreiben. Die Pneumatikzylinder wurden aus dem Standardprogramm der Firma FESTO ausgewählt, wobei der größte Zylinder mit einem Kolbendurchmesser von 20 mm einem Hub von 500 mm und einer maximalen Zylinderkraft von ungefähr 350 N für die lineare Bewegung genutzt wurde.

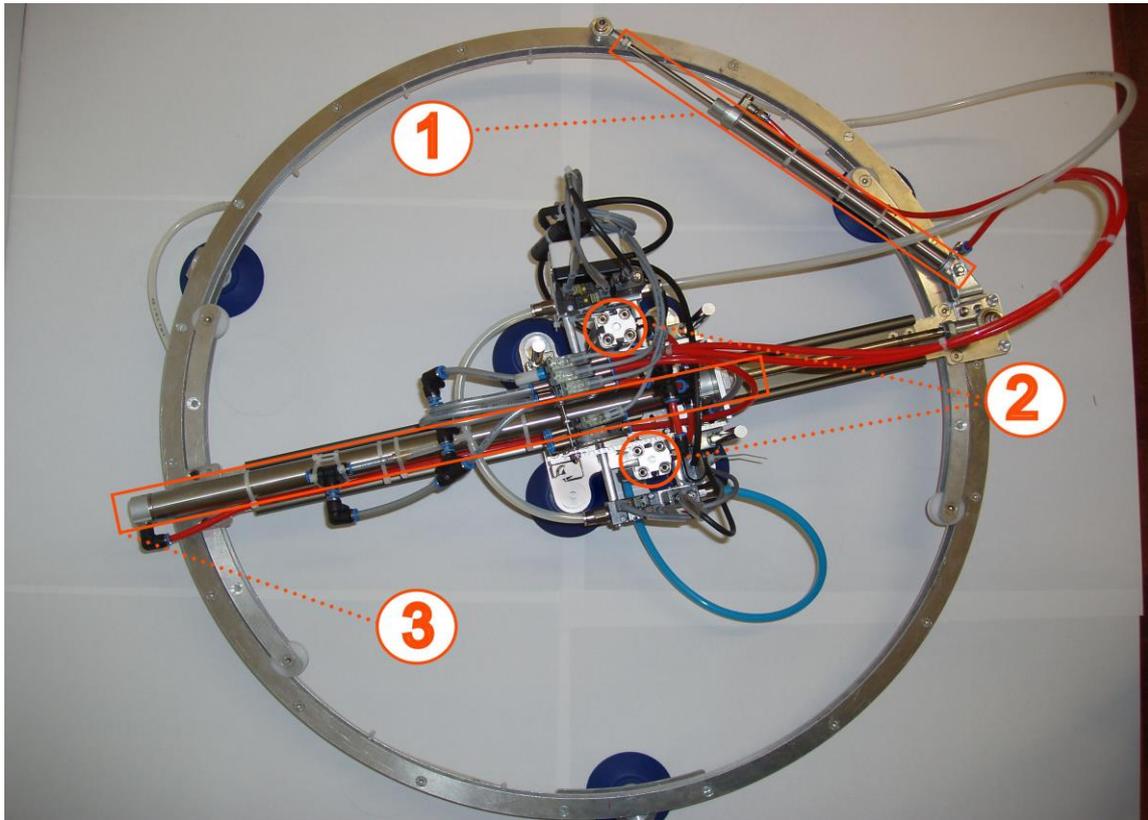


Abb.3.2-1: Verbesserte Version des Basismodells ausgerüstet mit Pneumatikzylindern für die Rotationsbewegung (1), für die Hubbewegung (2) und für die Linearbewegung (3) (Quelle Idaswind GmbH).

Die Ansteuerung der Pneumatikzylinder mit einfachen Magnetventilen erlaubt nur zwei feste Positionen für die Zylinder, entweder ganz ausgefahren oder ganz eingefahren, was im Falle der Linearbewegung eine feste Schrittweite von 500 mm bedeutet. Dies ist natürlich von Nachteil. Ebenso verursacht die hohe Anfangs- und Endbeschleunigung große Kräfte, die das Robotersystem dynamisch belasten und erschüttern. Maßnahmen, um die beschriebenen Nachteile zu vermeiden, werden unten beschrieben. Ein weiteres Problem stellte die Umsetzung der Linearbewegung des Pneumatikzylinders (1) in die gewünschte Drehbewegung dar. Sie wurde dadurch ermöglicht, dass das eine Ende des Pneumatikzylinders an der Ringeinheit und dessen anderes Ende an der Brücke befestigt wurde. So wird die lineare Bewegung des Zylinders in eine Drehbewegung der Brücke gegenüber der Ringeinheit umgesetzt. Durch diese Anordnung war der maximale Drehwinkel (bestimmt durch die Position der Zylinderlagerpunkte und des Zylinderhubs) auf 45° festgelegt.

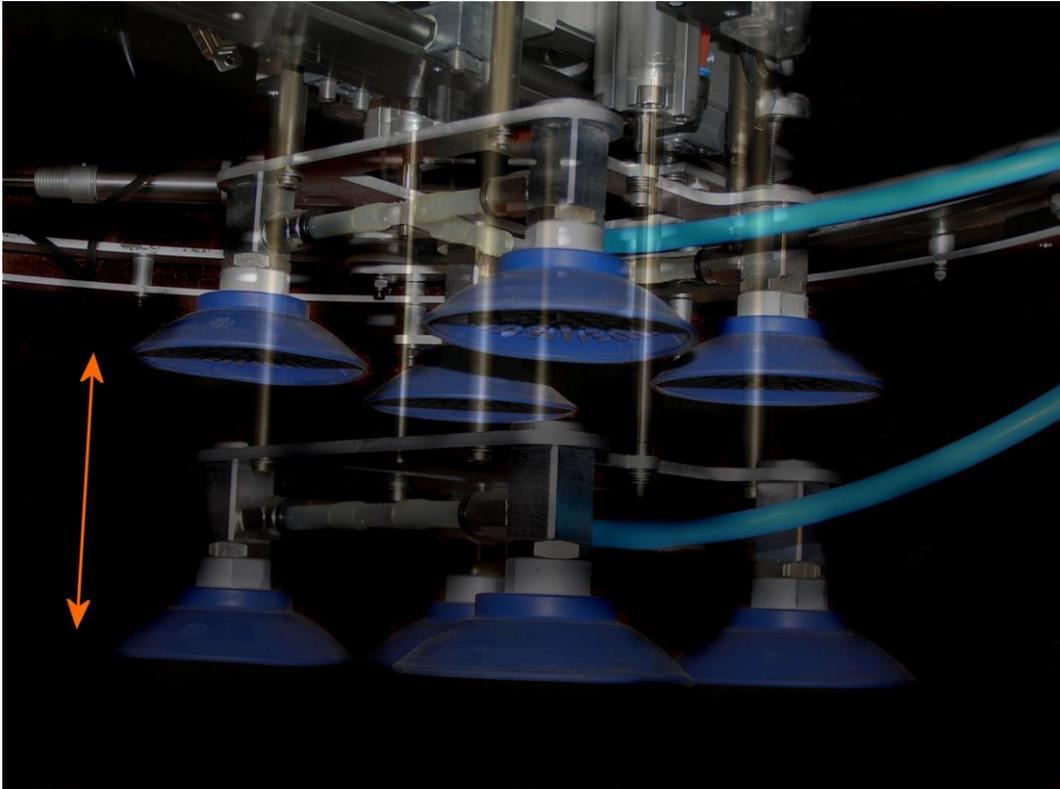


Abb.3.2-2: Das Bild zeigt die Hubeinheit in ihren zwei Maximalpositionen, also ausgefahren und eingefahren. Die Saugfüße sind an einem Rahmen befestigt, der von zwei parallel arbeitenden Pneumatikzylindern angetrieben wird. Die Hubeinheit ist ebenfalls mit Gleitlagern ausgerüstet.

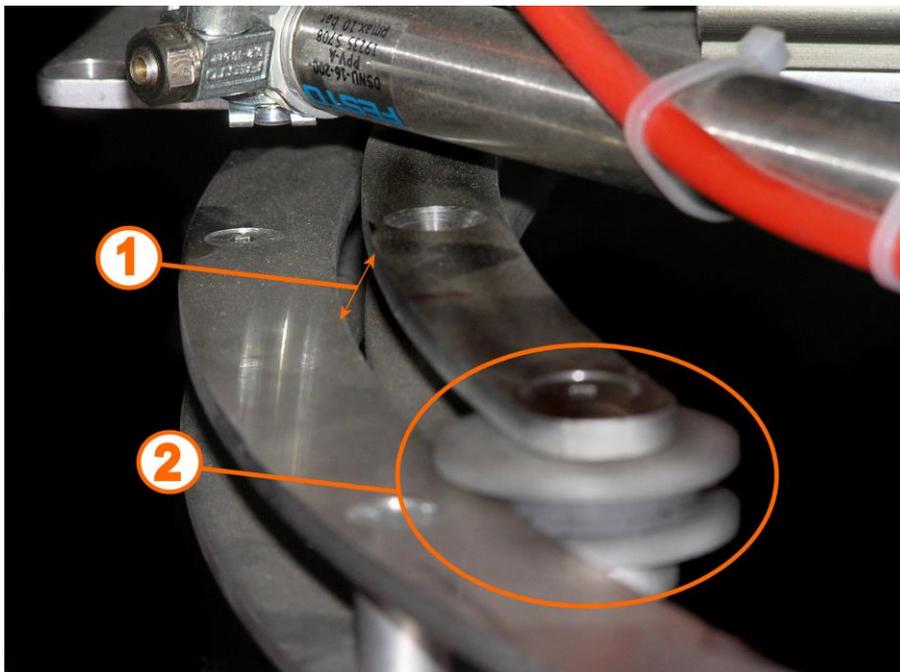
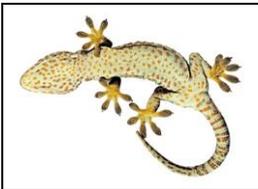


Abb.3.2-3: Die Kunststofflaufräder (2) (POM) ermöglichen die Drehbewegung der Brücke gegenüber der Ringeinheit.



Der Bewegungsablauf – nötige Abfrage und Steuerbefehle

Der Bewegungsablauf des Roboters setzt sich aus der beliebigen Abfolge von Linear- und Drehbewegungen zusammen. Will man in eine bestimmte Richtung fortschreiten, so muss zunächst die Brücke in diese Richtung weisen, dann kann mit der Linearbewegung begonnen werden.

Die Linearbewegung besteht aus der Abfolge dieser Einzelschritte:

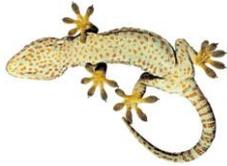
Ausgangslage sei: Robotersystem steht auf den Saugfüßen des Ringsystems (Vakuumpumpe 1 versorgt die Saugfüße des Schlittens, Vakuumpumpe 2 versorgt die Saugfüße der Ringeinheit)

- Aufsetzen der Saugfüße des Schlittens auf den Untergrund
- Vakuumpumpe 1 erhält den Steuerbefehl ansaugen
- Drucksensor der Vakuumpumpe 1 überprüft das Vorhandensein des Vakuums
- Vakuumpumpe 2 erhält den Steuerbefehl „Abblasen“, womit die Saugfüße der Ringeinheit gelöst werden und die Ringeinheit sich, da sie nun in vertikaler Richtung frei ist, weiter nach oben schiebt, um so Bodenfreiheit für die Saugfüße der Ringeinheit zu erhalten.
- Der für die Linearbewegung zuständige Zylinder 3 wird in die andere Endposition gebracht, wodurch sich die Ringeinheit linear verschiebt.
- Die Hubeinheit senkt die Ringeinheit wieder, wodurch die Saugfüße der Ringeinheit wieder Bodenkontakt bekommen.
- Vakuumpumpe 2 erhält den Steuerbefehl ansaugen
- Drucksensor der Vakuumpumpe 2 überprüft das Vorhandensein des Vakuums
- Vakuumpumpe 1 erhält den Steuerbefehl „Abblasen“, womit die Saugfüße des Schlittens gelöst werden und die Hubeinheit die Saugfüße des Schlittens weiter nach oben verfährt, da sie nun in vertikaler Richtung frei sind.
- Der für die Linearbewegung zuständige Zylinder 3 wird in die andere Endposition gebracht, wodurch sich der Schlitten linear verschiebt.

Wiederholt man diesen Ablauf in einer Schleife, so schreitet man pro Schritt um jeweils 500 mm voran.

Die Drehbewegung besteht aus der Abfolge folgender Einzelschritte (siehe Abb. 3.2-1):

Ausgangslage sei: Robotersystem steht auf den Saugfüßen des Ringsystems



- Aufsetzen der Saugfüße des Schlittens auf den Untergrund
- Vakuumpumpe 1 erhält den Steuerbefehl ansaugen
- Drucksensor der Vakuumpumpe 1 überprüft das Vorhandensein des Vakuums
- Vakuumpumpe 2 erhält den Steuerbefehl „Abblasen“, womit die Saugfüße der Ringeinheit gelöst werden und die Ringeinheit sich, da sie nun in vertikaler Richtung frei ist, weiter nach oben schiebt, um so Bodenfreiheit für die Saugfüße der Ringeinheit zu erhalten.
- Der für die Drehbewegung zuständige Zylinder 1 wird in die andere Endposition gebracht, wodurch sich die Ringeinheit um einen Winkel von 45° verdreht.
- Die Hubeinheit senkt die Ringeinheit wieder, wodurch die Saugfüße der Ringeinheit wieder Bodenkontakt bekommen.
- Vakuumpumpe 2 erhält den Steuerbefehl ansaugen
- Drucksensor der Vakuumpumpe 2 überprüft das Vorhandensein des Vakuums
- Vakuumpumpe 1 erhält den Steuerbefehl „Abblasen“, womit die Saugfüße des Schlittens gelöst werden und die Hubeinheit die Saugfüße des Schlittens weiter nach oben verfährt, da sie nun in vertikaler Richtung frei sind.
- Der für die Drehbewegung zuständige Zylinder 1 wird in die andere Endposition gebracht, wodurch sich die Brücke um weitere 45° verdreht.

Die Kinematik dieser Drehbewegung ist insofern nachteilig, als zum einen nur um einen festen Winkel gedreht werden kann (hier 45°), zum anderen zwischen zwei gleichgerichteten Drehbewegungen immer ein Umsetzen von einer Saugfüßeinheit auf die Andere nötig ist, was Zeit und Druckluftenergie kostet. Alternativlösungen werden im Weiteren noch beschrieben.

Im Folgenden soll die verwendete Vakuumtechnik und der Vorgang des Umsetzens von einer Saugfüßeinheit auf die andere genauer beschrieben werden:

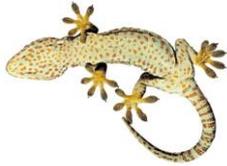
Für einen sicheren Halt des Roboters an der zu begehenden Fläche in jeder Lage (Schwerkrafteinfluß) und in allen Bewegungszuständen (dynamische Zusatzlasten) ist erforderlich den Evakuierungszustand der gerade im Eingriff befindlichen Saugfüßeinheit kontinuierlich zu überwachen. Die verwendete Vakuumpumpe (Schmalz) lässt sich über zwei Magnetventile steuern, wobei ein Ventil für den Zustand Ansaugen und das andere Ventil für den Zustand abblasen verantwortlich ist. Die Vakuumpumpe besitzt weiterhin eine sogenannte Luftsparautomatik. Diese interne Regelung der Vakuumpumpe sorgt dafür, dass nur gepumpt wird und damit auch nur Druckluft verbraucht wird, wenn das Druckniveau sich unter einen einstellbaren unteren Grenzwert bewegt. Die interne Steuerung der Vakuumpumpe veranlasst dann



ein Nachevakuiert bis das Vakuumniveau einen oberen Grenzwert überschreitet. So wird sichergestellt, dass das Vakuumniveau sich immer zwischen zwei einstellbaren Grenzwerten bewegt. Die Leckageverluste innerhalb eines Saugfußkreises resultieren in erster Linie aus Undichtigkeiten zwischen Saugfuß und Oberfläche, verursacht durch Risse, Unebenheiten, Schmutz, etc auf der zu begehenden Fläche. Je nach Ausmaß der Undichtigkeit wird die Vakuumpumpe mehr oder weniger häufig nachpumpen müssen, um das Vakuum in den eingestellten Grenzen zu halten. Der oben beschriebene Bewegungsablauf des Roboters erfordert ein dauerndes Umsetzen von einem Saugfußkreis auf den Anderen. Bezüglich der Gefahr eines Absturzes des Roboters erwies sich dieser Umsetzvorgang als der problematische Teil des Bewegungsablaufs. Ausgehend von einem sicher im Eingriff befindlichen Saugfußkreis muss für den Vorgang des Umsetzens der andere Saugfußkreis mittels der Hubeinheit gegen die zu begehende Oberfläche gedrückt werden. Die diesen Kreis versorgende Vakuumpumpe erhält den Befehl anzusaugen. Die interne Steuerung der Vakuumpumpe gibt ein Signal, wenn das Vakuumniveau den unteren Grenzwert überschritten hat, d.h. die gewünschte Mindestansaugkraft erreicht hat. In diesem Moment ist das Robotersystem mit beiden Saugfüßeinheiten an der Oberfläche angesaugt. Jetzt erst darf die andere Saugfüßeinheit gelöst werden, wozu der Befehl Ansaugen deaktiviert wird und durch kurzzeitiges Öffnen des Magnetventils, welches für das Abblasen zuständig ist, das Vakuum in dem zu lösenden Saugfußkreis eliminiert wird und so die Saugfüße nicht mehr an der Oberfläche haften und angehoben werden können, um dann für den nächsten Bewegungsschritt in eine andere Position gebracht zu werden. Sollte das Ansaugen eines Saugfußkreises nicht erfolgreich sein, d.h. das Vakuum kann nicht aufgebaut werden, so darf keinesfalls der noch im Eingriff befindliche zweite Saugfußkreis gelöst werden, da sonst ein Absturz droht. Lässt sich für einen Saugfußkreis kein Vakuum aufbringen, so hat dies in aller Regel folgende Ursachen:

- Einer oder mehrere Saugfüße stehen auf einer Schadstelle (z.B. Riss), wodurch eine Leckage entsteht, die die Vakuumpumpe nicht ausgleichen kann.
- Ein oder mehrere Saugfüße befinden sich außerhalb der begehbaren Fläche, ragen also über den Rand hinaus.
- Ein oder mehrere Saugfüße liegen nicht plan auf der Oberfläche auf und verursachen dadurch eine Leckage. Dies kann vor allem bei stark gekrümmten Oberflächen auftreten.

In dem Fall in dem das Ansaugen eines Saugfußkreises nicht gelingt, also ein Umsetzen nicht möglich ist, muss der geplante Schritt wieder rückgängig gemacht



werden und ein Ansaugen an einer Alternativposition versucht werden, um weiter fortschreiten zu können.

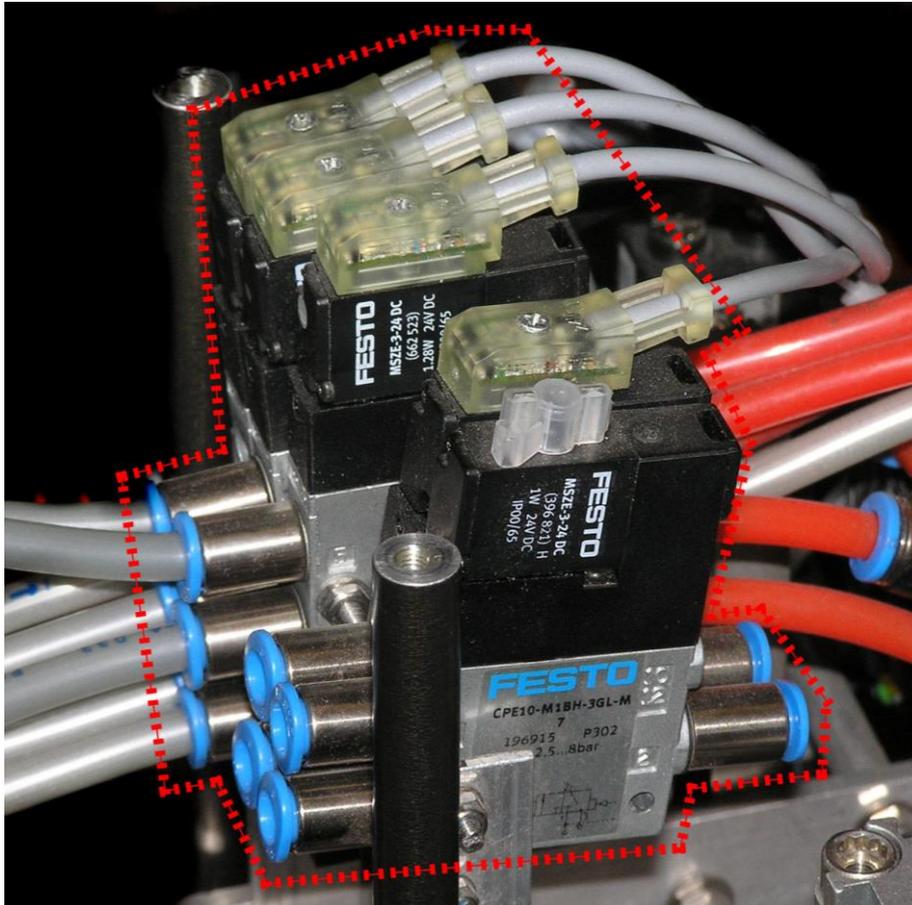


Abb.3.2-3: Magnetventile zur Ansteuerung der Pneumatikzylinder (FESTO)

3.3 Test der Roboterplattform Version 1.1

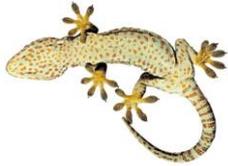
Nach Abschluss der Entwicklung der Roboterversion 1.1 wurden umfangreiche Tests durchgeführt. Die Tests wurden alle mit einer „Handsteuerung“ durchgeführt, d.h. alle bei der obigen Darstellung des Bewegungsablaufs aufgeführten nötigen Befehle wurden über Taster und Schalter von „Hand“ gegeben. Eine automatische Steuerung (die z.B. den Befehl schreite 8 m vorwärts unter Abarbeitung der dafür nötigen Befehle und Abfragen ausführt) war zu diesen Zeitpunkt noch nicht fertig gestellt.

Es wurden Tests bezüglich der Absturzsicherheit sowie der Schrittgeschwindigkeit an vertikalen Flächen in der Werkstätte von IDASWIND ausgeführt. Weitere Tests fanden am Wilhelm-Klauditz-Institut der Fraunhofer Gesellschaft statt. Dort stand ein ungefähr 10 m langes Rotorblattsegment bereit, auf dem das Verhalten unter „realen



Bedingungen“ getestet werden konnte. Der Test bot die Möglichkeit das Robotersystem in Bezug auf viele Konstruktionsaspekte hin zu überprüfen. Die Hauptfragestellung bezog sich auf die Begehbarkeit der Oberfläche eines realen Rotorblattes, also unter der Erschwernis von Krümmung, Verschmutzung der Oberfläche sowie Beschädigungen der Oberfläche. Zu Beginn wurde ein Blattbereich welcher annähernd eben, sauber und unbeschädigt war als Versuchsfläche gewählt. Der Roboter hatte keine Probleme beim Begehen der Fläche. Ein zweiter Versuch auf ebenem, aber von Rissen und Delamination beschädigten Untergrund zeigte die Empfindlichkeit des Systems gegenüber Leckagen. Leckagen könne bis zu einem solchem Ausmaß toleriert werden, wie die Vakuumpumpe fähig ist noch den eingestellten Mindestwert des Vakuumniveaus zu erreichen. Sicher ließen sich mit leistungsstärkeren Vakuumpumpen größere Leckagen tolerieren, was letztlich das Begehen von Bereichen mit stärkeren Beschädigungen ermöglichen würde. Diese Herangehensweise würde jedoch zu mehr Gewicht und größerem Druckluftverbrauch führen. Bei einem weiteren Test im stärker gekrümmten Bereich des Blattprofils zeigte sich das die Saugfüße zu unflexibel waren, um sich an die Krümmung anzupassen und so dicht anzuliegen. Die Schlussfolgerung aus den Tests waren folgende:

- Die verwendete Druckluftherzeuger (3l Druckspeicher, 8 bar, el. Kompressorleistung 300 W, Gewicht 8 kg) war ausreichend beim Begehen von unbeschädigten Flächen, bei denen keine nennenswerten Leckageverluste auftreten. Beim realen Rotorblatt zeigten sich die Grenzen des Druckluftherzeugers. Durch höhere Leckageverluste und damit verbundenen höheren Luftverbrauch zur Bereitstellung des Vakuums musste öfters pausiert werden, um dem Kompressor die nötige Zeit zum Auffüllen des Druckluftspeichers zu ermöglichen. Beim zukünftigen Betrieb des Roboters durch eine automatische Steuerung wird sich der Luftverbrauch, durch die dann mögliche schnellere Schrittfolge, weiter erhöhen. Die Auswahl eines möglichst kleinen und leichten Druckluftherzeugers erfolgte unter der Maßgabe den Druckluftherzeuger in den Maschinensatz der Windkraftanlage transportieren zu müssen. Hierzu wird im Weiteren ein alternativer Lösungsweg aufgezeigt.
- Die Saugfüße müssen toleranter gegenüber Oberflächenschäden sein, Schadstellen wie Risse besser abdichten.
- Die Saugfüße müssen toleranter gegenüber (durch die Oberflächenkrümmung hervorgerufenen) Winkelversatz zwischen Saugfuß und zu begehender Oberfläche sein.
- Der Hubweg der Hubeinheit sollte verlängert werden, um Krümmungen der zu begehenden Oberfläche besser zu bewältigen.



- Es muss eine Abfrage des Vorhandenseins von Oberflächenkontakt der Saugfüße eingeführt werden, um unsinnige Evakuierungsversuche, wie z.B. Versuch des Evakuierens im Falle keines Oberflächenkontaktes eines Saugfußes zu vermeiden. Solche Fehlversuche kosten Zeit, d.h. minimieren die Geschwindigkeit und verbrauchen unnötig Druckluft.
- Der bisherige Vollschrittbetrieb ist lediglich geeignet zur schnellen Fortbewegung. Die Linear- sowie die Drehbewegung muss jedoch in beliebigen Schritten möglich sein, um präzise eine gewünschte Position anfahren zu können.
- Der maximale Drehwinkel, der bisher ohne Umsetzen der Saugkreise erreicht werden kann, beträgt 45° . Dies muss auf mindestens 360° erweitert werden, da sonst für Richtungswechsel größer 45° zu viel Zeit beansprucht wird.

Die drei letzten aufgeführten Punkte waren schon vor den Tests bekannt, deren Realisierung war aber erst mit Einführung eines Steuerungssystems und zusätzlicher Sensorik sowie zusätzliche mechanischer Hardware möglich.

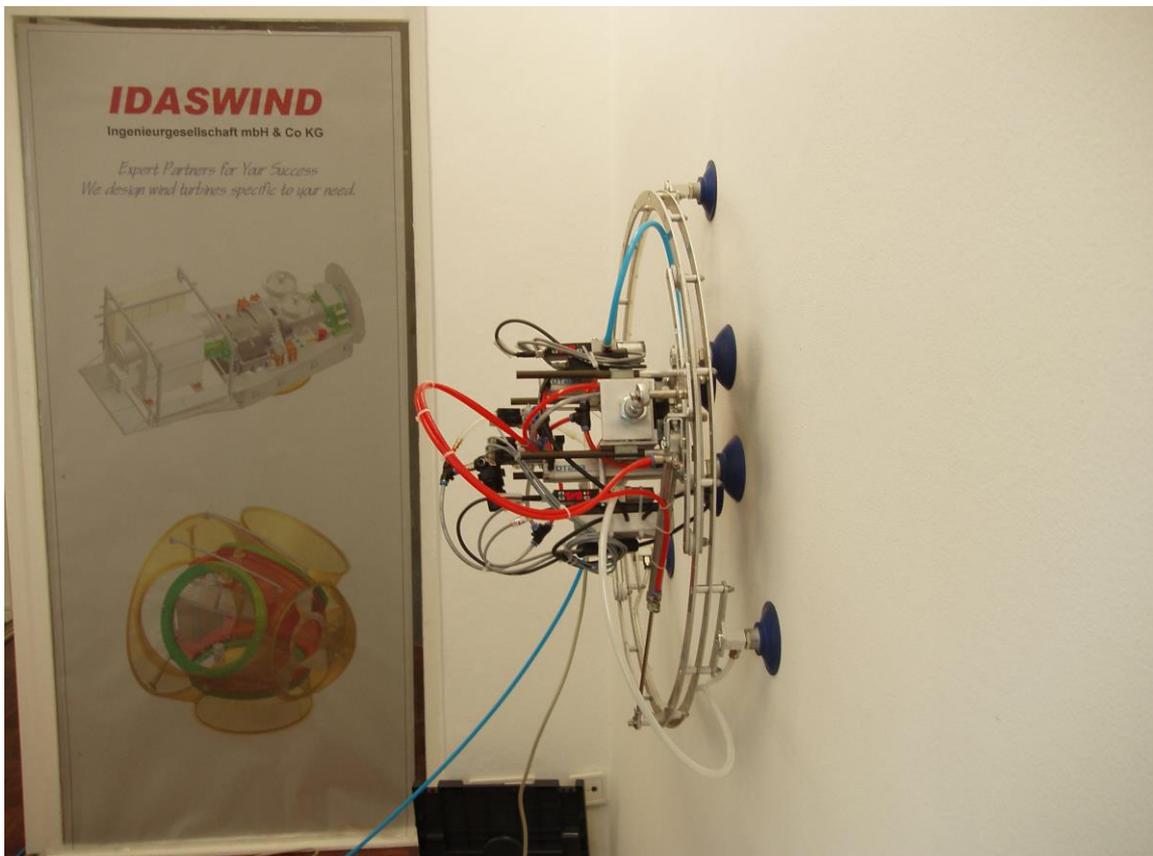


Abb.3.3-1: Test an einer vertikalen Wand in der Werkstätte von IDASWIND GmbH

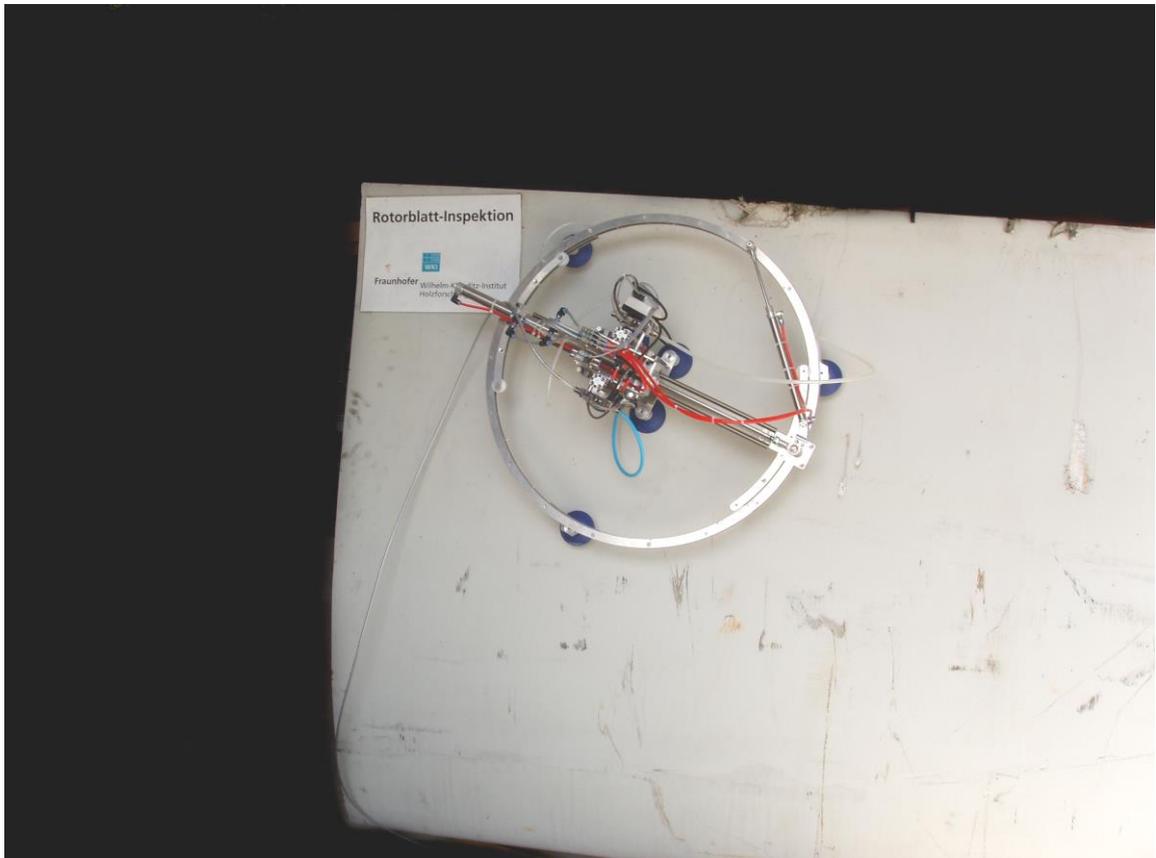


Abb.3.3-2: Der Roboter bei den Tests am Rotorblattsegment am Wilhelm-Klauditz-Institut der Fraunhofer Gesellschaft in Braunschweig.

3.4 Entwicklung der Roboterplattform Version 1.2

Die zweite Roboterversion sollte alle bisherigen Erkenntnisse und die daraus resultierenden Verbesserungen und Änderungen berücksichtigen. Die geplanten Modifikationen erstreckten sich auf den Bereich der Struktur, der Mechanik, der Pneumatik, der Steuerung und der Elektronik. Es wurde beschlossen einen neuen Prototypen zu verwirklichen, da die Veränderungsmöglichkeit der alten Plattform an ihre Grenzen stieß. Es wurden die Stärken des alten Designs übernommen und die geplanten Verbesserungen implementiert, um so ein verbessertes Model zu erhalten.

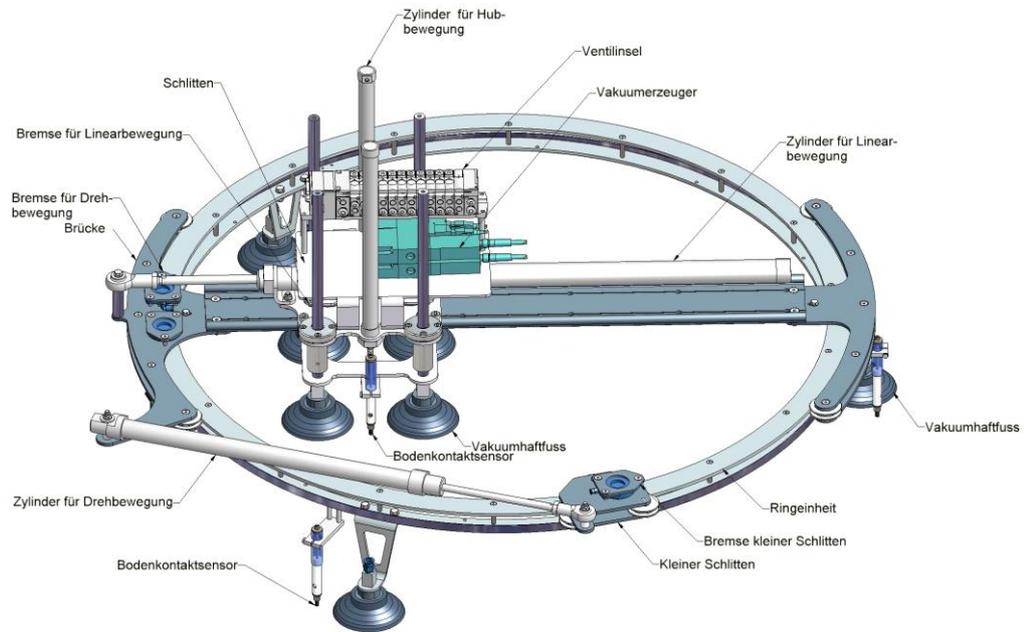


Abb. 3.4-1: CAD-Model der Version 1.2, von oben gesehen (Quelle: Idaswind GmbH)

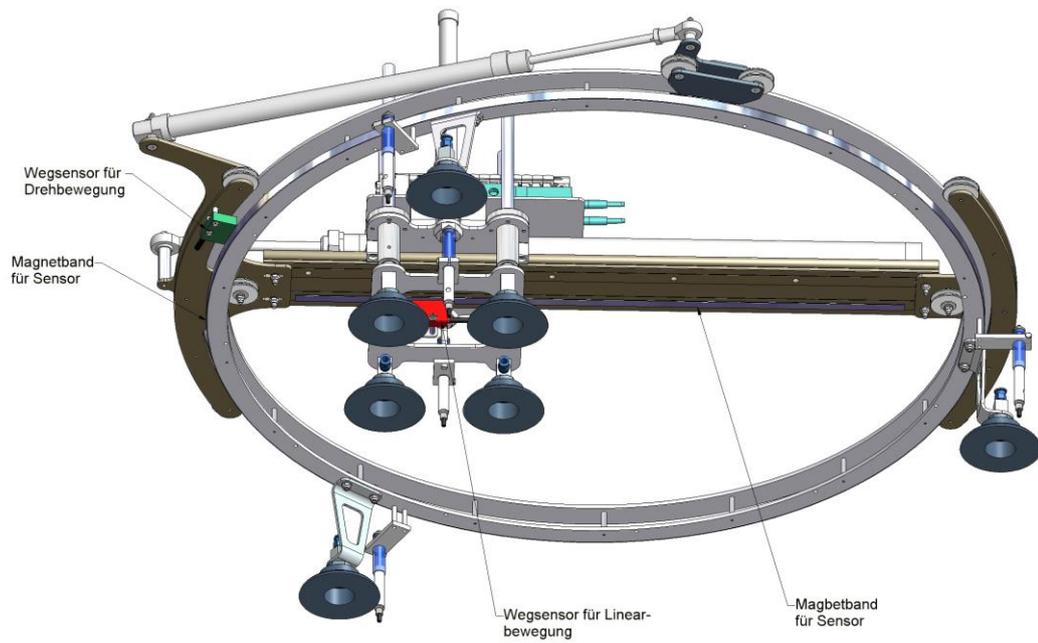


Abb.3.4-2: CAD-Model der Version 1.2, von unten gesehen



Das Grundprinzip, d.h. Ringeinheit kombiniert mit darin drehbarer Brücke mit Linear- und Hubeinheit, wie auch die Hauptabmessungen wurden beibehalten. Neben kleinen Verbesserungen wurden folgende Veränderungen zur Vorversion bezüglich der mechanischen Struktur vorgenommen:

- Die Ringeinheit wurde versteift
- Die Linearführung wurde versteift
- Die Lineareinheit wurde mit einem elektronischen Wegmesssystem ausgestattet.
- Die Dreheinheit wurde mit einem elektronischen Wegmesssystem ausgestattet.
- Die Lineareinheit wurde mit einer pneumatischen Bremse versehen.
- Der Verfahrensweg der Hubeinheit wurde vergrößert.
- Gleitführung der Hubeinheit wurde verbessert
- Für die Linearbewegung wurde ein stärkerer Zylinder gewählt.
- Anstelle der Einzelventile zur Ansteuerung der Zylinder wurde eine sogenannte Ventilinsel gewählt, die zwölf unabhängige Ventile beinhaltet und nur eine Druckluftzuleitung und nur eine Steuerleitung benötigt.
- Implementierung einer Sensorik zur Ermittlung des Bodenkontakts der Saugfüße.
- Die Implementierung der Steuerung wurde vorgenommen.

Die neue Version wurde vollständig als 3D CAD-Modell erstellt und nach Ableitung der nötigen Fertigungszeichnungen und Bereitstellung der nötigen Komponenten gefertigt.

Detaillierte Beschreibung

Eine Zielsetzung der Neukonstruktion war die exakte Positionierbarkeit des Roboters. Dies setzt eine messtechnische Erfassung der Linear-, wie der Drehbewegung voraus. In einem ersten Schritt wurde durch die Implementierung des Wegmesssystems (Induktives Verfahren realisiert durch Magnetsensor und Magnetband) die Linearbewegung erfasst. Der Magnetsensor wurde am Schlitten das abzulesende Band an der Linearführung befestigt. Das System besitzt eine Messgenauigkeit von +/- 1 mm. Das System konnte dann problemlos auf die Drehbewegung übertragen werden. Als aktives Element einer solchen Positionssteuerung ist eine Bremse nötig die den Schlitten in der gewünschten Position hält.

Es stellte sich durchaus als Herausforderung dar, einen an sich „digitalen“ Antrieb wie den eines doppelwirkenden Pneumatikzylinders, der zunächst bei einfacher Ansteuerung nur die Zustände „ganz ausgefahren“ und „ganz eingefahren“ kennt, an



beliebigen Positionen dazwischen fest stehen zu lassen, ihn also die Positioneigenschaften eines Schrittmotors zu geben. Es sind am Markt positionierbare Pneumatikeinheiten erhältlich, jedoch sind diese aufgrund ihres Gewichtes nicht für die vorliegende Anwendung geeignet. Die Positionserkennung erlaubte nun, Position und damit Geschwindigkeit und Beschleunigung der Linearbewegung zu erfassen und diese Informationen dann zur Positionsteuerung zu nutzen. Es zeigte sich, dass die Informationen des Positionssensors auch nützlich bezüglich der Optimierung des dynamischen Verhaltens des Roboters waren.

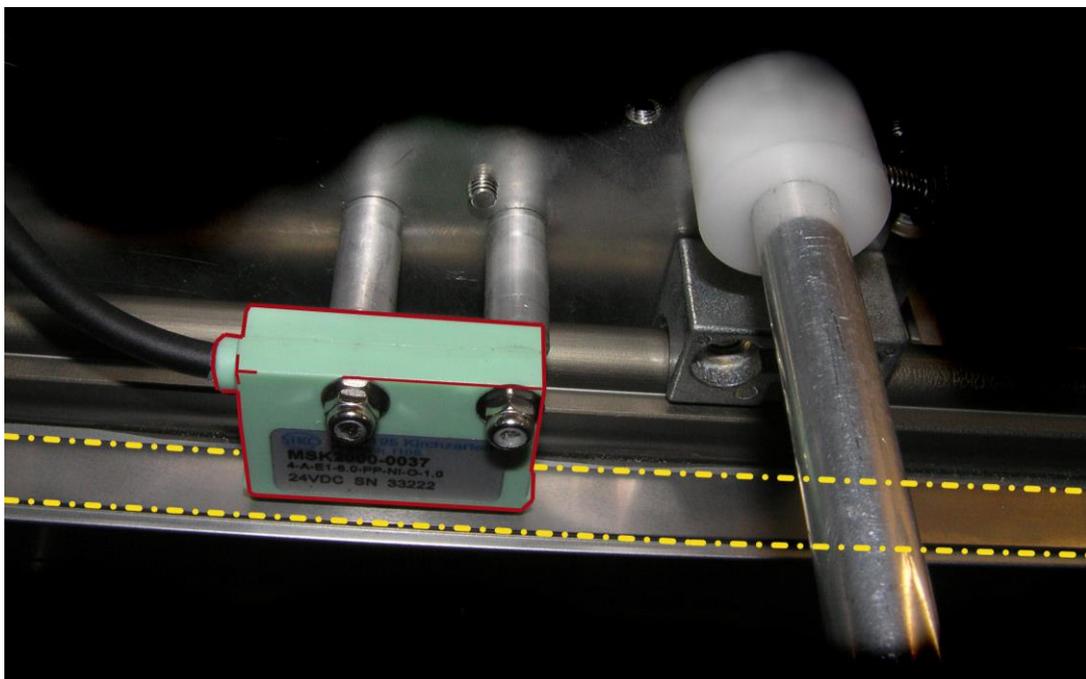


Abb.3.4-3: Positionserfassung der Lineareinheit. Gelb umrandet ist das Magnetband zu erkennen, rot umrandet der Magnetsensor. (Quelle: Idaswind GmbH)

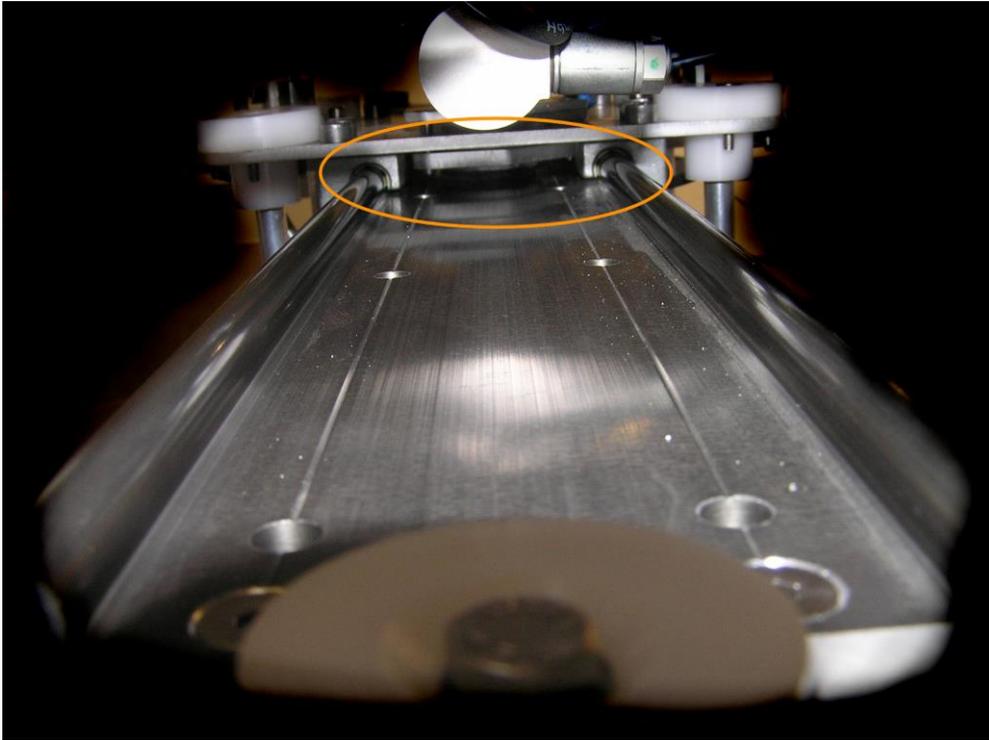


Abb.3.4-4: Pneumatische Bremse der Lineareinheit. Als Bremsfläche dient die Linearführung. Weiterhin sind die Gleitbuchsen der Linearführung zu erkennen. (Quelle : Idaswind GmbH)

Um die Toleranz der Saugfüße gegenüber gekrümmten Flächen zu erhöhen, wurden andere Saugfußtypen für die Ringeinheit ausgewählt. Der doppelt gefaltete Saugfuß soll eine verbesserte Anpassung an die Fläche erzielen bei annähernd gleicher Haftkraft und Stabilität im angesaugten Zustand.

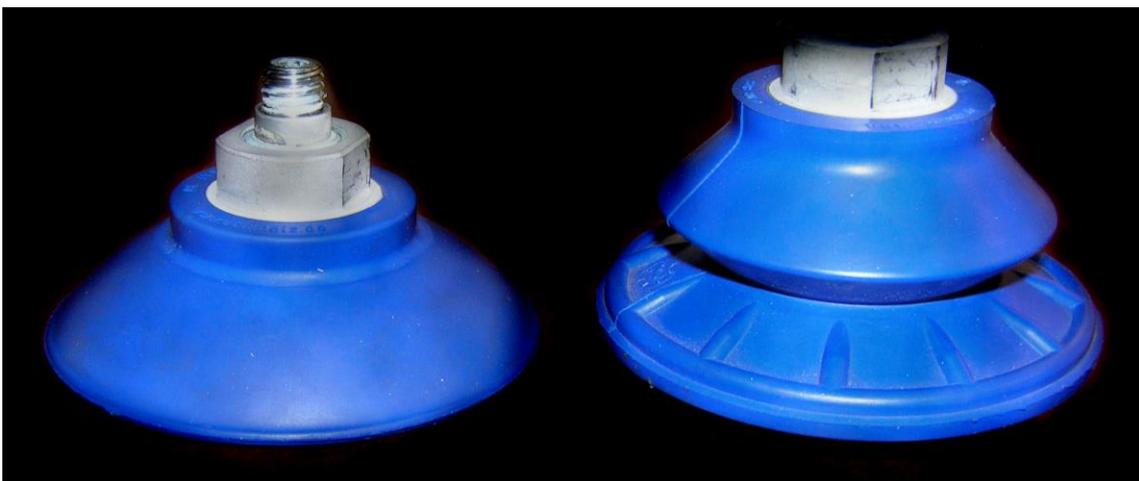
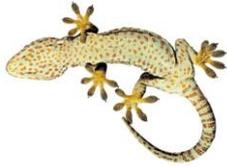


Abb.3.4-5: Zwei Saugfüße der Firma Schmalz. Der linke Saugfuß stellt die steifere Ausführung dar und wurde für die Innere Saugfüßeinheit verwendet. Der rechte Saugfuß ist durch die Faltung flexibler und passt sich dadurch besser an gekrümmte oder geneigte Oberflächen an. Er wurde für die äußere Saugfüßeinheit verwendet. (Quelle: Idaswind GmbH)



Die in der Vorversion benutzten Einzelmagnetventile wurden zugunsten einer Ventilinsel bestehend aus zwölf 5/3- bzw. 3/2- Wege Ventilen mit gemeinsamer Druckluftversorgung und gemeinsamer Steuerleitung (RS232-Anschluss) ersetzt. Diese Maßnahme diente der Gewichtsreduktion, der Vereinfachung der Verkablung sowie der Vereinfachung der Druckluftzuleitungen. Zudem war nun eine ausreichende Anzahl an Ventilen vorhanden, um weitere Zylinder zu steuern, wie den geplanten Zylinder für die Bremsung der Drehbewegung. Die Ventilinsel wurde über ein einziges Datenkabel direkt mit der unten beschriebenen Steuerung verbunden.

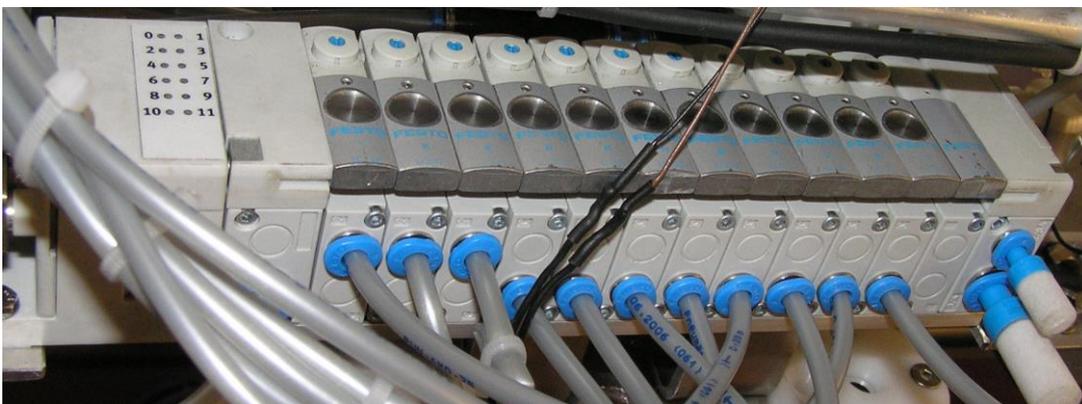


Abb.3.4-6: Ventilinsel mit 12 integrierten Ventilen und RS232 Verbindung von FESTO
(Quelle : Idaswind GmbH)

Der Bodenkontaktschalter soll dem Controller mitteilen welcher Saugfußkreis kompletten Bodenkontakt (d.h. alle Saugfüße eines Kreises liegen auf) besitzt. Erst dann darf ein Evakuierungsversuch unternommen werden. Der Bodenkontaktschalter kann auch zur Erkennung der Ränder der Untersuchungsfläche dienen. Die Aufgabe wurde zunächst durch einen einfachen mechanischen Taster gelöst. Der Taster ist in der Höhe justierbar. Berührt der Taster die Oberfläche so wird der federbelastete Tastknopf eingedrückt und schaltet durch. Da bei der nachfolgenden Evakuierung die Saugfüße weiter komprimiert werden, müssen die Taster ausweichen können. Daher war die Konstruktion eines federbelasteten Teleskops nötig. Es wurden an jeden Saugfuß der Ringeinheit je eine sowie an die Saugfüßeinheit der Brücke zwei Tastereinheiten angebracht. Die Taster jedes Saugkreises wurden in Reihe geschaltet, so dass der Controller nur dann das Signal „Saugkreis 1 hat Bodenkontakt“ erhält, wenn wirklich alle drei Saugfüße auch Bodenkontakt haben. Mit dieser Neuerung wurde ausgeschlossen, dass Ansaugversuche unternommen wurden, die aufgrund fehlenden Bodenkontakts der Saugfüße nicht sinnvoll sein können. Die Bodenkontaktschalter sollen eine Erhöhung der Robotergeschwindigkeit und eine Steigerung der Sicherheit des Roboters bewirken.

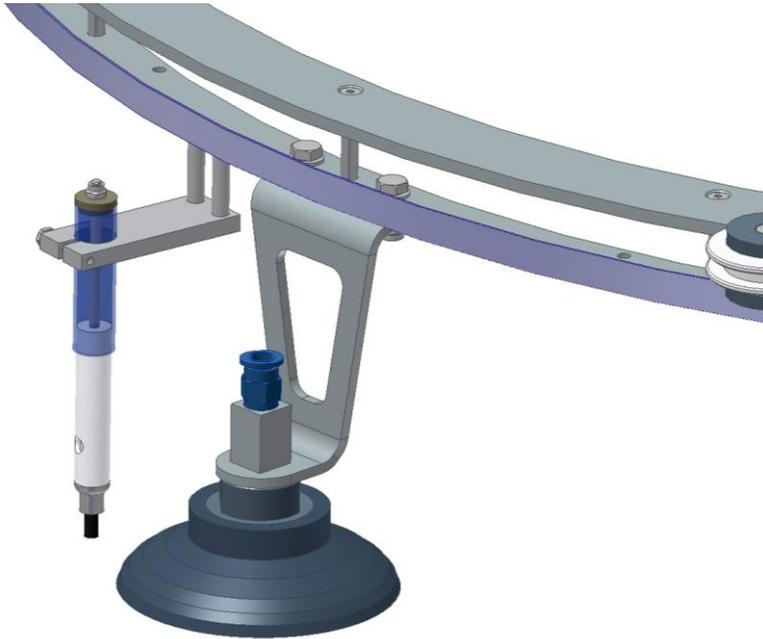


Abb.3.4-7: CAD-Model der höhenverstellbaren Tastereinheit, die Feder des Teleskops ist nicht dargestellt.
(Quelle: Idaswind GmbH)

Um beliebige Drehwinkel realisieren zu können, wurde die Brücke gegenüber der Ringeinheit mit einer Pneumatikbremse versehen sowie das induktive Wegmesssystem auch auf die Drehbewegung übertragen.

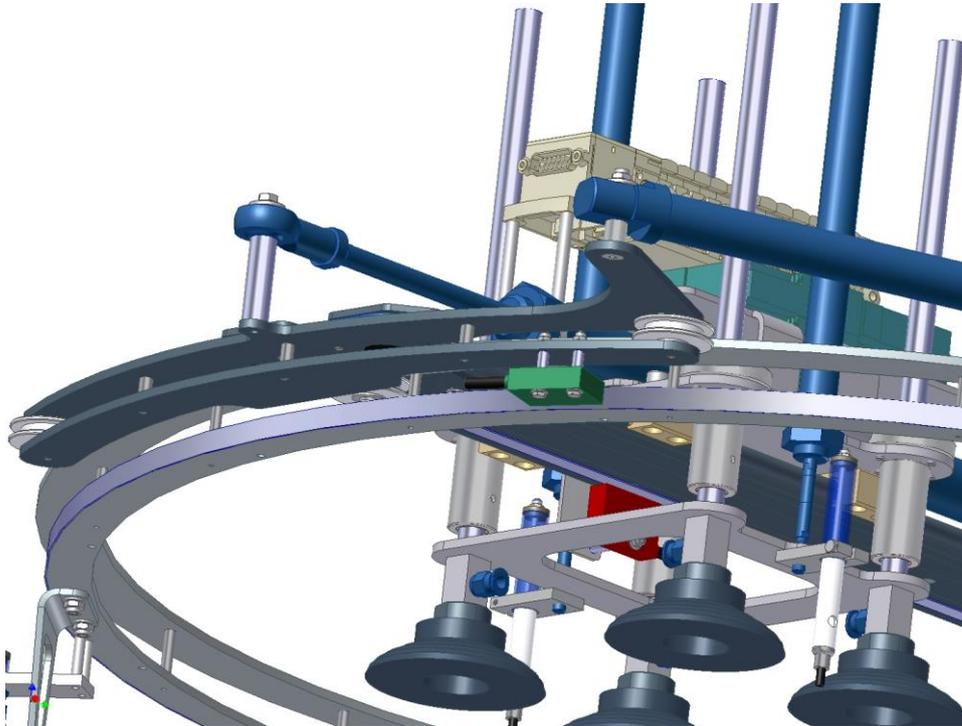


Abb.3.4.8: CAD-Model des Roboters, sichtbar ist die Drehmechanik sowie die Winkelmessung mittels Inkrementalgeber und Magnetband. (Quelle: Idaswind GmbH)

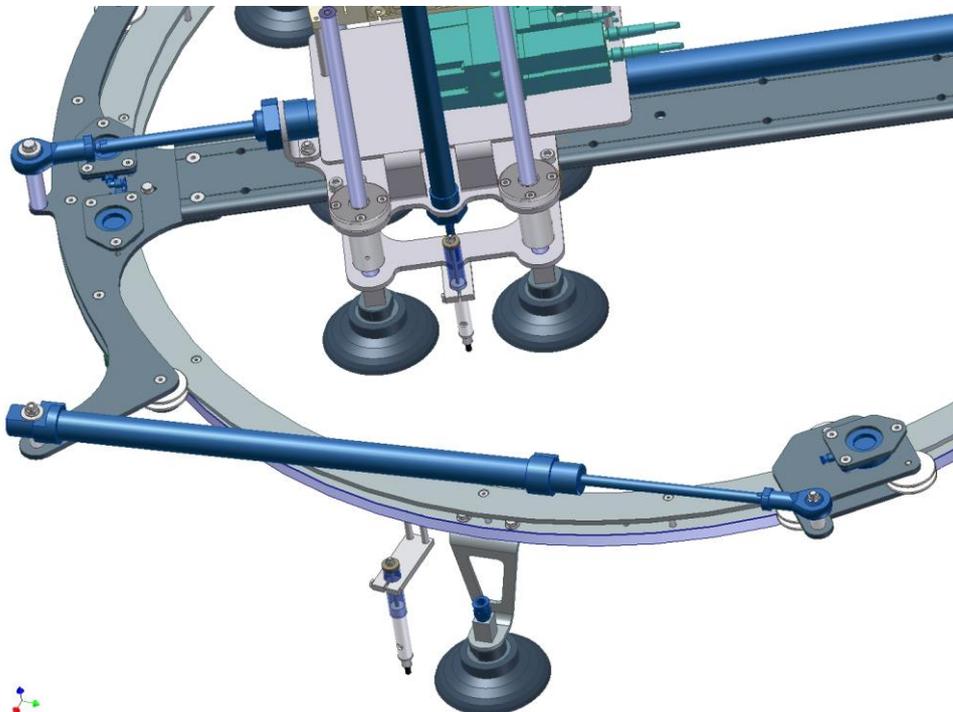


Abb.3.4.-9: CAD-Model des Roboters, sichtbar ist die Bremse der Dreheinheit sowie der Hilfsschlitten, der ebenfalls mit pneumatischer Bremse ausgerüstet ist, um das unten beschriebene Umsetzen zu ermöglichen. (Quelle: Idaswind GmbH)



Um die Vergrößerung des maximalen Drehwinkels zu erreichen, wurde der feste Lagerpunkt des Pneumatikzylinders an der Ringeinheit durch einen, mittels einer Pneumatikbremse arretierbaren, verschiebbaren Lagerpunkt in Form eines Schlittens ersetzt. Der auf der Ringeinheit laufende Schlitten besitzt drei mit einer Gleitlagerung ausgerüsteten Führungsrollen aus POM. Die Bremse wurde durch einen Kurzhubzylinder realisiert und wirkt durch das vorgesehene Spiel in Richtung der Achsen der Führungsrollen in der Art einer Schwimmsattelbremse. Dadurch konnte eine Drehbewegung realisiert werden, die aus beliebig vielen maximal 45° großen Teildrehungen zusammengesetzt wird. Es ist nun kein Umsetzen der Saugkreise mehr erforderlich, um eine Drehung um beispielsweise 360° zu ermöglichen. Man kann sich die nun mögliche Drehbewegung analog zum Drehen eines Lenkrades vorstellen: Die rechte Hand dreht das Lenkrad um einen bestimmten Winkel, dann hält die linke Hand das Lenkrad fest, damit die rechte wieder am Lenkrad zurück gleiten kann, um den nächsten Drehzyklus zu beginnen.

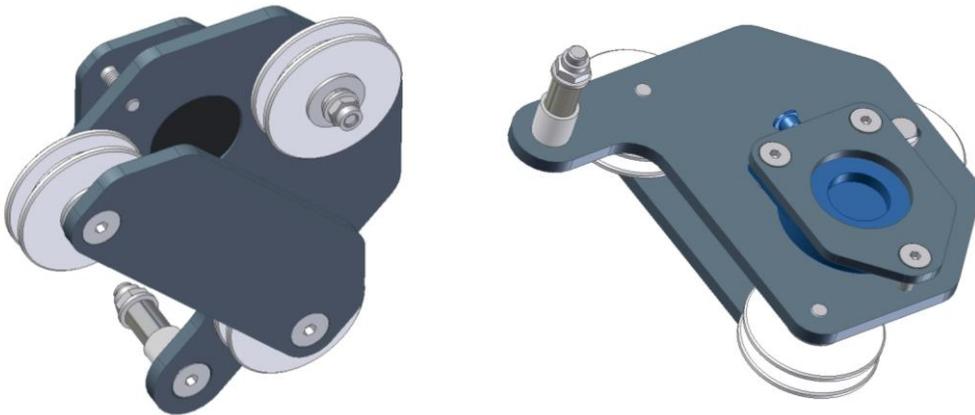


Abb.3.4-10.: Schlitten auf Ringeinheit laufend. Ausgerüstet mit Führungsrollen und Pneumatikbremse.
(Quelle: Idaswind GmbH)

Die Drehbewegung des Roboters setzen sich nun aus den folgenden Einzelaktionen zusammen:

Annahme: Roboter steht auf den Saugfüßen der Ringeinheit, Bremse der Brücke ist betätigt, Zylinder für Drehbewegung ist eingefahren.

1. Zylinder für Drehbewegung ausfahren und damit den Schlitten auf der Ringeinheit verschieben.
2. Bremse des Schlittens aktivieren



3. Bremse der Brücke lösen
4. Zylinder einfahren, wodurch sich die Brücke dreht.
5. Bremse der Brücke aktivieren
6. Bremse des Schlittens lösen

Ein Wiederholen dieses Zyklus ergibt eine Drehbewegung beliebigen Winkels, ohne dass ein Umsetzen der Saugfußkreise nötig wird. Begrenzt wird die Drehbewegung nur durch die maximal zulässige Verdrehung der Zuleitungen (360°).

3.5. Steuerung – Hardware und Software (AP 8)

Die Steuerung sowie die dazugehörige Software wurde nach vereinbarter Spezifikation in Zusammenarbeit mit der Firma Naventics entwickelt. Ziel war es in der ersten Stufe die Steuerkommandos von einem feststehenden Steuergerät (wie z.B. Laptop) aus über ein Datenkabel zu einem Controller an Bord des Roboters zu senden. Der Controller ist mit einem programmierbaren Mikroprozessor ausgestattet und besitzt 15 digitale Signalausgänge zur Ansteuerung der Pneumatikzylinder und möglicher anderer Aktuatoren sowie 20 digitale und 5 analoge Signaleingänge zur Erfassung der nötigen Sensordaten wie Druckniveau der Vakuumkreise, Bodenkontaktabfrage, etc. Die Anzahl der verfügbaren Ein-/und Ausgänge wurde großzügig gewählt, damit spätere Erweiterungen nicht an der mangelnden Leistungsfähigkeit der Steuerung scheitern.

Der Controller hat nun die Aufgabe, die von der Basisstation kommenden Befehle, wie zum Beispiel „Schreite vorwärts“ oder „Drehe nach rechts“, in die dafür nötige Steuersignalfolge umzuwandeln und dabei die nötigen Abfragen (z.B. „Ist das Vakuumniveau erreicht“ oder „Haben alle Saugfüße eines Kreises Bodenkontakt“) zu tätigen. In einem weiteren Schritt wurde dann die Datenleitung zwischen Roboter und Steuergerät durch eine kabellose „Bluetooth“-Verbindung ersetzt. Ziel war es, als einzige materielle Verbindung des Roboters zur Basisstation, eine 8 mm starke Druckluftleitung zu nutzen, um unnötigen Belastung durch Steuer- oder Energiekabel zu vermeiden und so dem Roboter größtmögliche Bewegungsfreiheit zu geben. Das Problem der Zuleitungen wird offensichtlich, wenn man sich vor Augen hält, dass sich bei großen Rotorblättern großer Länge (z.B. 2,5 MW-Anlagen) eine Entfernung von bis zu 50 m zur Basisstation ergibt. Die Windlast auf die Zuleitung stellt eine weitere Belastung des Roboters dar.

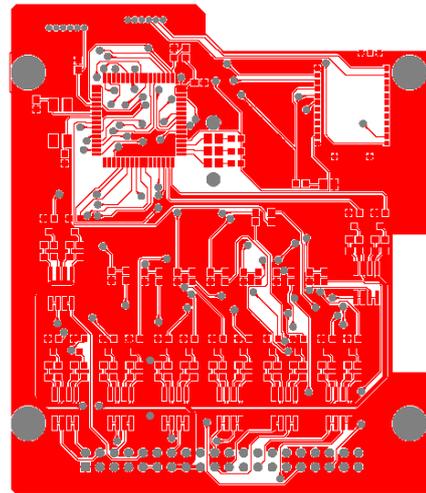
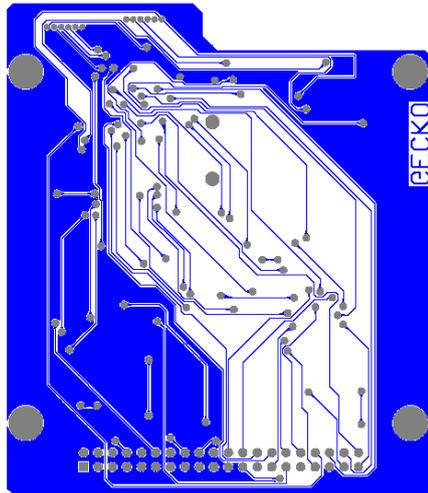


Abb.3.5-1:Platinenlayout des Kontrollers

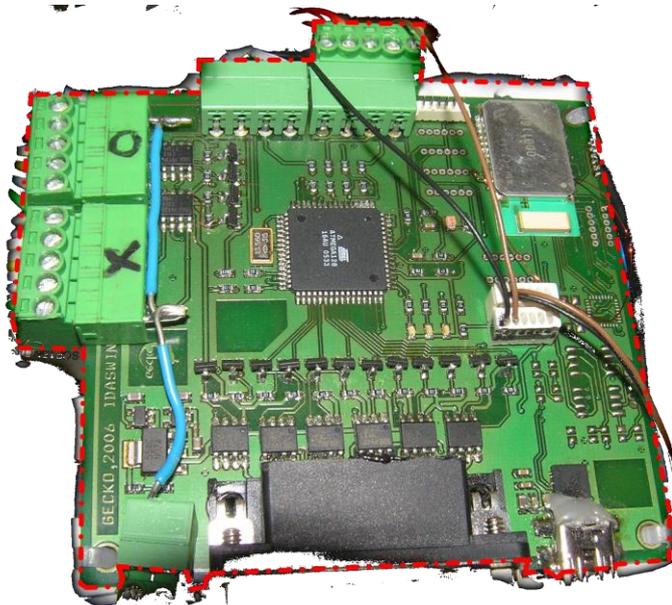


Abb.3.5-2: Von der Firma Naventics GmbH entwickelter Controller. Er beinhaltet einen programmierbaren Mikroprozessor (mitte), ein "Bluetooth"-Modul zur kabellosen Kommunikation mit dem externen Steuergerät wireless (oben rechts) sowie die Terminals der Ein-/Ausgänge (oben links) (Quelle: Idaswind GmbH)



Die nötige Software wurde in der Programmiersprache C++ erstellt. Für das Steuergerät (hier Laptop) wurde eine graphische Benutzeroberfläche geschaffen, die aus vier Registerblättern besteht.

Das Registerblatt *Steuerung* ermöglicht per Mausklick die folgenden Kommandos an den Controller an Bord des Roboters zu senden:

Vorwärtsschreiten um xy mm
Rückwärtsschreiten um xy mm
Rechtsdrehen um xy °
Linksdrehen um xy °
Stop

Bei Aktivierung des Auswahlpunktes „*Schrittweise*“ wird der Befehl nur einmalig ausgeführt, bei Aktivierung des Auswahlpunktes „*Kontinuierlich*“ wird der entsprechende Befehl so lange wiederholt bis der Befehl „*Stop*“ gegeben wird.

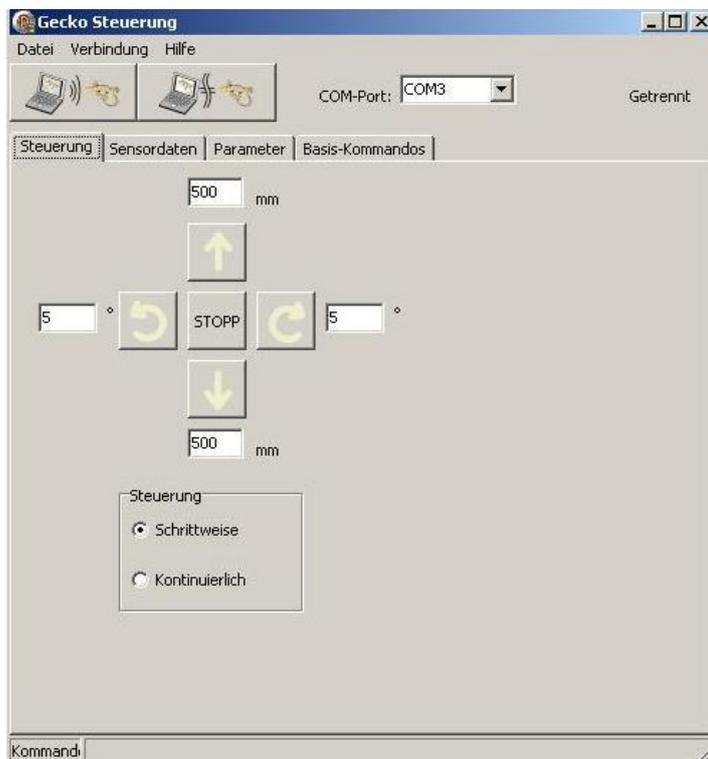


Abb.3.5-3: Graphische Benutzeroberfläche der Robotersteuerung – Registerblatt 1

Das Registerblatt *Sensordaten* gestattet es die Werte der Sensoren sowie die Schaltzustände der Signaleingänge und der Signalausgänge des Roboters abzufragen.



Das Registerblatt *Parameter* dient zur Darstellung und Einstellung verschiedener Parameter. So lassen sich im oberen Feld (*Schlitten Positionierung*) die Start- und Endposition des Schlittens, im mittleren Feld die maximale Geschwindigkeit der Linearbewegung und im unteren Feld verschiedene Verzögerungen (*Timeouts*) zwischen einzelnen Manövern einstellen.

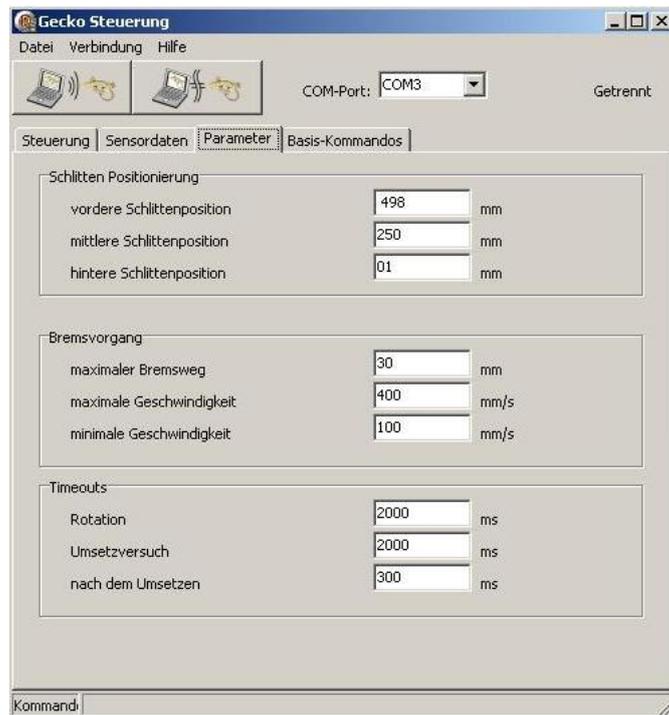


Abb.3.5-4: Graphische Benutzeroberfläche der Robotersteuerung – Registerblatt 3

Das Registerblatt *Basiskommandos* ermöglicht im linken Feld alle mit der Brücke und im rechten Feld alle mit der Ringeinheit verbundenen Basiskommandos auszuführen. Diese Einzelschrittsteuerung erwies sich zu Testzwecken als besonders hilfreich.

Im unteren Feld kann eine Kalibrierfahrt ausgelöst werden oder der Befehl zum endlosen Fortschreiten „*Random Walk*“ gegeben werden. Der Roboter schreitet dann nach dem von einem Zufallsgenerator vorgegebenen Muster fort. Erreicht er den Rand der begangenen Fläche, so wird auf die letzte Position zurückgeschritten und von dort aus ein anderer Weg eingeschlagen.

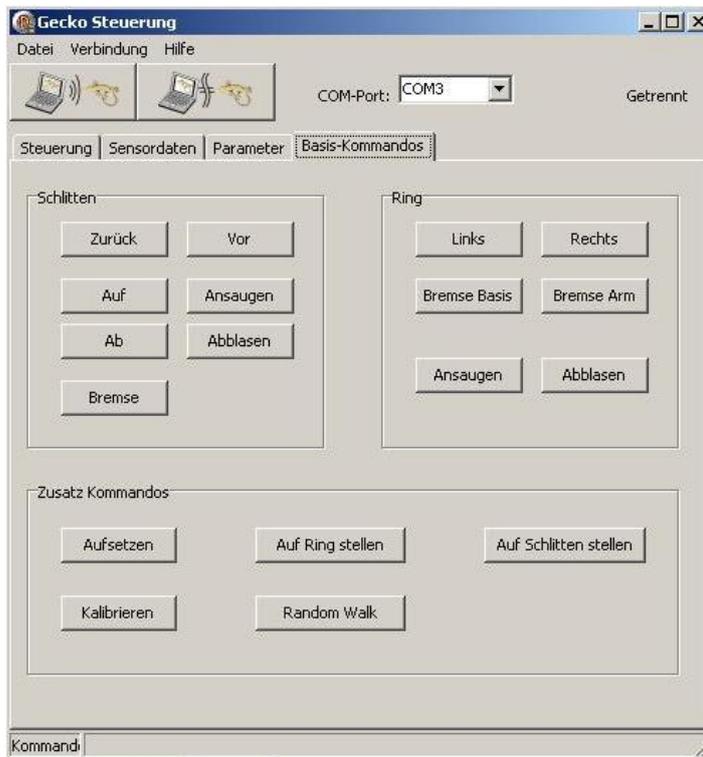


Abb.3.5.5: Graphische Benutzeroberfläche der Robotersteuerung – Registerblatt 4

3.6 Testplattform

Zur Verbesserung der Testbedingungen wurde eine Testplattform konstruiert und verwirklicht. Die Testfläche hat die Abmessungen 2m x 2m und konnte um 360° gedreht werden, so dass alle Neigungen einer zu begehenden Fläche realisiert werden konnten. Im Hinblick auf Messeauftritte oder andere Präsentationen des Robotersystems wurde die Testplattform demontierbar ausgeführt, so dass ein Transport im PKW möglich ist.

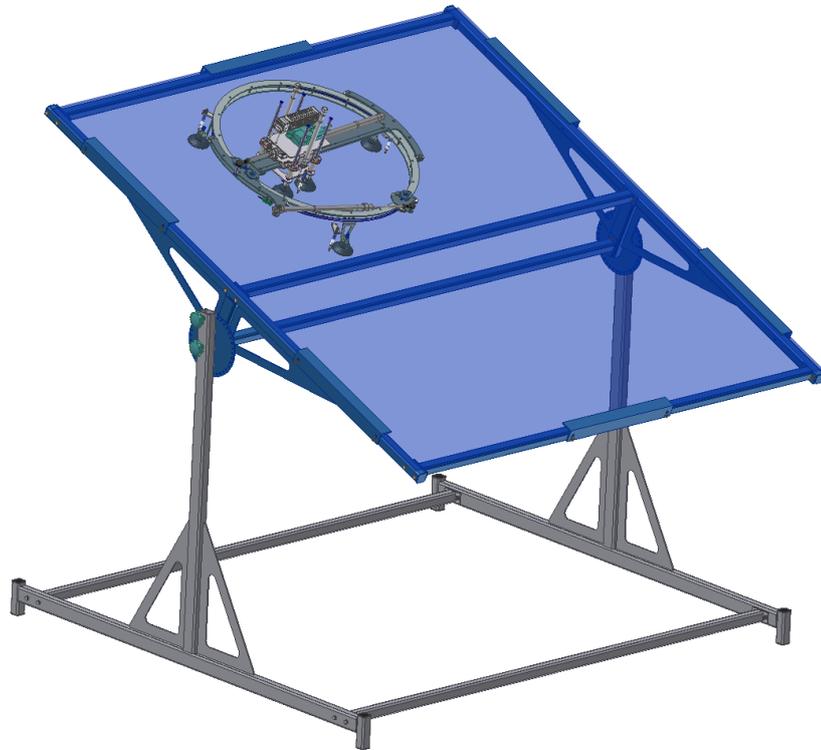


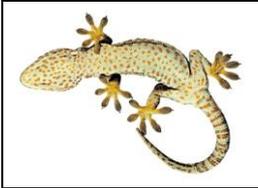
Abb.3.6-1: CAD-Modell der zerlegbaren Testplattform mit winkelverstellbarer Fläche

3.7 Test der Roboterplattform Version 1.2

Die neue Roboterversion wurde auf der neuen Testplattform ausgiebig getestet. Der Roboter wurde hierbei erstmals mit der eigens dafür entwickelten Steuerung betrieben. Die Implementierung der Steuerung erforderte relative viel Zeit und Mühe, da nun eine erhöhte Anzahl von Steuerungsparameter und Signalen zu koordinieren und zu optimieren war.

Die neue Testplattform erlaubte es den Roboter auf einer beliebig geneigten, ebenen Fläche zu betreiben und so den Schwerkrafteinfluss in Abhängigkeit der Lage im Raum zu testen. Hierdurch wurden bisher verborgene Unzulänglichkeiten sichtbar. So zeigte sich, dass unter bestimmten Winkeln aufgrund der Flexibilität des Systems ein sicheres Anpressen aller Saugfüße der Ringeinheit nicht möglich war.

Um die Verfügbarkeit und Robustheit des Roboters im Dauerbetrieb zu testen, wurde softwareseitig ein Algorithmus entwickelt, der ein autonomes Begehen der Testfläche



ermöglicht. Hierzu muss der Roboter in der Lage sein, die Ränder zu erkennen und bei Erreichen eines Randes eine alternative Route begehen. Dies gelang erfolgreich.

Als problematisch stellten sich die, durch das ruckartige Anfahren und Stoppen der Pneumatikzylinder, ausgelösten Vibrationen und Stöße dar. Diese üben auf den gesamten Roboter einen Impuls aus, der letztlich über die Saugfüße auf die Oberfläche abgetragen wird. Auf der perfekten Testfläche ist dies zunächst kein Problem, da die Saugfüße genügend Reserve bezüglich ihrer Haltekraft besitzen. Auf einem von der Oberfläche her nicht perfekten Rotorblatt jedoch ist anzunehmen, dass zu starke Stöße die Sicherheit des Roboters gefährden können. Darüber hinaus führten die Vibrationen nach einem Dauerbetrieb von 60 Minuten auch zu diversen losen Schraubverbindungen am Roboter. Ein sanfter Bewegungsablauf ist natürlich in jedem Fall erstrebenswert.

Version 1.1 des Roboters erlaubte nur Vollschrte bezüglich der Linear- und der Drehbewegung. Version 1.2 zwei konnte nun aufgrund der eingebauten Bremsen bezüglich dieser beiden Bewegungen, sowohl in der linearen Bewegung als auch in der Drehbewegung, beliebig stoppen, d.h. ein Punkt sollte exakt angefahren werden können. Wie exakt dies möglich ist und welche Wiederholgenauigkeit gegeben ist, war ebenfalls Gegenstand der Tests. Es zeigte sich, dass die eingebauten Bremsen sehr robust zgriffen und dadurch ebenfalls zu den unerwünschten Stößen während der Roboterbewegung beitrugen. Hier musste über ein sanfteres Einfallen der Bremsen nachgedacht werden.

Ein weiteres Resultat der Tests an Version 1.2 war die Unzuverlässigkeit der Bodenkontaktsensoren. Die Ursache hierfür lag in der übermäßigen Beanspruchung des verwendeten Tastschalters. Hier sollte über ein alternatives System unter Benutzung eines berührungslos arbeitenden Sensors nachgedacht werden.

Neben den beschriebenen Problemen war es sehr zufriedenstellend, dass der Roboter über 60 Minuten fehlerfrei die Testfläche begehen konnte.

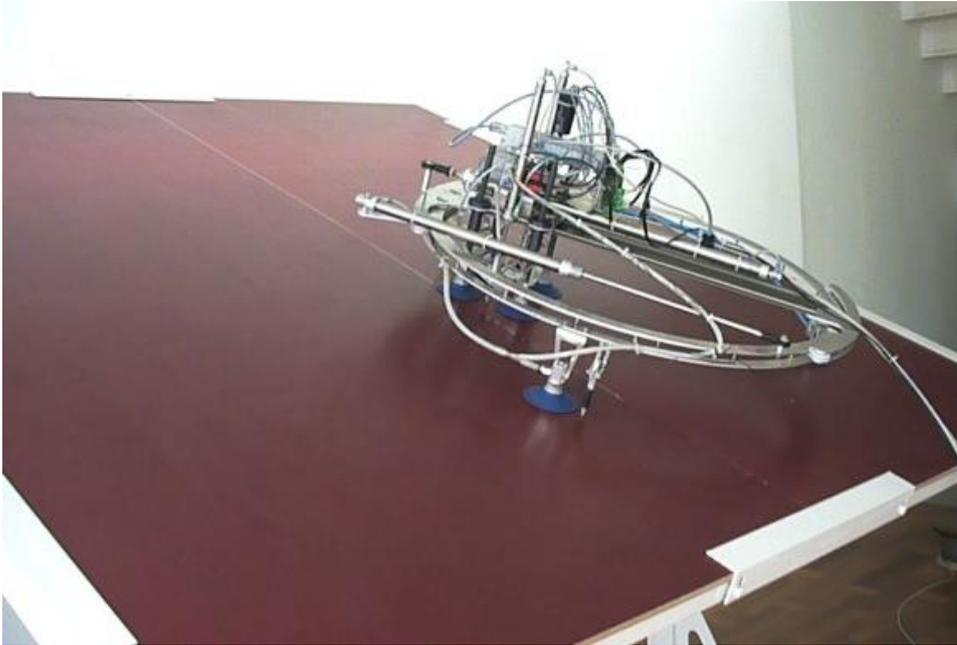
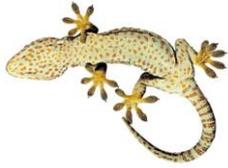


Abb. 3.7-1: Der Roboter während des Tests auf der geeigneten Testfläche (Quelle: Idaswind GmbH)



Abb. 3.7-2: Unter bestimmten Bedingungen zeigte sich, dass die Steifigkeit des Systems höher sein muss. (Quelle: Idaswind GmbH)



3.8 Entwicklung der Roboterplattform Version 1.3

Überarbeitung der Bodenkontaktsensoren

Um die Zuverlässigkeit des Bodenkontaktsensors zu erhöhen, wurden verschiedene Konzepte betrachtet. Am elegantesten schien eine völlig berührungsfreie und mechanikfreie Lösung. Hierzu würden sich optische Positionssensoren anbieten. Es stellte sich jedoch heraus, dass diese Sensoren nur unter immer gleichen optischen Hintergrundbedingungen verlässliche Ergebnisse liefern. Diese sind im geplanten Einsatz des Roboters natürlich nicht gegeben. Ein zweiter Lösungsansatz bestand darin einen berührungsfreien Schaltkontakt, in Form eines induktiven Näherungsschalters zu nutzen, der von einem mechanischen Geber betätigt wird. Die folgenden Bilder zeigen die konstruktiven Ausarbeitungen dieser Bodenkontaktsensoren.



Abb.3.8-1: Bodenkontaktsensor mit federbelasteten Hebel, der einen induktiven Schaltkontakt auslöst.
(Quelle: Idaswind GmbH)



Abb.3.8-2: Bodenkontaktsensor mit federbelasteten Schaltstift, der induktiven Schaltkontakt auslöst.
(Quelle: Idaswind GmbH)

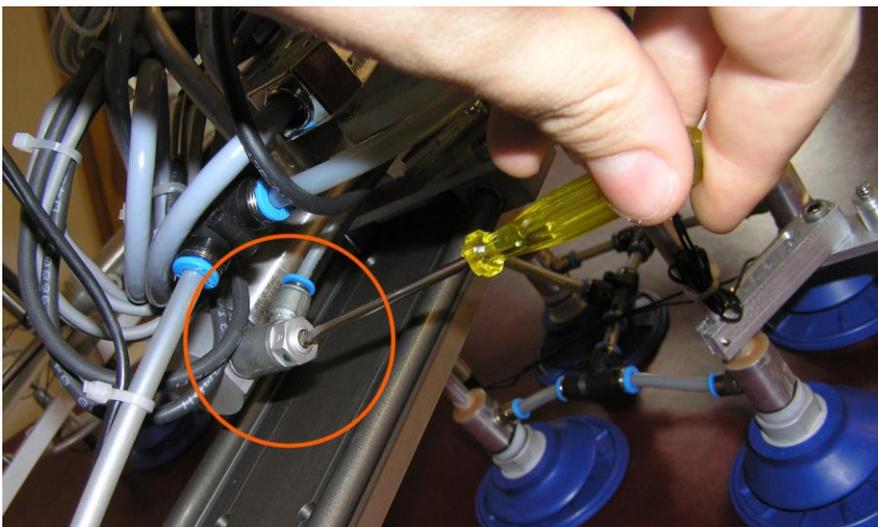


Abb.3.8-3: Einstellen der Drosselventile zur Reduzierung der Zylindergeschwindigkeit.
(Quelle: Idaswind GmbH)

Um einen möglichst stoßfreien Bewegungsablauf des Roboters zu erreichen, wurden folgende Maßnahmen ergriffen:

Die Pneumatikzylinder für die Linear- und Drehbewegung wurden durch Zylinder mit integrierter Endlagendämpfung ersetzt. Diese Zylinder verfügen über eine einstellbare Dämpfung des Kolbens kurz vor dessen Endlagen.



Es wurden Drosselventile in die Pneumatikzuleitungen der Zylinder eingebaut. Dadurch lässt sich die Geschwindigkeit der Zylinder durch Einstellen des Volumenstroms der Druckluft variieren.

Um die durch die Bremsvorgänge bezüglich der Linear- und Drehbewegung verursachten mechanischen Anregungen des Systems zu minimieren, wurde versucht den harten Bremsvorgang, der durch das gleichzeitige Einfallen zweier Bremsen auf hohem Druckniveau verursacht wird, zu entschärfen. Das Bremsen z.B. der Linearbewegung erfolgte nun in folgender Weise: Abhängig von der Geschwindigkeit, die ja aus den Daten des Wegmesssystems errechnet werden kann, wird in einem bestimmten Abstand vor Erreichen des Zielpunktes der erste Bremszylinder aktiviert, um die Geschwindigkeit zu reduzieren. Der zweite Zylinder wurde dann kurz vor Erreichen des Zielpunktes zugeschaltet, um dann bis zum Stillstand zu bremsen. Gleichzeitig wurde der Linearzylinder drucklos geschaltet. Vor beide Bremszylinder wurden Druckminderventile geschaltet, so dass der Bremsdruck der beiden Zylinder unabhängig voneinander einstellbar ist. Hierdurch war es möglich, die Bremsvorgänge weicher zu gestalten. Das Optimum der mannigfaltigen Einstellungsmöglichkeiten zu finden, bedurfte ausgiebiger Tests und verlangte umfangreiche Programmierarbeit. Für die Drehbewegung wurde analog vorgegangen.

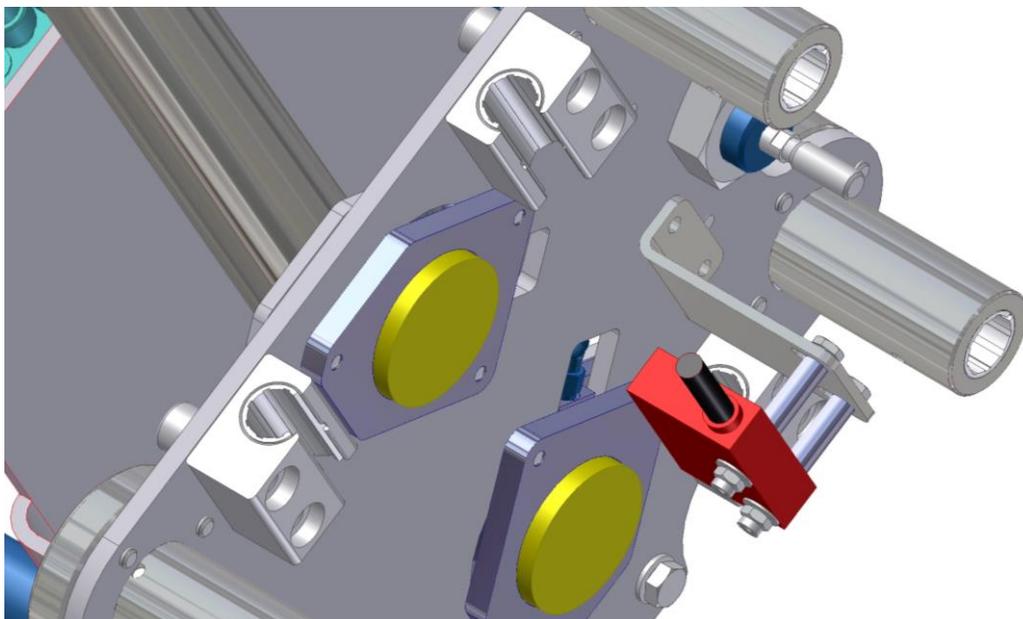


Abb.3.8-4: 3D Model des Schlittens der Lineareinheit, gesehen von unten. Die beiden Bremsen mit den gelb dargestellten Bremsbelägen wirken auf die nicht dargestellte Linearführung. (Quelle: Idaswind GmbH)



Abb.3.8-5: Druckminderventile vor den pneumatischen Bremsen zur Einstellung des Bremsdrucks.
(Quelle : Idaswind GmbH)

Leitungsführung auf dem Roboter

Durch die durch zunehmende Komplexität des Roboters stieg auch die Anzahl der Leitungen zwischen dem Schlitten und den zu versorgenden „Extremitäten“. Zudem wurde durch die Vergrößerung des maximal möglichen Drehwinkels auch die Leitungsführung beeinflusst. Dies führte zu der Notwendigkeit die Leitungsführung auf dem Roboter zu optimieren. Für die Druckluftführung von „stehenden“ zu „drehenden“ Bauteilen wurde eine pneumatische Drehdurchführung eingesetzt. Die Leitungen, welche eine lineare Bewegung ausführen, wurden mit einem Federdraht als Führung versteift.

3.9 Test des Roboterplattform Version 1.3 am Fraunhofer Institut

Nach erfolgreichem Test auf der Testplattform wurde der Roboter auf einem 10 m langen Rotorblattsegment getestet, welches am Wilhelm-Klauditz-Institut zur Verfügung stand. Dieses Rotorblattsegment repräsentierte sowohl von der Oberflächenqualität (Risse, offene Laminatbereiche), als auch von der Geometrie (Krümmung der Oberfläche) die realen Verhältnisse an der Windkraftanlage optimal. Hatte aber den Vorteil, dass es sich auf ebener Erde befand.

Die Tests zeigten eine relativ hohe Empfindlichkeit der verwendeten Saugfüße gegenüber Beschädigungen. Die Fähigkeit das Vakuum auch auf nicht perfekter Oberfläche zu halten war unbefriedigend. Bei kleinen Beschädigungen der Rotorblattoberfläche musste sehr häufig nachevakuiert werden, bei größeren



Beschädigungen konnte mit der vorhandenen Pumpleistung kein ausreichendes Vakuum aufgebaut werden, so dass ein Aufsetzen auf diese Bereiche nicht möglich war. Als Konsequenz hierraus sollten Saugfüße mit weicheren Dichtlippen (Silikon) getestet werden, die in der Lage sind sich den Unebenheiten der Oberfläche besser anzupassen und diese so abzudichten.

Ein weiterer wichtiger Punkt der Tests am Rotorblatt war die Erprobung der Fähigkeit des Roboters, auf gekrümmten Flächen zu schreiten. Das vorhandene Rotorblatt bot alle möglichen Krümmungen, um dies zu testen. Dabei zeigte der Roboter, wie zu erwarten war, mit kleiner werdenden Krümmungsradius zunehmend Schwierigkeiten sich an der gekrümmten Fläche anzusaugen. Diese Schwierigkeiten ergaben sich vor allem beim Ansaugen der Saugfüße der Ringeinheit, d.h. beim Umsetzen vom Schlitten auf die Ringeinheit. Dies resultiert zum einen aus der Tatsache, dass sich auf einer nicht regelmäßig gekrümmten Fläche die Saugfüße der Ringeinheit (ausgehend von der Situation: Roboter steht auf den Saugfüßen des Schlittens) in verschiedenen Abständen zu der Oberfläche befinden, die Hubeinheit aber zentral den Ring als Ganzes verschiebt. So kommt es zu Situationen in denen bereits ein oder zwei Saugfüße der Ringeinheit die Rotorblattoberfläche berühren, der dritte aber keinen Kontakt hat. Zur Lösung dieses Problems wäre eine Änderung des vorhandenen Hubsystems nötig.

Bei der Erprobung auf gekrümmter Fläche ergab sich weiterhin die Situation, dass die Saugfußebene nicht parallel zur gedachten Tangentialebene der Rotorblattfläche am Berührungspunkt war und somit ein Klaffen des Saugfußes gegenüber der Oberfläche auftrat. Eine Lösung dieses Problems könnte durch die Einführung einer gelenkigen Aufhängung des Saugfußes und/oder durch die Nutzung flexiblerer Saugfüße erreicht werden.



3.10 Entwicklung der Roboterplattform Version 1.4

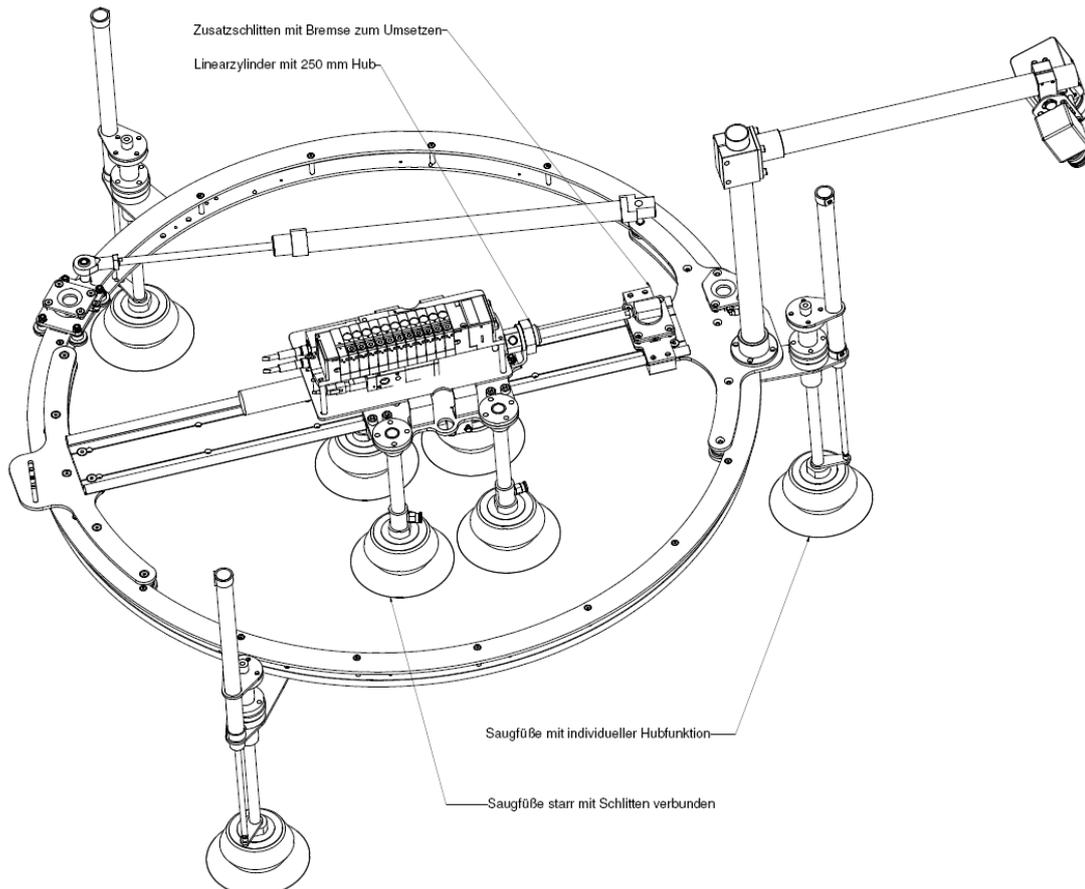


Abb.3.10-1: Version1.4

Neues mechanisches Design

Basierend auf den vorhergehenden Testergebnissen wurde ein weiterer Entwicklungsschritt getätigt, dessen Hauptziel in der Verbesserung der Roboterbewegung bezüglich gekrümmter Flächen bestand. Aufgrund der Geometrie des Rotorblattes ist es unerlässlich, dass der Roboter sowohl positiv als auch negativ gekrümmte Flächen möglichst starker Krümmung begehen kann. Die bisherige starre Anordnung der Saugfüße auf der Ringeinheit wurde überdacht.



Das neue Konzept sieht nun vor, dass die Saugfüße der Ringeinheit jeweils unabhängig von je einem Hubzylinder bewegt werden. Jeder Saugfuß erhält eine eigene Linearführung. Dies soll den Roboter in die Lage versetzen, die Saugfüße der Ringeinheit zuverlässig auf die Blattoberfläche aufzusetzen, auch wenn diese krümmungsbedingt verschiedene Abstände zu dem jeweiligen Saugfuß aufweist.

Um Neigungsfehler zwischen Saugfuß und Blattoberfläche auszugleichen, wurden Saugfüße mit Faltung eingesetzt. Weiterhin wurde die Anbindung der Hubeinheiten der Ringeinheit flexibel ausgeführt.

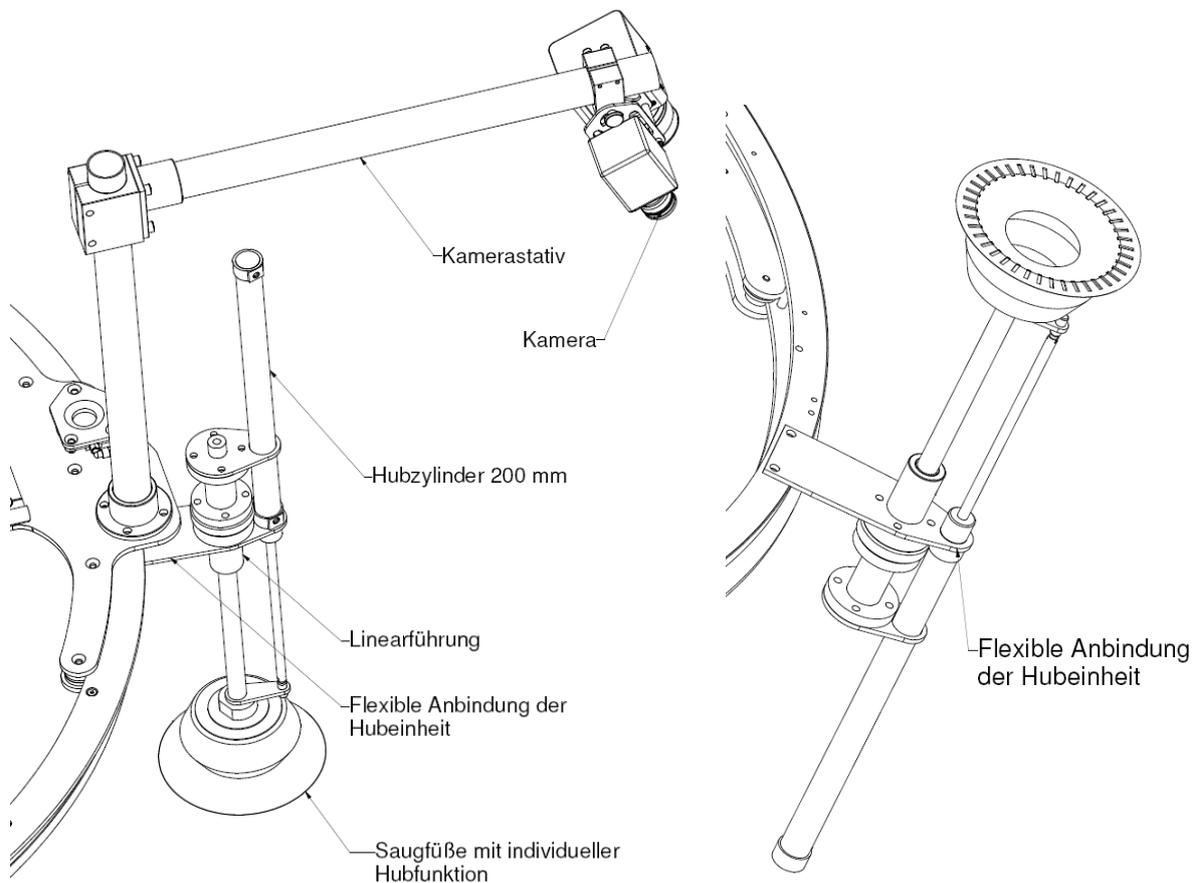


Abb.3.10-2: Saugfuß mit unabhängiger Hubeinheit am Außenring.

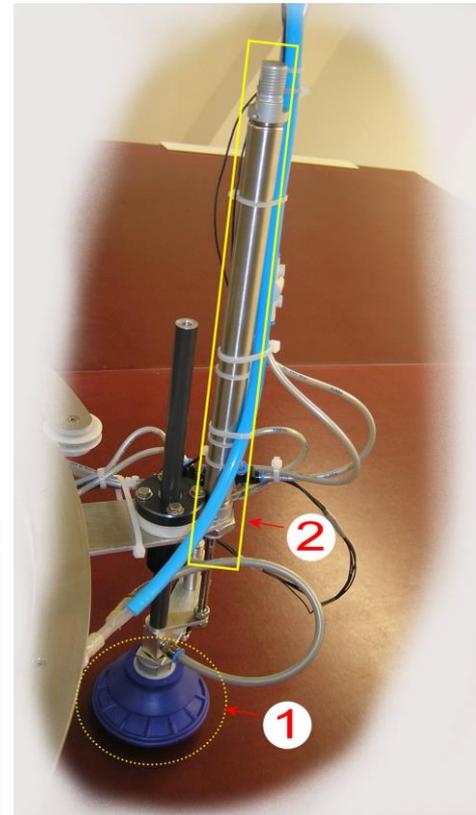
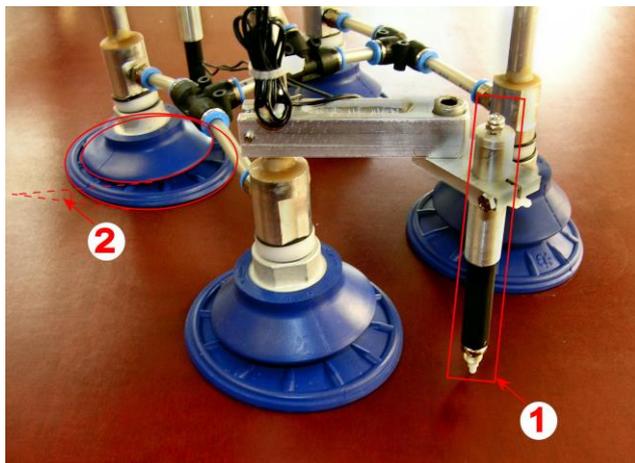


Abb.3.10-3: Links – Feststehende Saugfüße (2) mit Faltung zur Erhöhung der Toleranz gegen Winkelfehler zwischen Saugfuß und Oberfläche. (1) höhenverstellbarer Bodenkontaktschalter. Rechts – Hubeinheit am Außenring (Quelle: Idaswind GmbH)

Die bisherige Hubeinheit der Saugfüße des Schlittens dagegen wurde entfernt, die Saugfüße also starr mit dem Schlitten verbunden. Im Ergebnis wurde die Hubaufgabe vom Schlitten auf die Ringeinheit verlagert.

Diese Maßnahme erzwang jedoch bezüglich der Linearführung eine weitere komplizierte Änderung:

Durch die nun nach oben ragenden Zylinder der drei unabhängigen Hubeinheiten des Ringsystems war für den Linearzylinder die Möglichkeit genommen, im ausgefahrenen Zustand über den Ring hinauszuragen. Bei Drehung ergibt sich ansonsten eine Kollision mit den Hubzylindern. Die Lösung bestand in Einbau eines verkürzten Zylinders (250 mm statt 500 mm Hub). Um dennoch den maximal möglichen Weg von 500 mm zu nutzen, wurde ein Hilfsschlitten mit pneumatischer Bremse eingeführt, der ein „Umsetzen“ analog zu der oben beschriebenen Lösung für die Drehbewegung ermöglicht.

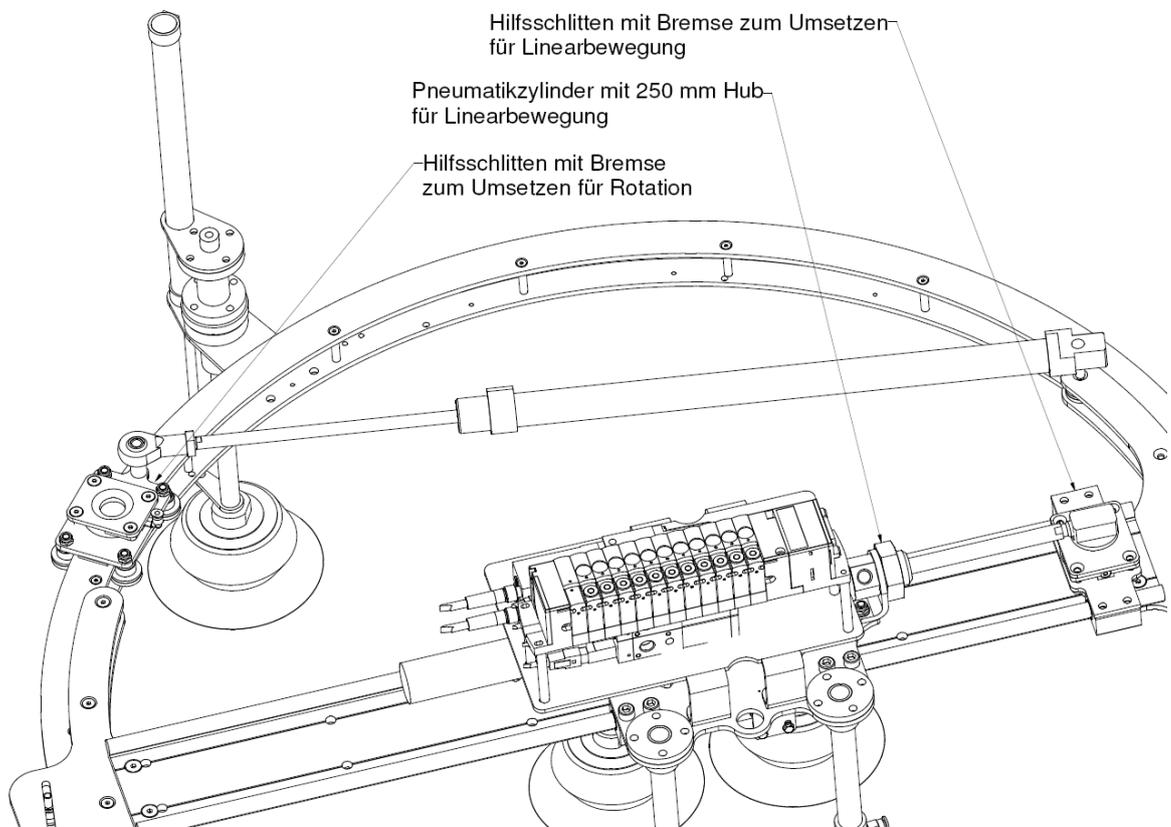


Abb.3.10-4: Darstellung der Hilfsschlitten für Rotation und Linearbewegung

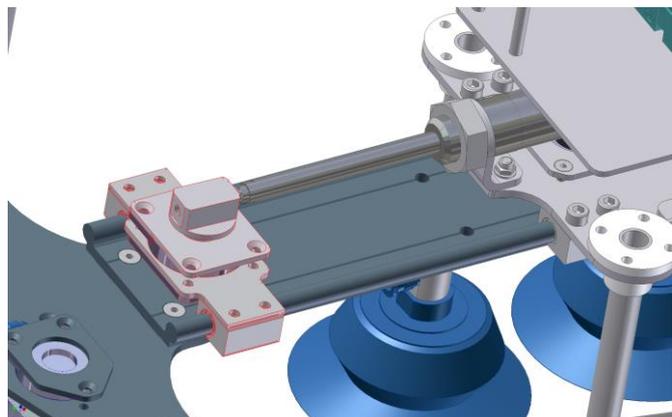
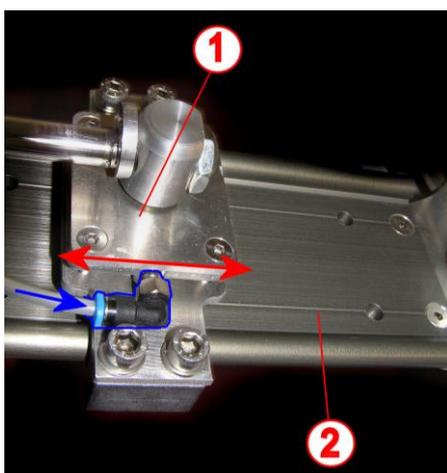
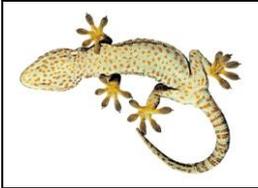


Abb.3.10-5: Links – Reale Ausführung des Hilfsschlittens mit pneumatischer Bremse
Rechts – CAD-Modell (Quelle: Idaswind GmbH)



Der Bewegungsablauf für die Linearbewegung ist wie folgt:

Annahme: Roboter steht auf den Saugfüßen der Ringeinheit, Schlitten ist in rechter Endposition. Schlitten soll in linke Endposition:

1. Die Bremse des Hilfsschlittens wird aktiviert.
2. Die Bremse des Schlittens wird gelöst.
3. Der Zylinder für Linearbewegung wird maximal (250 mm) ausgefahren, so dass sich der Schlitten ungefähr in der Mitte der Lineareinheit befindet.
4. Die Bremse des Schlittens wird aktiviert.
5. Die Bremse des Hilfsschlittens wird gelöst.
6. Der Zylinder wird komplett eingefahren, wobei sich der Zusatzschlitten verschiebt, der Schlitten aber stehen bleibt.
7. Die Bremse des Hilfsschlittens wird aktiviert.
8. Die Bremse des Schlittens wird gelöst.
9. Der Zylinder für Linearbewegung wird maximal (250 mm) ausgefahren, so dass sich der Schlitten am Ende der Lineareinheit befindet.

Diese Verkomplizierung der Linearbewegung war der Preis für die Verlegung der Hubfunktion auf die Ringeinheit. Es bedeutet einen weiteren Schlitten mit Bremse in den Bewegungsablauf zu integrieren.

Verkompliziert hat sich damit auch die Zuleitungssituation, die Anzahl der Leitungsverbindungen zwischen zueinander drehenden, bzw. sich linear bewegenden Elementen ist gestiegen.

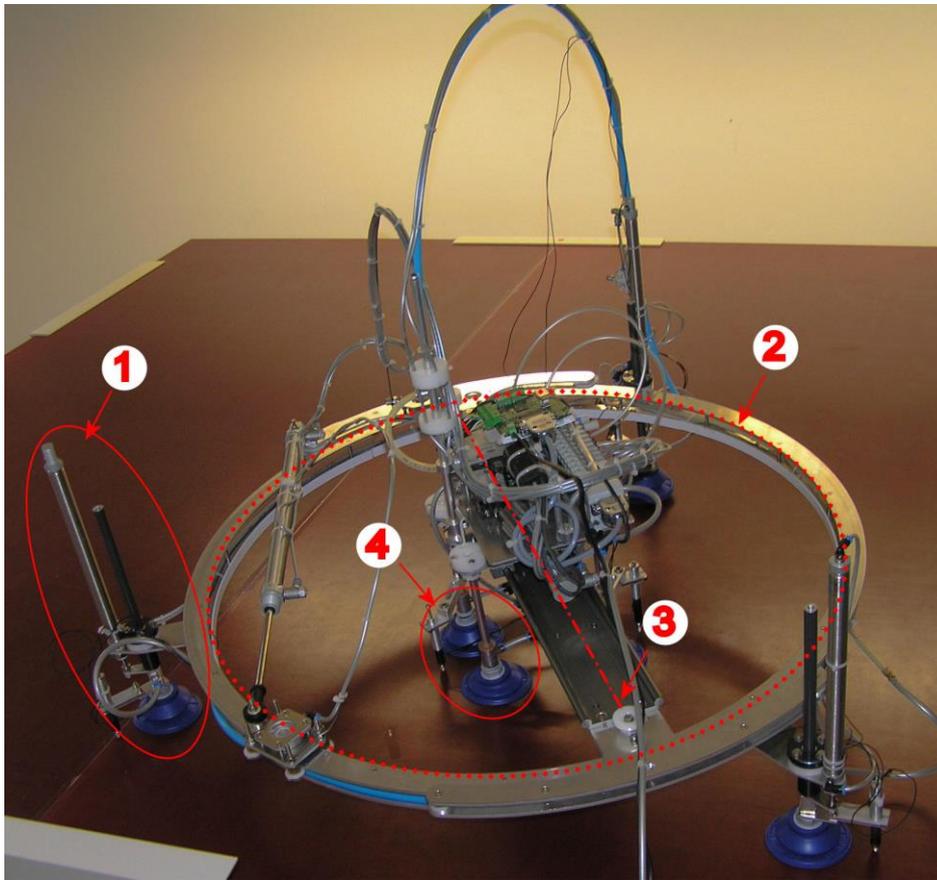


Abb.3.10-6: Fertiggestellte Version des Roboters. (Quelle: Idaswind GmbH)

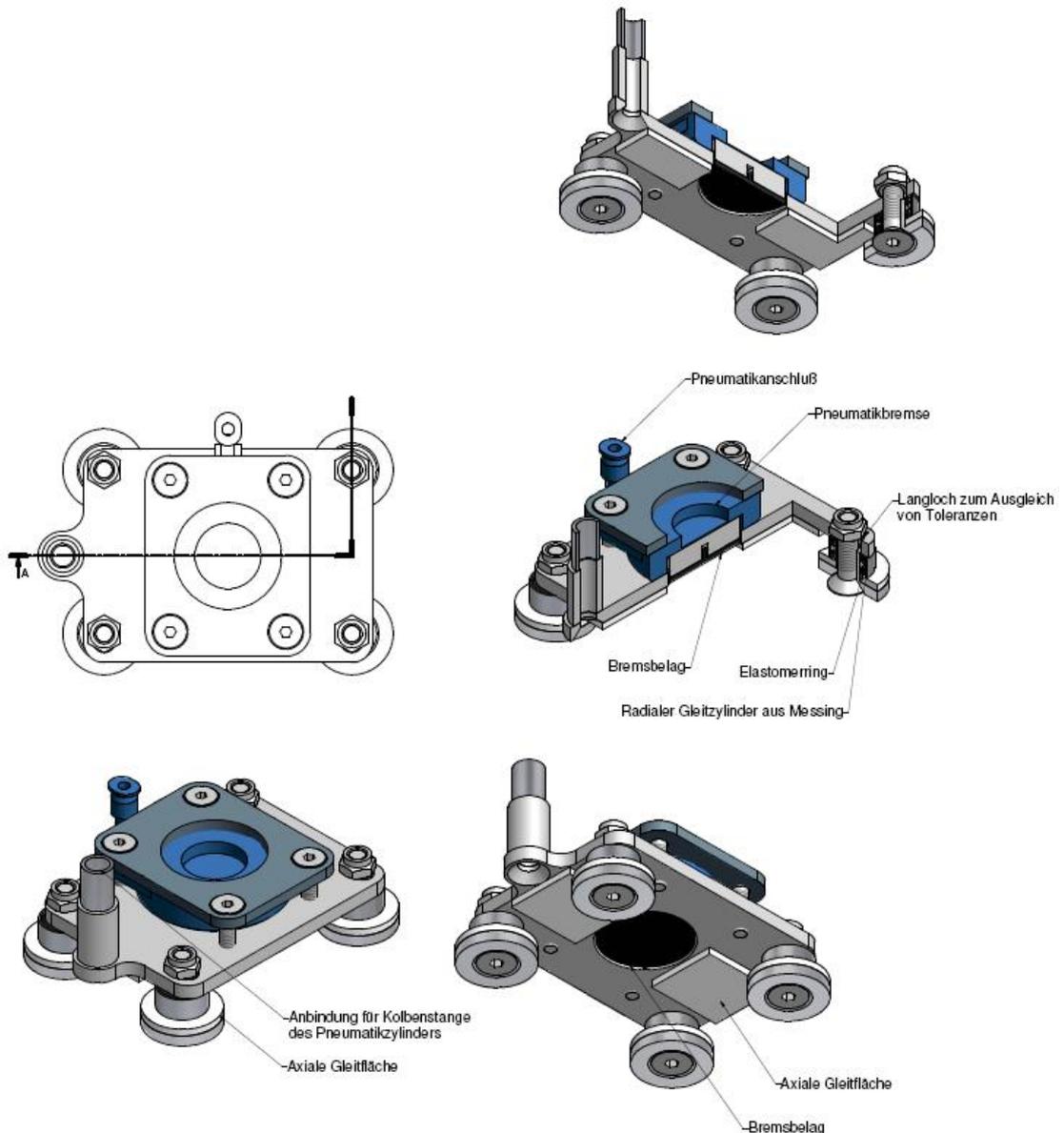
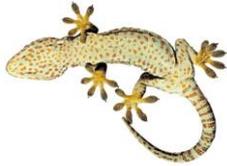


Abb.3.10-7: CAD-Modell des modifizierten Hilfsschlittens für die Drehbewegung

In der Version 1.0 – 1.3 des Roboters wurde sowohl die Lagerung der Brücke in der Ringeinheit als auch die Lagerung des Hilfsschlittens für die Drehbewegung durch Rollen realisiert. Um die Anzahl beweglicher Teile zu reduzieren, wurde in Version 1.4 auf eine Gleitlagerung umgestellt. Hierzu wurden die bisherigen Rollen durch elastisch gelagerte Messinghülsen ersetzt. Diese gleiten entlang des oberen Rings der Ringeinheit. Kleine Unebenheiten in der Ringkontur werden durch die elastische Lagerung abgefangen.

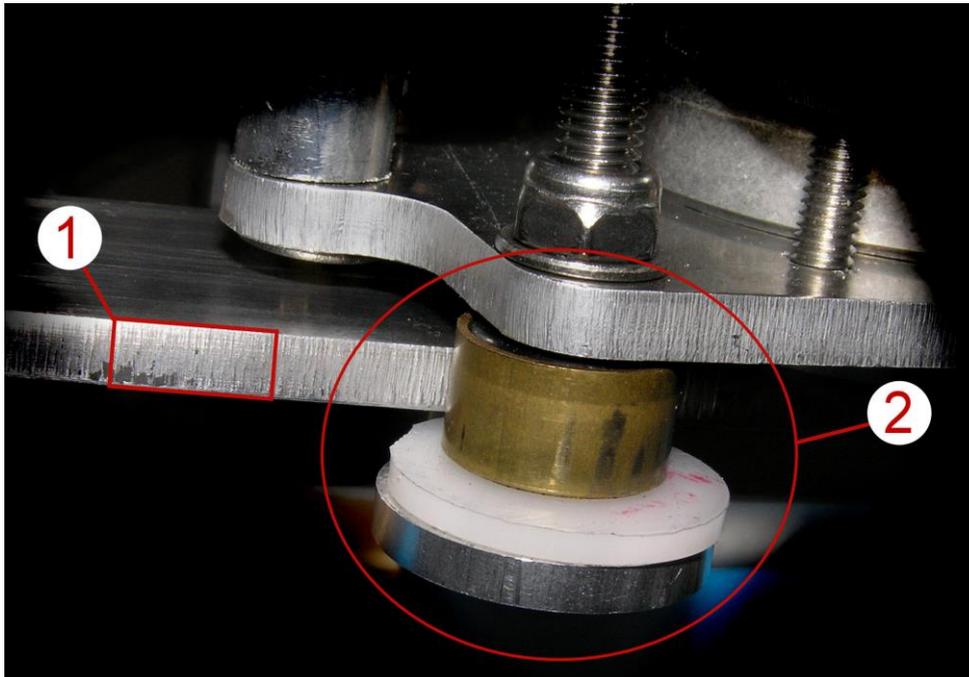


Abb.3.10-8: Kleine Unebenheiten (1) an der Gleitfläche des Rings werden durch die elastische Lagerung der Messinghülse (2) abgefangen (Quelle: Idaswind GmbH)

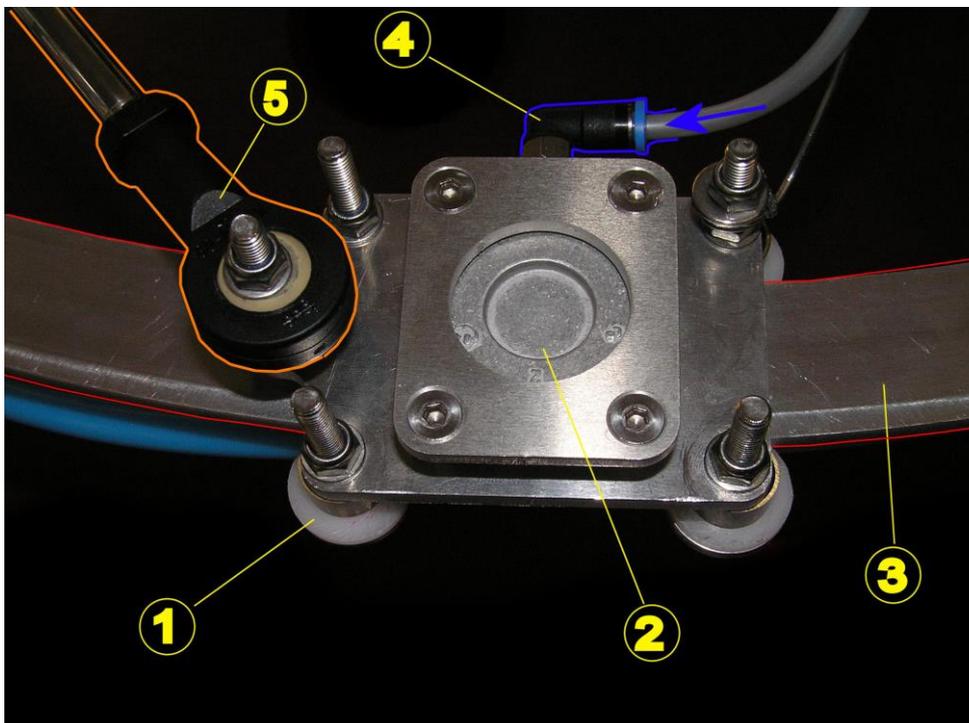


Abb.3.10-9: Ausführung des Hilfsschlittens für die Drehbewegung, bestehend aus den Gleitelementen (1), der pneumatischen Bremse (3). (5) zeigt die gelenkige Anbindung der Kolbenstange des Drehzylinders. (4) zeigt die Druckluftzuführung für die Bremse. (Quelle: Idaswind GmbH)

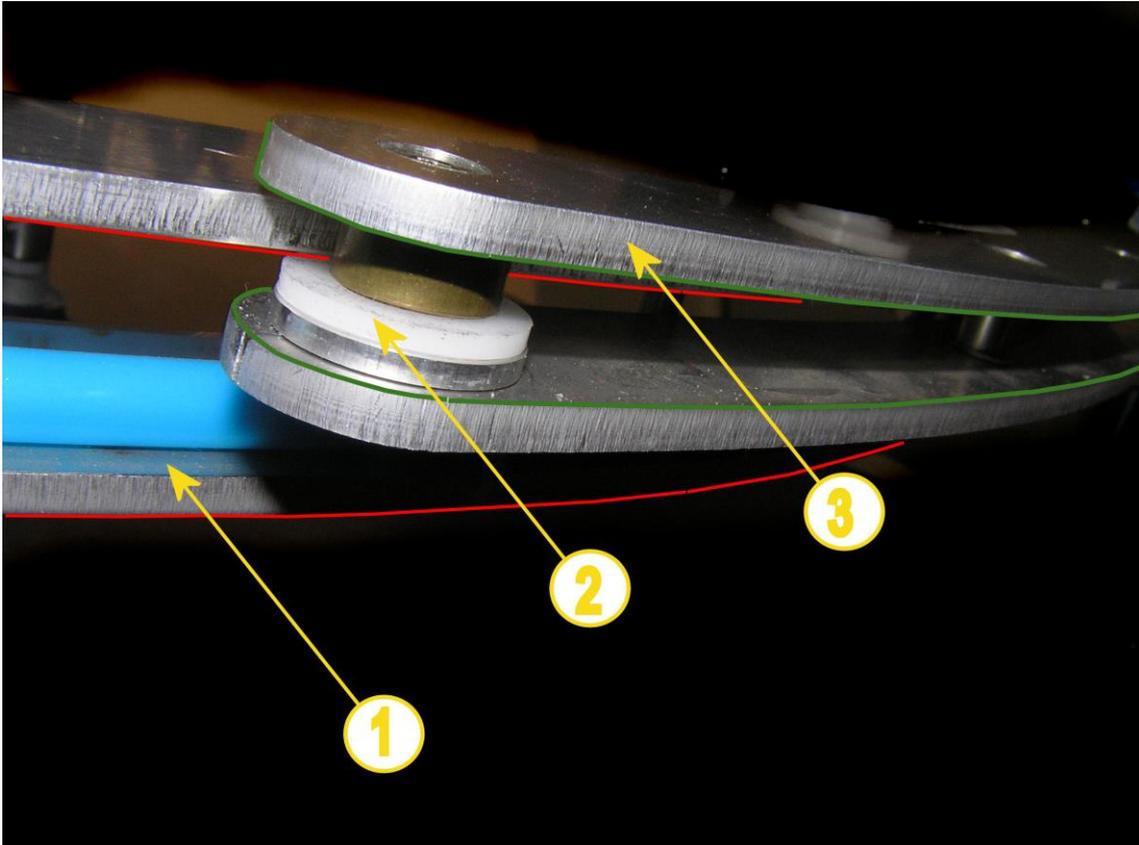


Abb.3.10-10: Aufgrund der positiven Erfahrung mit der Gleitlagerung des Hilfsschlittens, wurde auch die Lagerung der Brücke in der Ringeinheit analog ausgeführt. (1) zeigt die Ringeinheit, (2) zeigt ein Gleitelement, (3) zeigt die Aufnahme der Gleiteinheit. (Quelle: Idaswind GmbH)

On-board Energieversorgung

Ziel einer jeden Roboterentwicklung ist es, maximale Autonomie zu erreichen. Der Idealfall wäre ein völlig zuleitungsfreier Roboter. Dies bedeutet im Rückschluss, dass sämtliche Energieversorgung auf dem Roboter bereitgestellt werden muss. Die vorliegende Version benötigt, bezüglich der mechanischen Bewegung sowie bezüglich des nötigen Vakuums für die Saugfüße, Druckluft.

- Theoretisch denkbar ist es, die nötige Druckluftenergie mittels eines Druckluftspeichers mitzuführen. Eine kurze Überschlagsrechnung ergibt jedoch, dass die, bei tragbarem Gewicht dieses Druckluftspeichers, mögliche Wegstrecke des Roboters ungenügend wäre.
- Variante zwei könnte in der Erzeugung der nötigen Druckluft auf dem Roboter selbst liegen. Hierzu müsste ein autonomer Kompressor mitgeführt werden, der seinerseits von einem kleinen Verbrennungsmotor angetrieben wird. Bezüglich

der Komplexität des Vorhabens sowie der zu erwartenden Vibrationen durch den Verbrennungsmotor wurde davon Abstand genommen.

So musste man sich damit abfinden, den Roboter mit einer Energiezuleitung in Form eines dünnen (8 mm) Druckluftschlauches auszustatten, der gleichzeitig als Absturzsicherung fungieren kann.

Zur Versorgung der Robotersteuerung, also des Controllers, der Ventilinsel sowie der übrigen Sensorik wird eine Spannung von mindestens 24 V Gleichstrom benötigt. Der maximale Strom beträgt 600 mA. Um nicht noch eine zusätzliche elektrische Zuleitung mitführen zu müssen, wurde entschieden diese Energie auf dem Roboter in Form von Hochleistungsakkus mitzuführen. Es wurden Lithium Polymer Akkus verwendet mit einer Kapazität von 2200 mAh, dies entspricht bei voller Ladung einer maximalen Betriebsdauer von gut 3,6 h. Die Ladezeit dieser Akkus beträgt circa 2 Stunden, so dass mit zwei Akkusätzen, die auf dem Roboter leicht zu tauschen sein müssen, ein Dauerbetrieb möglich ist.

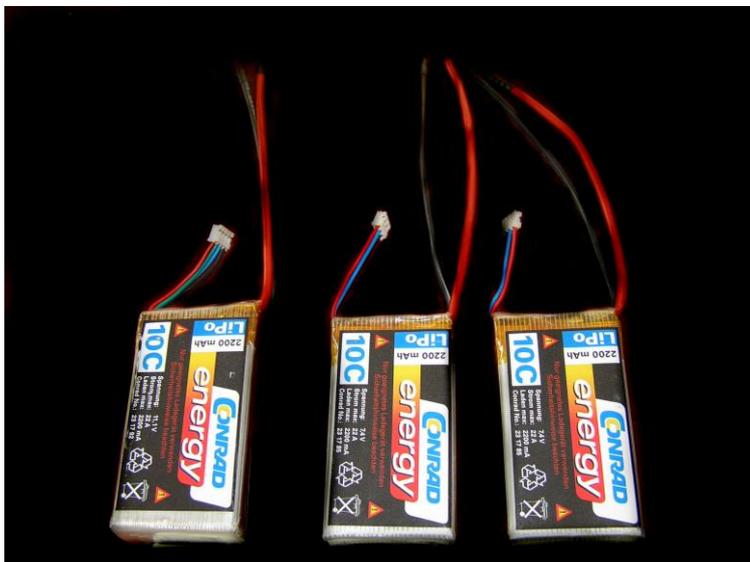


Abb.3.10.11: Lithium Polymer Akkus mit 2200mAh Kapazität. (Quelle: Idaswind GmbH)

3.11 Test der Roboterplattform Version 1.4

Die Version 1.4 des Roboters wurde ausgiebig getestet. Die Software musste den Änderungen der Robotermechanik angepasst werden. Bedingt durch die veränderte Kinematik der Linearbewegung war die maximale Schrittgeschwindigkeit des Roboters minimiert. Es zeigte sich insgesamt, dass Version 1.4 des Roboters bezüglich der



Hubmechanik (unabhängiges Hubsystem an den Saugfüßen der Ringeinheit) in die richtige Richtung weist.

Insgesamt ergab sich jedoch durch die vielen Modifikation der ursprünglichen Plattform ein hoher Grad an Komplexität, der immer schwerer beherrschbar wurde. Die Leitungsführung wurde aufgrund der erhöhten Anzahl von Leitungen schwieriger. Weiterhin wurde erkannt, dass die momentane Dimension des Roboters zwar eine große Schrittgeschwindigkeit ermöglicht, jedoch die Fähigkeit gekrümmte Flächen zu begehen erschwert. Wir waren an einem Punkt der Entwicklung angekommen, an dem man mit vielem Erreichten sehr zufrieden sein konnte. Die Wahrscheinlichkeit, das anfangs postulierte Ziel der kompletten Begehung eines Rotorblattes auf Basis der vorliegenden Plattform zu erreichen, erschien jedoch gering. So wurde entschieden eine verkleinerte Version des Roboters auf neuer Plattform unter Nutzung aller bisher gemachten Erfahrungen zu entwickeln.



3.12 Entwicklung der Roboterplattform Version 2

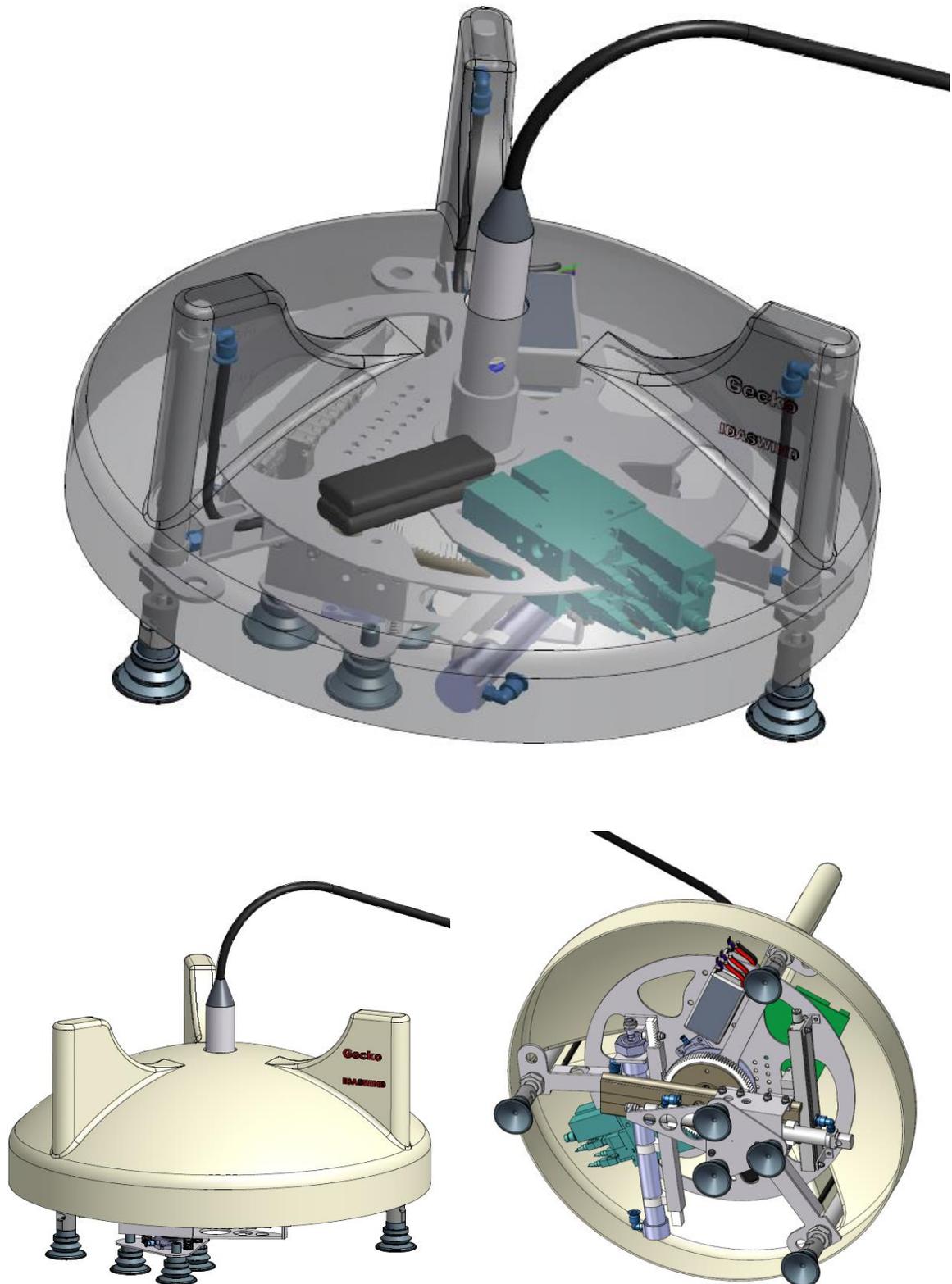


Abb.3.12-1: CAD-Model der Version 2 des Roboters, oben - dargestellt mit transparenter Verkleidung.



Version 2 stellt ein komplett überarbeitetes Design dar. Die wichtigsten Änderungen bezüglich der Vorgängerversionen sind im Folgenden aufgelistet:

Roboterversion:	1.0 – 1.4	2
Durchmesser des Roboters [mm]:	800	400
Gewicht des Roboters [kg]:	10	3,5
Maximale Schrittweite des Roboters [mm]:	500	150

Durch die erhebliche Verringerung der Abmessungen war es möglich nahezu sämtliche Komponenten eine Baugröße kleiner zu wählen, was einen zusätzlichen Gewichtsvorteil brachte. Dies betraf die Pneumatikzylinder, die Vakuumpumpen, die Ventilinsel, sowie die Saugfüße. Aufgrund des geringen Gewichtes wurde auch auf eine zusätzliche Linearführung für die Hubeinheit verzichtet und der Saugfuß über eine gelenkige Saugfußaufnahme direkt an den Zylinder montiert.

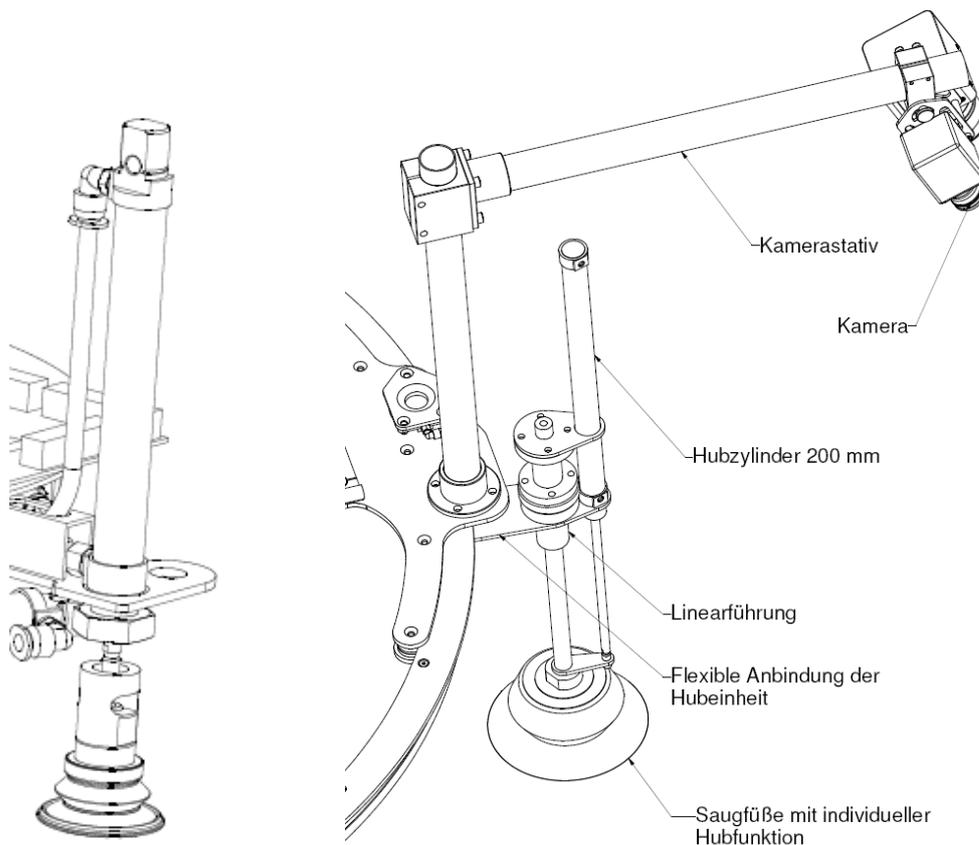


Abb.3.12-2: Links – Version 2: Saugfuß ist direkt an der Kolbenstange des Hubzylinders befestigt. Rechts – Version 1.4: Zusätzliche Linearführung wegen größerer Kräfte nötig.

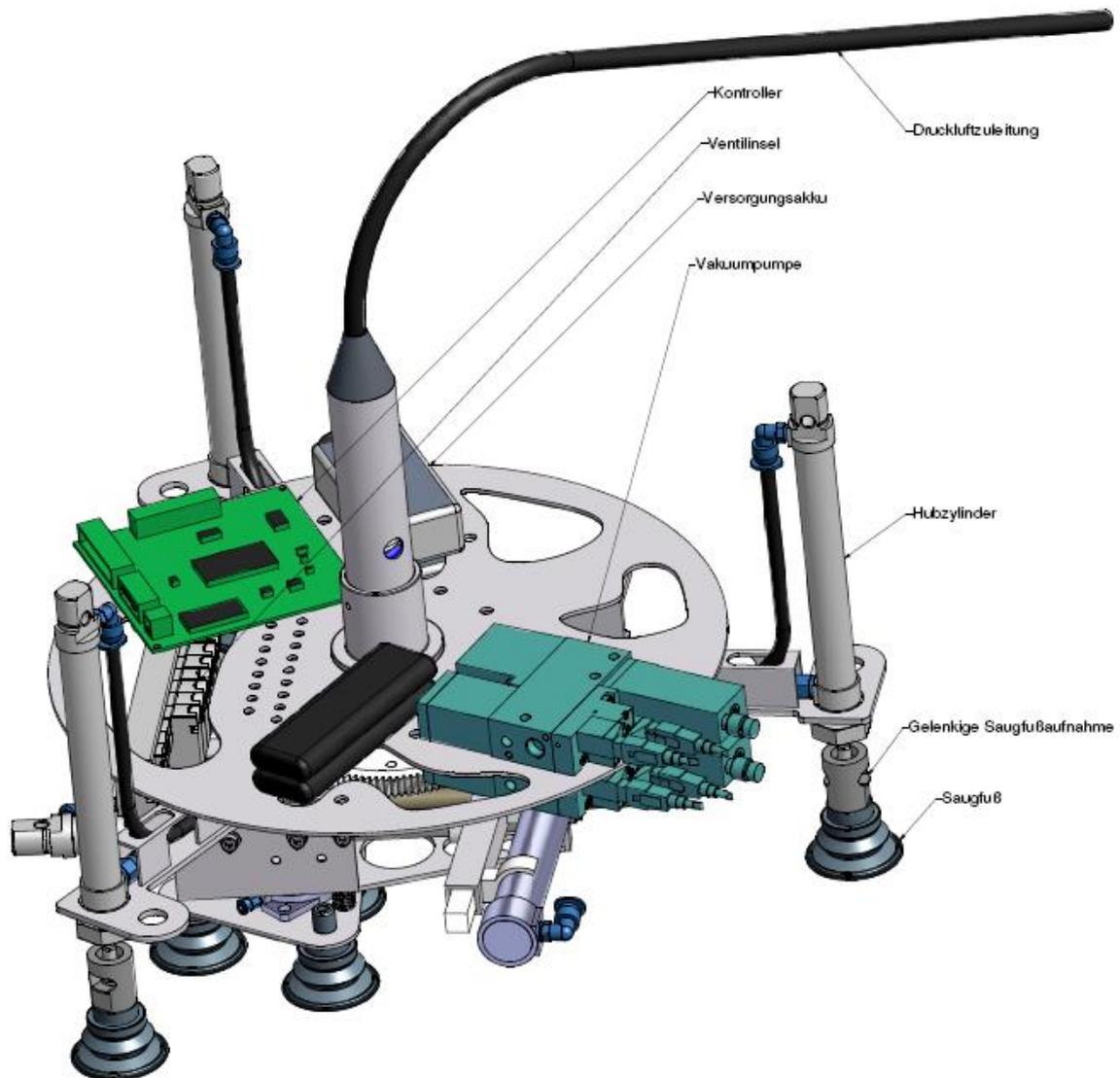


Abb.3.12-3: CAD-Modell der Version 2 des Roboters

Die Drehmechanik des Roboters wurde gegenüber den Vorversionen dahingehend geändert, dass nun eine Zahnstange, getrieben von einem Pneumatikzylinder, ein Stirnrad in Drehung versetzt. Der maximale Winkel bei vollem Zylinderhub soll 180° betragen. Zwischenwinkel werden mit einem Bremssystem realisiert. Die Winkelerfassung ist analog zur Vorversion durch einen inkrementalen Wegsensor realisiert. Die Linearbewegung ist analog zur Vorversion realisiert, d.h. ein Schlitten wird von einem doppelwirkenden Zylinder auf einer Linearführung verschoben. Die Saugfüßeinheit am Schlittenboden ist im Gegensatz zur Vorversion gelenkig ausgeführt. Das Gelenk lässt sich bei Bedarf arretieren. Zum Aufsetzen der Saugfüßeinheit wird diese in den flexiblen Zustand gebracht, so dass eine Anpassung an Krümmung oder Schräglage möglich ist. Nach erfolgreichem Ansaugen wird die Saugfüßeinheit gegenüber dem Schlitten wieder fixiert. Dies geschieht durch einen



Pneumatikzylinder der im ausgefahrenen Zustand die Grundplatte in die Anschläge presst und so fixiert.

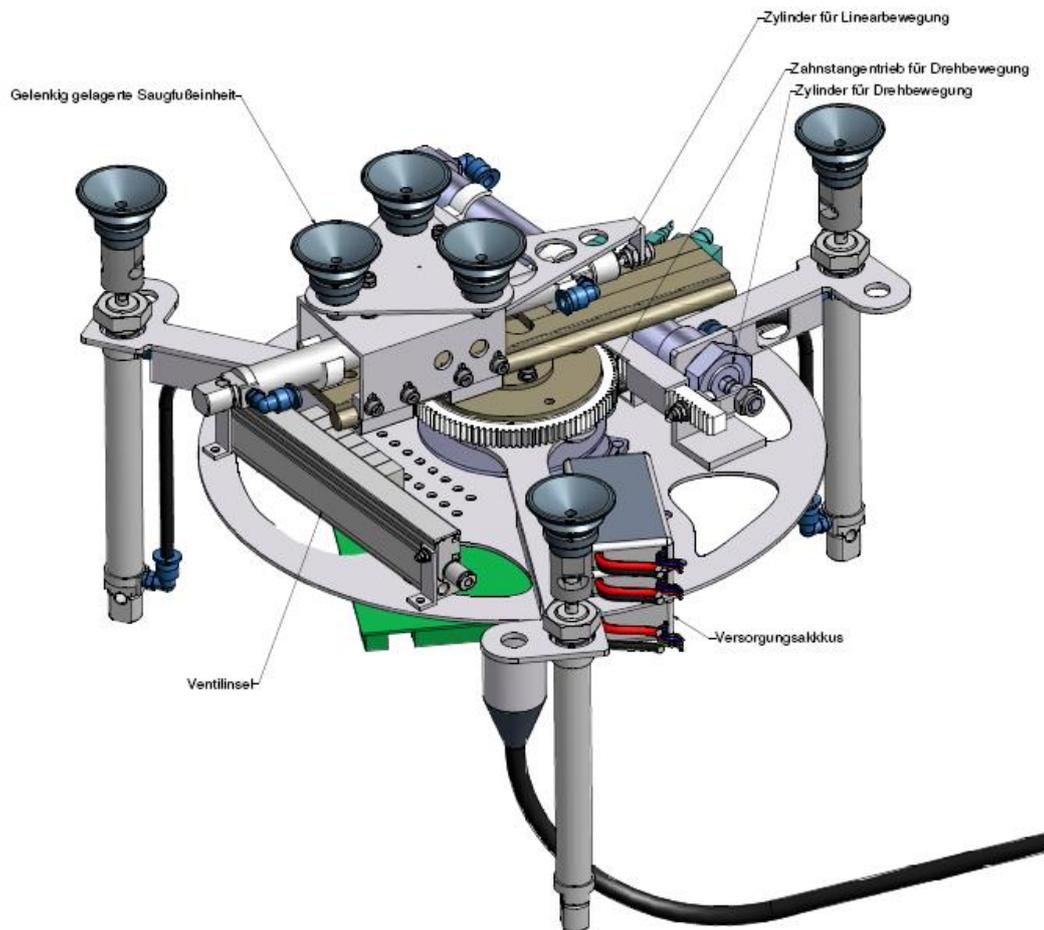


Abb.3.12-4: CAD-Modell der Version 2 des Roboters – Blick von unten auf Dreheinheit und Lineareinheit

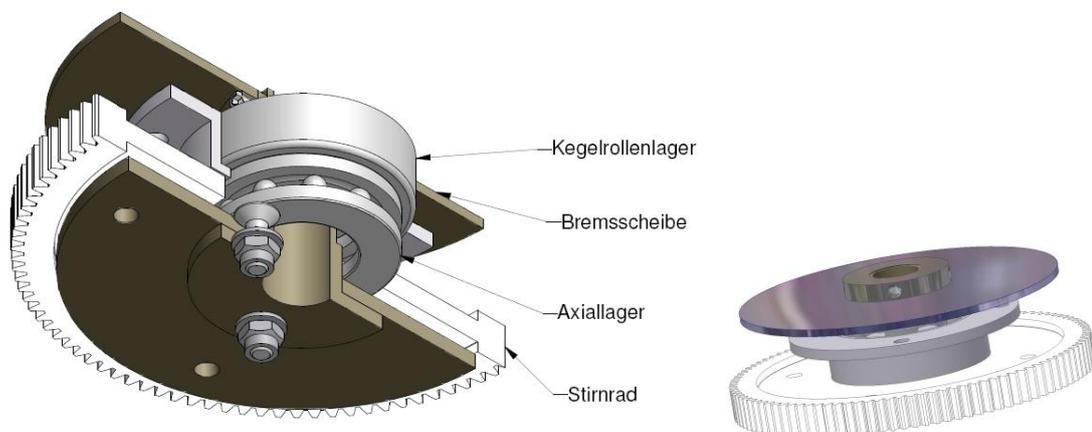


Abb.3.12-5: Drehlager der Version 2 des Roboters

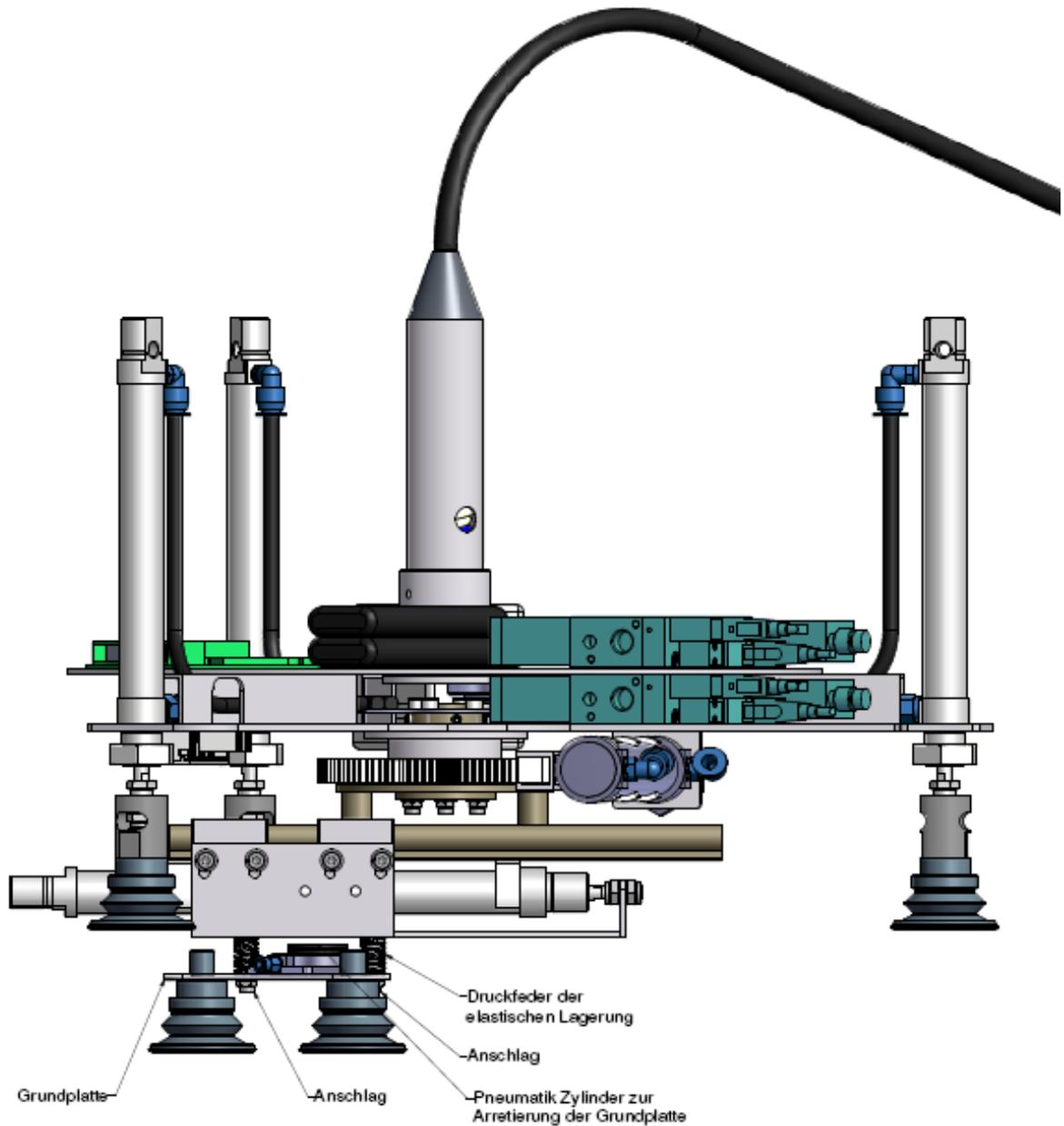


Abb.3.12-6: CAD-Modell der Version 2 des Roboters – Seitenansicht zur Veranschaulichung der flexiblen Saugfüßeinheit.

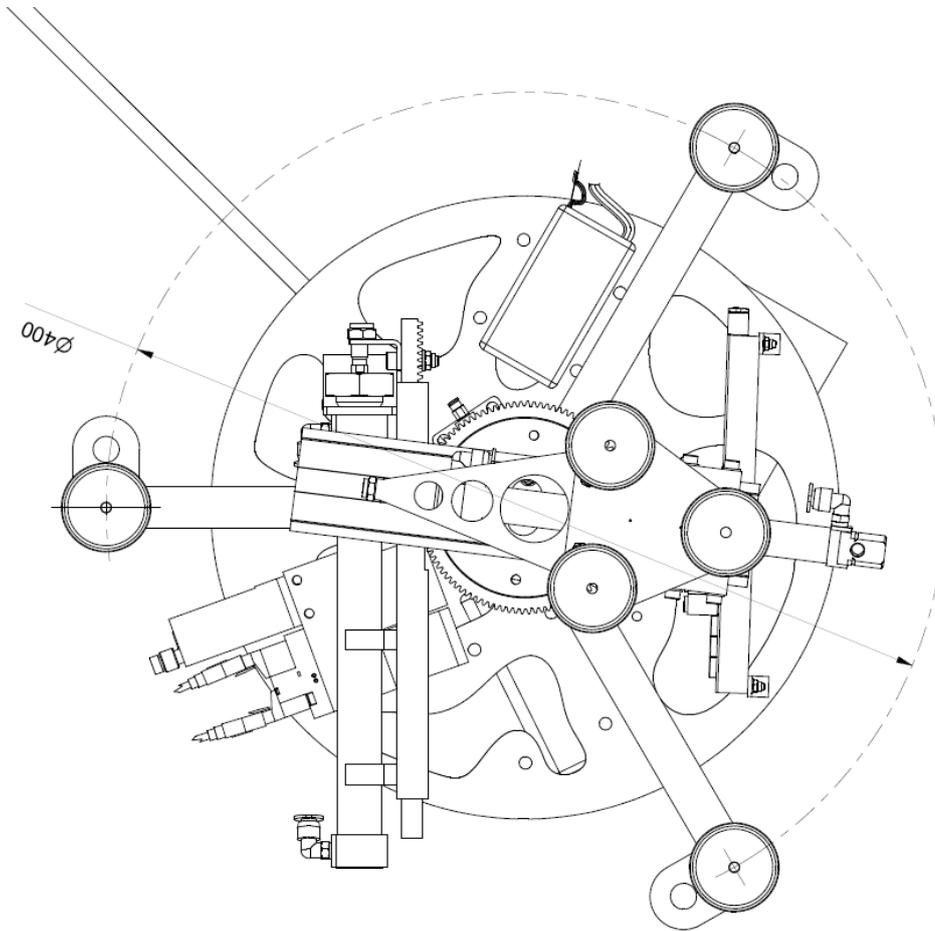


Abb.3.12-7: CAD-Modell der Version 2 des Roboters - Unteransicht

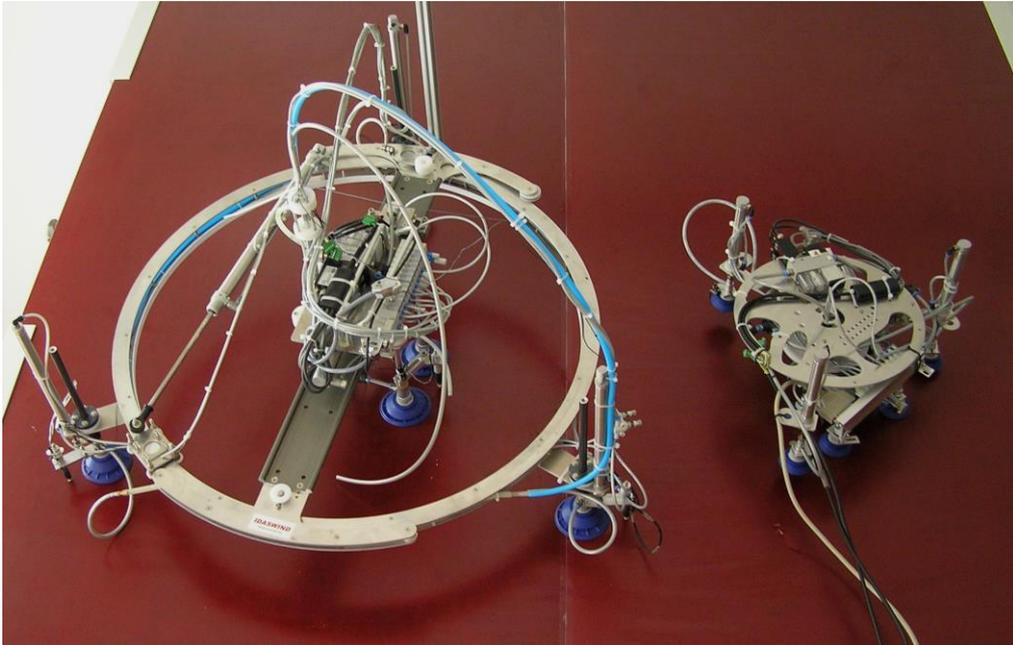


Abb.3.12-8: Vergleich der Versionen 1.4 und der Version 2.

3.13 Test der Roboterplattform Version 2

Nach Fertigstellung der neuen Version wurde mit den Tests begonnen. Das System erfüllte die Erwartungen auf ebener Fläche. Versuche an gekrümmten Oberflächen verliefen weit besser als bei den Vorgängerversionen. Die Toleranz gegenüber Beschädigungen der Oberfläche sollte vergrößert werden.

Die gelenkige Lagerung der am Schlitten befestigten Saugfußeinheit erwies sich als sehr wirkungsvoll. Die gelenkige Lagerung der äußeren Saugfüße sollte verbessert werden.

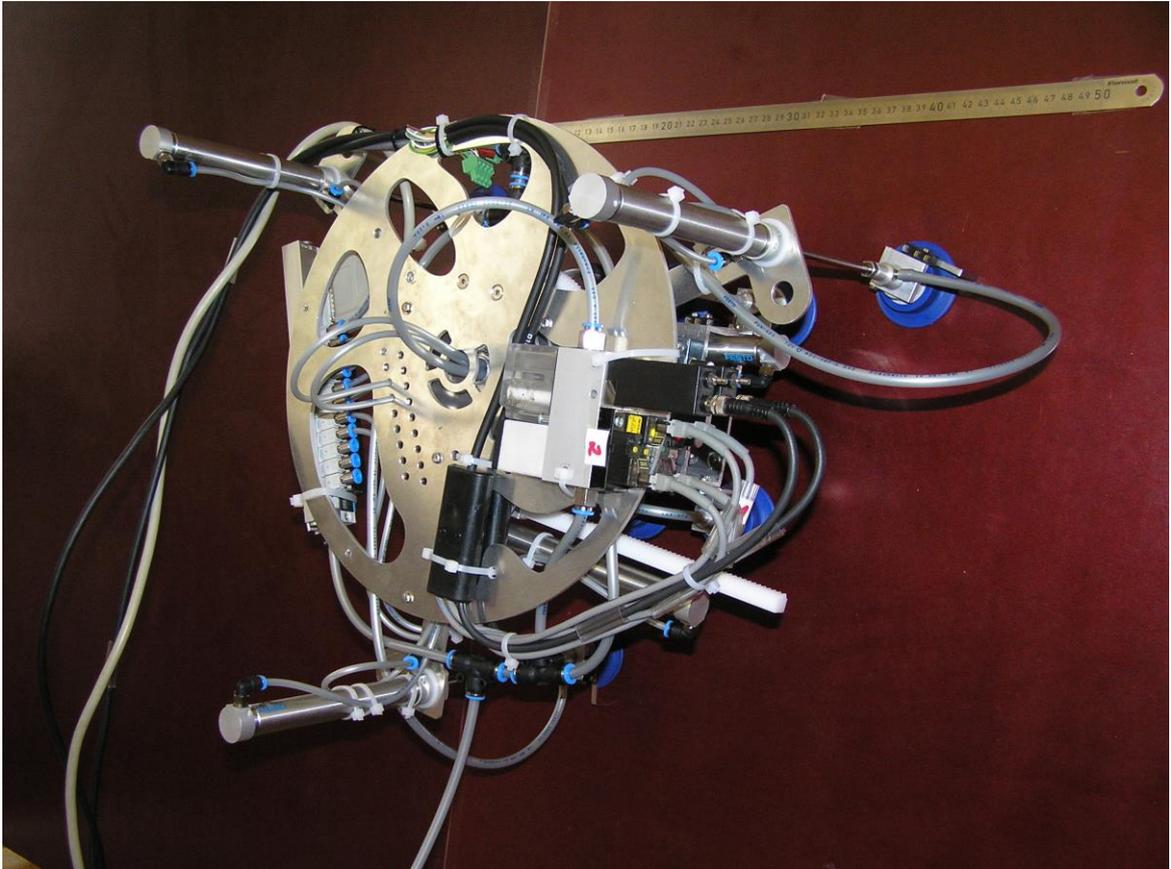


Abb.3.13-1: Version 2 des Roboters an der Testfläche



Abb.3.13-2: Version 2 des Roboters an der Testfläche



3.14 Test der Roboterplattform Version 2 an der Windkraftanlage

Im August 2008 wurde der Roboter erstmals an einer realen Windkraftanlage getestet. Hierzu konnte wir eine 270 kW Anlage nahe Prenzlau nutzen. Die nachfolgende Bilderserie gibt Eindrücke dieser Tests wieder.

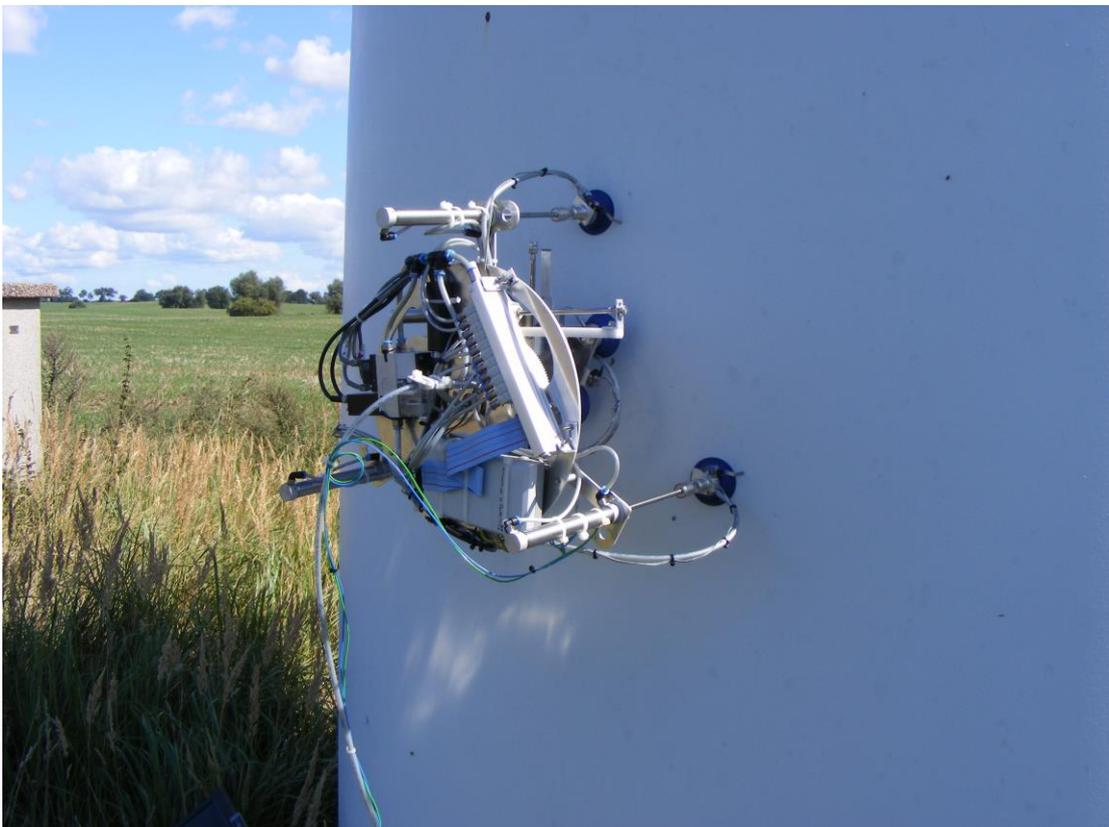


Abb.3.14-1 Roboter an der Turmwand, Krümmungsradius ca. 1,2 m



Abb.3.14-2: Roboter am Turm der Windkraftanlage, möglicher Einsatz wäre die Prüfung von Schweißnähten



Abb.3.14-3: Roboter wird im Wurzelbereich auf das Rotorblatt aufgesetzt. Der Krümmungsradius im Wurzelbereich beträgt 0,8 m, dies dürfte bezogen auf den Radius die Grenze dessen sein, was der Roboter bewältigen kann.

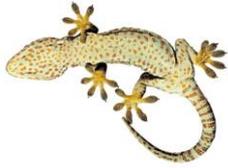


Abb.3.14-4: Roboter an der Rotorblattspitze, es handelt sich um ein Rotorblatt mit eingebauter Flügelspitzenbremse, wie bei „Stallanlagen“ üblich.

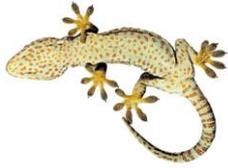


Abb.3.14-5: Roboter am Rotorblatt

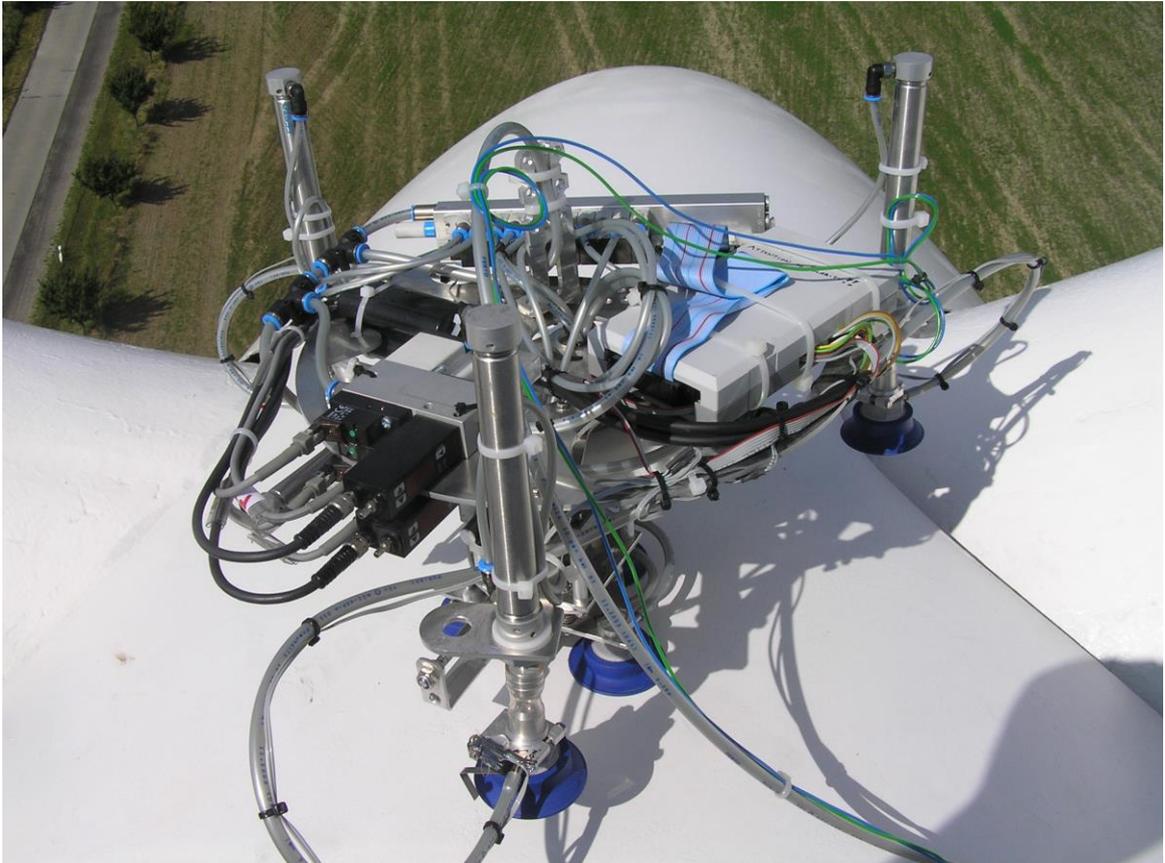


Abb.3.14-6: Roboter auf der Nabenverkleidung



Abb.3.14-7: Roboter am Rotorblattfuß



Abb.3.14-8 Roboter an der Flügelspitze



Abb.3.14-9: Roboter am Rotorblatt



3.15 Schlußfolgerung - Ausblick

Nach dem oben beschriebenen Entwicklungsprozess lässt sich feststellen, dass die Entwicklung eines Kletterroboters, der die eingangs festgelegten Anforderungen erfüllt, eine sehr anspruchsvolle Aufgabe darstellt. Die Beherrschung der vielen sich gegenseitig verdrehenden und verschiebenden Elemente des Roboters ist generell schwierig. Die Gewichtsproblematik begleitet permanent den Entwicklungsprozess. Extremer Leichtbau ist aufwendig. Das Gewicht einer Vielzahl von nötigen Führungen, Drehlagern und Gelenken addiert sich, so dass man sich in einem Wettstreit, zwischen Steifigkeit, Schnelligkeit und Gewicht befindet.

Dies gab uns Anlass einmal völlig losgelöst von dem bisherigen Konzept, welches, wie beinahe alle Roboterkonzepte, auf Linearführungen und Drehgelenken basiert, die Gedanken schweifen zu lassen:

Wäre ein Roboter vorstellbar der ganz ohne die traditionellen Elemente wie Gelenke, Linearführungen oder Drehlager auskommt?

Die Bewegung des Roboters müsste dann rein auf der Elastizität der Elemente beruhen. Vorstellbar wäre ein Dreibein, dessen elastische Beine 120° zueinander angeordnet sind. Durch Pneumatische Muskeln beispielweise ließe sich jedes Bein verlängern oder verkürzen. Durch entsprechende Ansteuerung der drei Beine sollte eine Bewegung in beliebige Richtungen möglich sein. Der Bewegungsablauf würde dem einer Spinne gleichen.

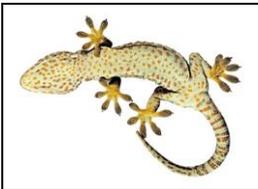


4. Entwicklung der Basisstation

Das folgende Kapitel beschreibt die Entwicklung der Basisstation des Roboters entsprechend der Arbeitspakete 5 und 6 des Projektplans.

4.1 Spezifikation der Basisstation

- Die Basisstation dient zum einen der Energieversorgung des Roboters und zum anderen als Sicherungssystem gegen Absturz. Die Versorgung des Roboters mit Druckluftenergie erfolgt über einen 8 mm starken Druckluftschlauch.
- Die nötige elektrische Energie zur Versorgung der Steuerung und der Magnetventile erfolgt über Litium Polymer Akkus hoher Leistungsdichte, welche vom Roboter mitgeführt werden. Die Übertragung der Steuersignale zum Roboter sowie die Übertragung der Sensorsignale vom Roboter erfolgt kabellos über eine „Bluetooth“-Verbindung. So verbleibt als einzige nötige Zuleitung von der stationären Basisstation zum bewegten Roboter der Druckluftschlauch.
- Die maximale Distanz des Roboters von der Basisstation wird mit 50 m angenommen, dies entspricht ungefähr der Rotorblattlänge der momentan am Markt befindlichen Großanlagen.
- Die Basisstation soll bezüglich ihrer Abmessungen und ihres Gewichtes so dimensioniert sein, dass ein Transport der Basisstation mit dem vorhandenen Werkzeugkran der Windkraftanlage vom Boden zum Maschinensatz möglich ist.
- Die Bereitstellung der Druckluftenergie soll über einen Kompressor erfolgen.
- Die von der Basisstation ausgehende Zuleitung zum Roboter muss automatisch je nach Abstand des Roboters von der Basisstation eingeholt oder nachgelassen werden. Die hierbei auf den Roboter durch den Zug der Zuleitung wirkenden Kräfte, dürfen nicht zu groß werden, um den Roboter nicht in seiner Bewegung zu behindern oder im schlimmsten Fall von der Rotorblattoberfläche abzureißen.
- Die Zuleitung muss bezüglich ihrer Reißfestigkeit in der Lage sein, den Roboter im Falle des Absturzes sicher abzufangen. Als maximale Höhe des freien Falls sollen 10 m kalkuliert werden.



4.2 Konstruktive Umsetzung

Eine Kabeltrommel soll die einzig nötige Zuleitung zum Roboter, die 8 mm starke Druckluftleitung, bereithalten. Die Trommel ist so ausgelegt, dass bei einfacher Lage der Zuleitung 50 m zur Verfügung stehen. Die Kabeltrommel kann durch einen Servomotor und in Verbindung mit einer Regelung stufenlos bezüglich ihrer Drehgeschwindigkeit und Drehrichtung geregelt werden. Die Kabelführung ist so gestaltet, dass entsprechend dem Bewegungsablauf des Roboters automatisiert Zuleitung nachgeführt oder eingeholt wird. Dies wird durch ein Zugmesssystem erreicht, welches permanent die Zugspannung der Zuleitung erfasst (siehe Abb.4.2-1). Der Messwert der Zugmessung dient der Regelung als Steuerung des Servomotors. Ermittelt die Zugmessung einen zu geringen Zug der Zuleitung, so wird der Schrittmotor veranlasst Zuleitung einzuholen, ergibt die Zugmessung einen zu starken Zug, so wird der Schrittmotor veranlasst Zuleitung nachzuführen.

Um ein problemloses Auf- und Abrollen der Zuleitung von der Trommel zu gewährleisten, wurde ein Leitungsführungssystem eingeführt. Dieses System stellt durch die starre Kopplung mit der Trommeldrehung sicher, dass die Zuleitung spiralförmig auf die Trommel aufgerollt wird.

Die Zuleitung dient gleichzeitig als Absturzsicherung. Der Absturzfall kann vom Zugmesssystem erkannt werden (Überschreiten eines zulässigen Maximalwertes der Zugbelastung der Zuleitung). In diesem Fall werden von der Steuerung zwei pneumatische Bremsen aktiviert, die an den Stirnseiten der Kabeltrommel angreifen und diese bremsen. Alternativ dazu kann der Servomotor so ausgelegt werden, dass er auch im Absturzfall den Roboter sicher hält (Kippmoment des Servomotors muss ausreichend sein).

Die Druckluftherzeugung soll am Boden durch einen Kompressor erfolgen, der sich stets im Servicefahrzeug befindet. Die hierfür nötige elektrische Energie ist in jeder modernen Windkraftanlage im Bereich des Turmfußes verfügbar. Diese Lösung erlaubt es einen großzügig dimensionierten Kompressor zu wählen (er muss ja nicht auf die Windkraftanlage gebracht werden), zudem ist dadurch keine Lärmbelästigung im Arbeitsbereich zu erwarten. Die Basisstation wird also mit einer Druckluftleitung vom Servicefahrzeug aus versorgt, die durch das Turminnere nach oben gelegt wird.

Zur Pufferung der Druckluftversorgung wird in die Kabeltrommel ein kleiner Druckluftspeicher (ca. 6l) integriert. Die Zuleitung der Druckluft in den Druckluftspeicher erfolgt über eine Drehdurchführung (siehe Abb.4.2-1, 4.2-2, 4.2-3).

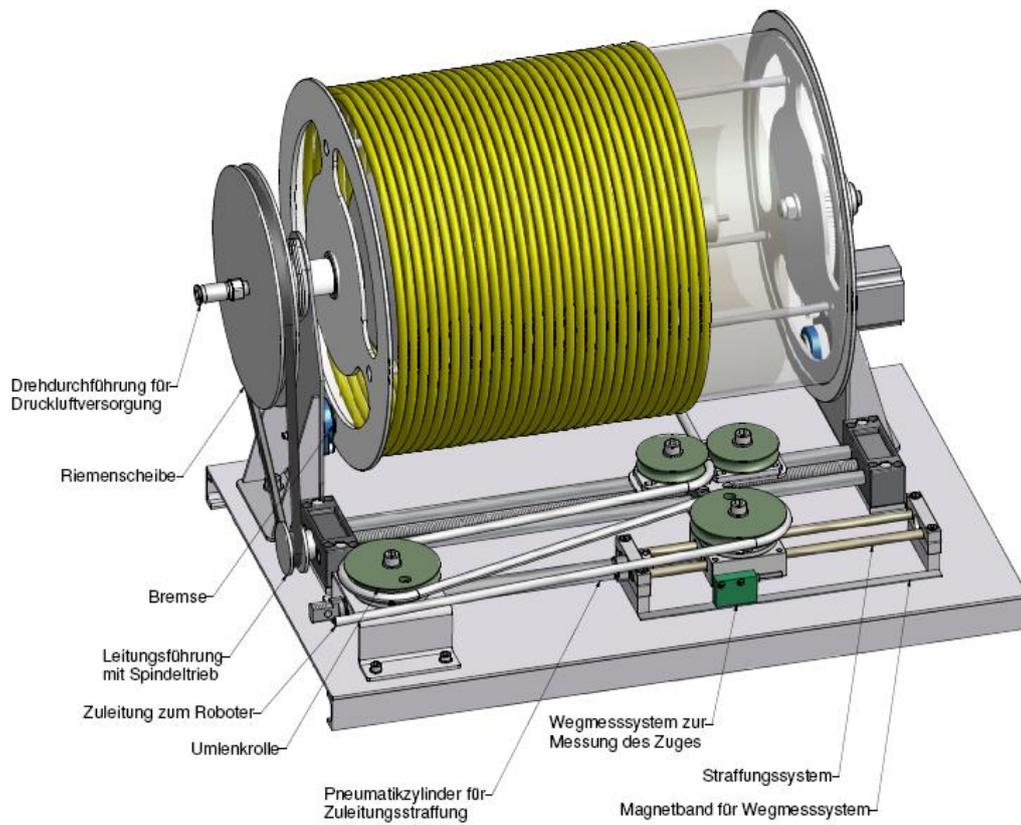


Abb.4.2-1: CAD-Modell der Basisstation

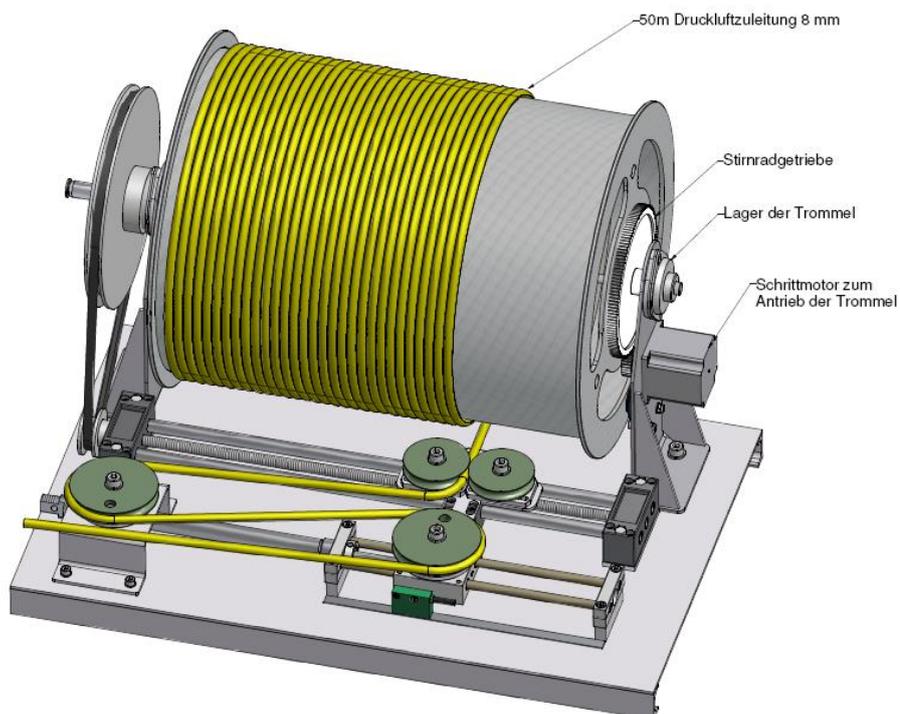


Abb.4.2-2: CAD-Modell der Basisstation

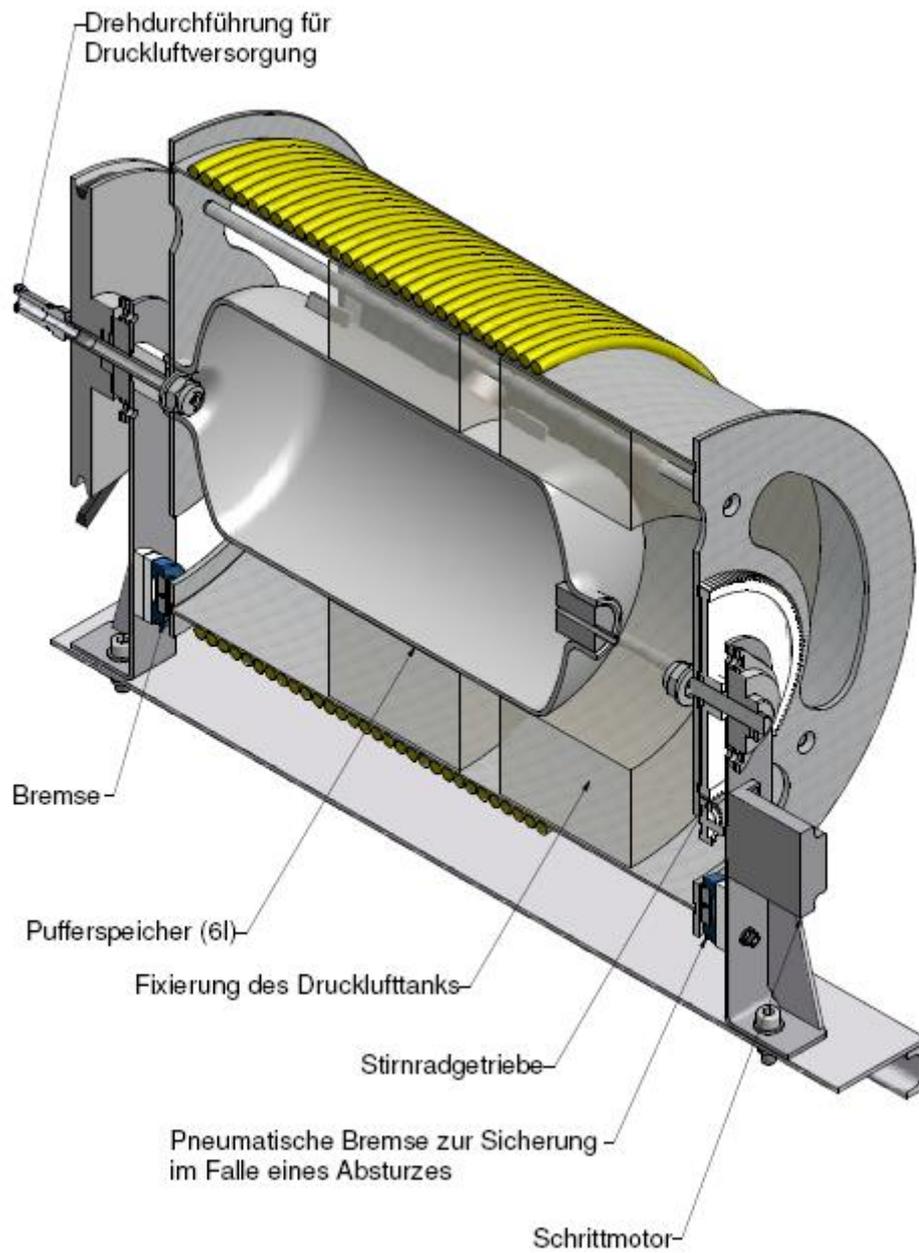


Abb.4.2-3: CAD-Modell der Basisstation - Schnittdarstellung

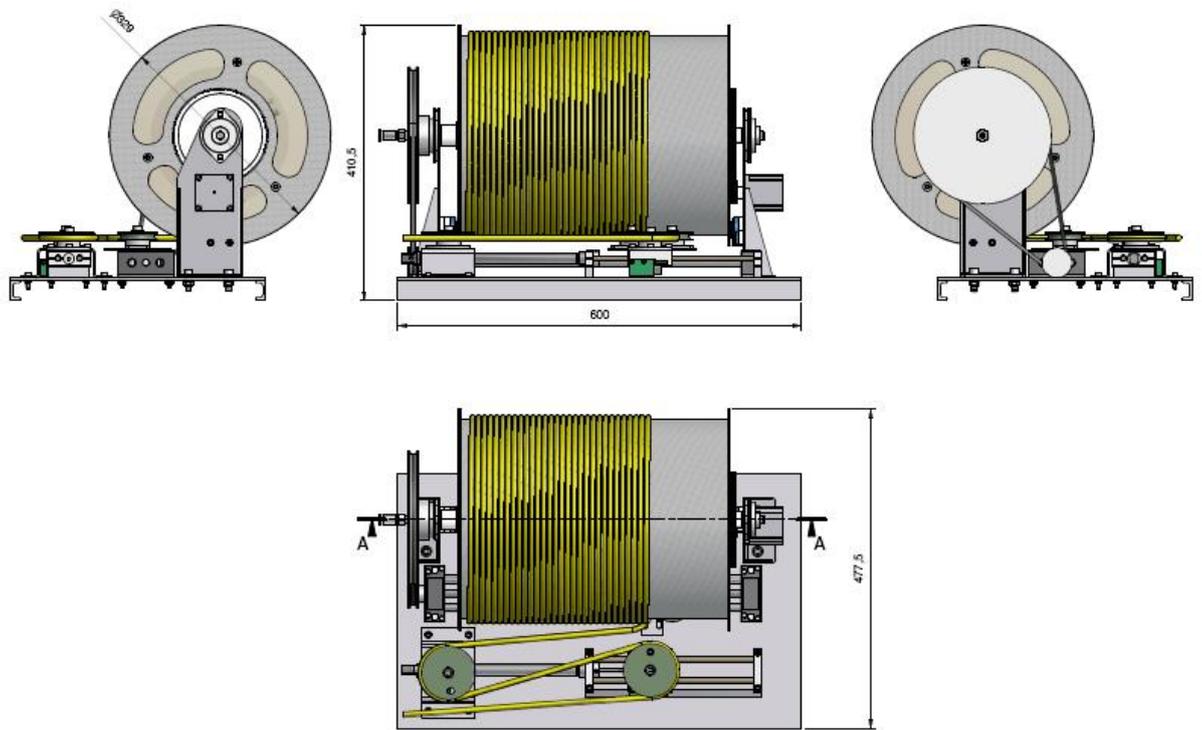


Abb.4.2-4: CAD-Modell der Basisstation – Hauptabmessungen

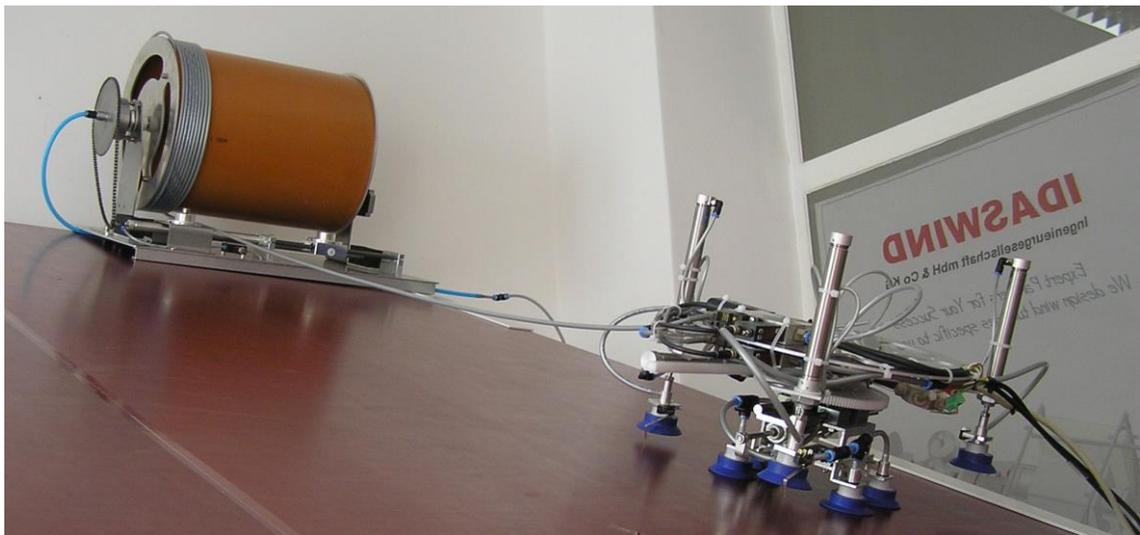
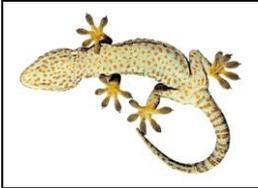


Abb. 4.2-5: Basisstation in ersten Tests, noch ohne Straffungssystem



5. Entwicklung der Prüftechnik

Diese Aufgabe wurde vom Wilhelm-Klauditz-Institut der Fraunhofer Gesellschaft übernommen, welches als F+E Partner in das Projekt eingebunden war. Die Aufgabenstellung entspricht den Arbeitspaketen (AP) 11, 12, 13 und 14.

5.1 Rein optische Untersuchungstechnik

Aufgabenstellung:

Gemäß der Aufgabenstellung soll das Robotersystem mit einer Digitalkamera ausgerüstet das Rotorblattabschreiten und dessen Oberfläche vollständig fotografisch dokumentieren. Die so erzeugten Bilder sollen mit einer Bildbearbeitungssoftware zu einem Gesamtbild, bestehend aus vielen Einzelbildern, zusammengesetzt werden.

Mögliche, optisch erkennbare, Fehlstellen auf der Rotorblattoberfläche sollen mit Hilfe einer Fehlererkennungssoftware automatisch erkannt und mit dem entsprechenden Einzelbild und dessen Koordinaten in einer Datenbank abgespeichert werden.

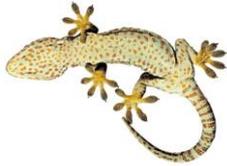
Ergebnis (Nachfolgendes Kapitel 5.1 wurde Wilhelm-Klauditz-Institut beigetragen):

Für die vom Robotersystem aus erfolgende Bilddatenaufnahme wurde ein Konzept entwickelt und prototypisch umgesetzt.

Randbedingungen und Vorgaben

Um den Zusammenhang zwischen optischer Auflösung, Bilddatenmenge und erkennbarer Fehlergröße abschätzen zu können, wurden folgende Randbedingungen formuliert:

- Die zu scannende Oberfläche beträgt etwa 100 m².
- Ein Teilmobdausschnitt umfasst eine Fläche von etwa 18 cm x 13 cm.
- Die fehlerfreie Oberfläche ist annähernd homogen, eine Teilbildfläche umfasst mehr fehlerfreie als fehlerhafte Bereiche, zu erkennende Merkmale unterscheiden sich in der Helligkeit ausreichend von der Oberfläche.
- Ein Fehler (z.B. Riss) hat eine Ausdehnung von mindestens 3 Pixel (Breite und Höhe).



- Farbinformationen werden nicht benötigt.
- Die optische Achse der Kamera steht annähernd senkrecht zur Oberfläche bei einem festen Arbeitsabstand von ca. 15 cm, Krümmungen der Oberfläche sind klein gegenüber dem Abstand.
- Eine diffuse Beleuchtung (Tageslicht oder LED-Strahler) reicht aus.
- Die Bilddatenmenge sollte die Kapazität einer DVD (4.5 GB) nicht überschreiten.
- Die erforderliche Hardware (Kamera, Beleuchtung, Datenverbindung, Spannungsversorgung) wird mit zusätzlichen Alu-Profilen fest auf dem Gecko-Rahmen montiert.



Abb.5.1-1: Kamera mit Präzisionsobjektiv

Gerätekonfiguration

Als Kamera wurde eine digitale Mini-Kamera des Typs Guppy F80C (Hersteller Fa. AVT) mit IEEE1394-Schnittstelle „FireWire“ ausgewählt. Die Spannungsversorgung erfolgt über das FireWire-Interface. Die Auflösung beträgt 1032 x 778 Pixel (s/w oder Farbe), alle wichtigen Funktionen (z.B. Bildgröße, -format, Shutter) sind über die bidirektionale Schnittstelle steuerbar.

Wegen des geringen Arbeitsabstands und des vergleichsweise großen Bildfeldes kommt als Optik nur ein kompaktes fokussierbares Präzisionsobjektiv (SKR KMP-IR Cinegon, Brennweite 4,8 mm/F1.8, Bildwinkel ca. 45°, Schneider – Bad Kreuznach) in Frage.

Für die Beleuchtung wird ein LED-Auflicht (Typ LFR-200-R, Hersteller CCS) vorgesehen. Es besteht aus einer runden Scheibe (Durchmesser 200 mm, mit 70 mm großer Öffnung

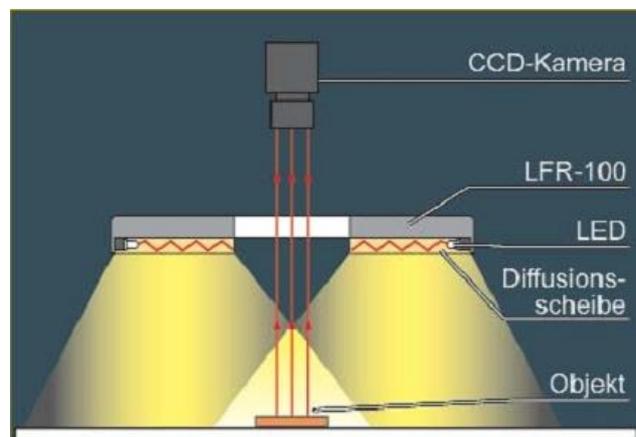


Abb.5.1-2: Schema der Kombination Kamera/Beleuchtung



für die Kamera) und erzeugt sehr diffuses rotes Licht (Wellenlänge ca. 660 nm). Damit ist es möglich, entweder durch ein Farbfilter vor der Kamera oder durch Auswahl des Rot-Kanals bei der Bildauswertung Fremdlicht zumindest teilweise zu unterdrücken. Zur Versorgung ist ein Vorschaltgerät erforderlich, das 12 V Eingangsspannung liefert. Alternativ dazu wäre baugleich auch ein Weißlicht-LED-Modul erhältlich, das jedoch eine höhere Eingangsspannung und damit einen zweiten Akku (s.u.) erfordert hätte. Ein anderer Aufbau (Schräglich erzeugende LED-Balken, parallel angeordnet zu den vier Rändern des Bildfeldes) wurde ebenfalls zurückgestellt, weil mehr Mechanik für die Justierung erforderlich gewesen wäre.

Als Spannungsversorgung für Beleuchtung mit Vorschaltgerät und Lichtleiter-Umsetzer mit Kamera genügt ein handelsüblicher Lithium-Ionen-Notebook-Akku (Typ „Connect“, Anbieter Fa. Accu-Profi) mit einer Ausgangsspannung von 16 ... 19 V und einer Kapazität von 7 Ah aus, womit eine Betriebsdauer von mindestens 3 h (geschätzt) realisierbar erscheint. Die Spannung reicht auch noch zur Speisung des Vorschaltgerätes für die Beleuchtung aus.

Für eine Beleuchtung mit Weißlicht-LEDs wäre allerdings ein zweiter Akku erforderlich. Die Akkus (Masse pro Stück ohne Halterung ca. 800 g) können eingespart werden, wenn zusätzlich zur sowieso erforderlichen Versorgung der Gecko-Steuerung noch eine zweite Versorgungsspannung zugeführt wird.

Die bidirektionale Datenverbindung zwischen Kamera und Rechner entspricht dem Standard IEEE 1394 und kann auf verschiedene Arten realisiert werden:

- Mit einem handelsüblichen 6poligen FireWire-Kabel, erhältlich in Längen bis zu 5 m.
- Mit einer nahezu beliebig langen LWL-Strecke, für die an der Kamera und am Rechner jeweils ein Umsetzer (OpticLink 1394-Lcset, Hersteller Arvoo) erforderlich sind.

Kameraseitig benötigt der Umsetzer eine Versorgungsspannung zwischen 8 V und 40 V, speist damit aber auch die Kamera selbst. Für Laborversuche mit LWL-Strecke genügt ein einfaches Patch-Lichtleiterkabel, für eine Messung vor Ort wäre ein ummanteltes Verlegekabel mit einer Masse von 100 g/m erforderlich.

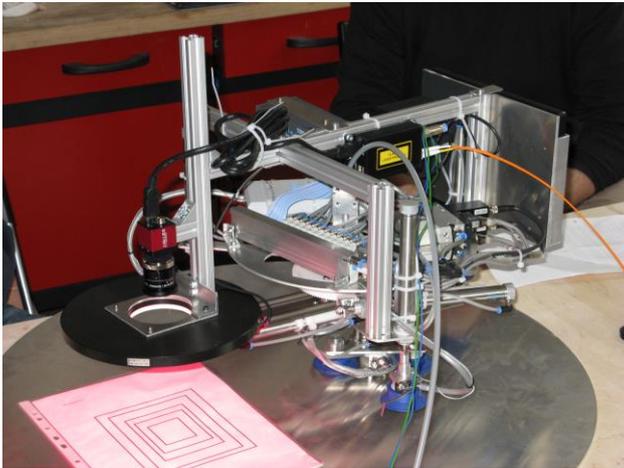


Abb.5.1-3: Gesamtaufbau des Gecko mit Kamera, Beleuchtung, Datenverbindung, Akku

Alle Elemente für Bildaufnahme und Beleuchtung wurden auf dem Rahmen des Gecko mit leichten Alu-Profilen (Hersteller: Item) montiert (vgl. Abb.4). Die zusätzlich angebrachte Masse betrug ca. 4000 g.

Abschätzung des Bilddatenvolumens

Die Menge der zu verarbeitenden Bilddaten pro Rotorblatt lässt sich bei folgendem Szenario wie folgt abschätzen:

- Größe der Oberflächenausschnitte ca. 18 cm x 13 cm
- Auflösung mit Kamera „Guppy“: 1 Pixel entspricht ca. 0,17 mm x 0,17 mm
- Bei 100 m² Oberfläche ergeben sich ca. 4300 Kamerapositionen, d.h. 4300 Bilder (ohne Überlappung)
- monochrome Bilder, Größe 1032 x 778, unkomprimiert
- Bilddatenvolumen ca. 3500 MByte

Bei dieser Auflösung und Oberfläche werden kleine Objekte (z.B. Risse) mit ausreichendem Kontrast zur fehlerfreien Umgebung ab einem Durchmesser von ca. 0,6 mm hinreichend sicher erkannt. Das

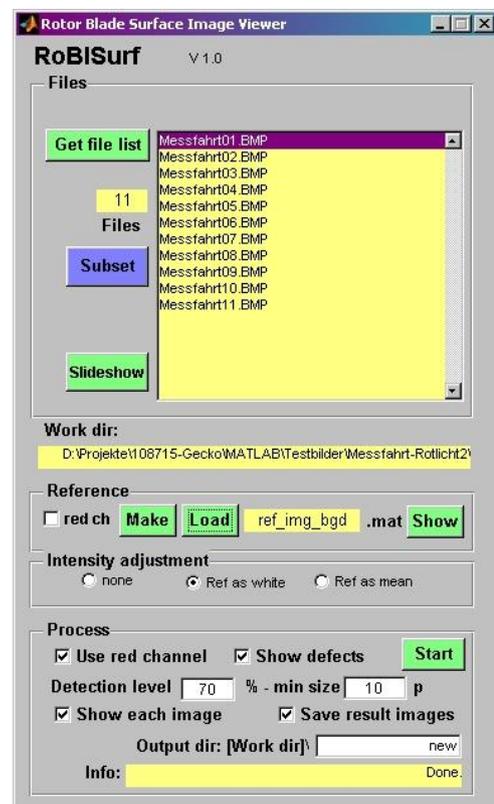


Abb.5.1-4: Bedieneroberfläche der Software zur Nachbearbeitung der Bilddaten



Datenvolumen, mit dem eine Rotorblattoberfläche vollständig dokumentiert ist, kann noch auf einer DVD gespeichert und archiviert werden. Es würde sich drastisch reduzieren, wenn die Bilder in komprimiertem Format (z.B. JPEG) und/oder von vornherein nur Bilder mit erkannten Objekten gespeichert werden. Um zu beurteilen, wie weit das Datenvolumen durch solche Verfahren verringert werden kann, müssten jedoch zunächst Erfahrungen mit realen Datensätzen gesammelt werden.

Nachbearbeitung der Bilddaten

Die Einzelbilder, die von der Kamera aufgenommen und zunächst im Rechner abgelegt werden, müssen automatisch vorverarbeitet werden, bevor sie gesichtet und archiviert werden können. Dazu sind folgende Schritte erforderlich:

- Shadingkorrektur, Helligkeitsausgleich (Abgleich der Helligkeitsverteilung im Einzelbild entsprechend den lokalen Inhomogenitäten durch die Beleuchtung, Ausgleich von Drift der Beleuchtung)
- Auskopplung des Rot-Kanals (wenn die o.g. Beleuchtung eingesetzt wird)
- Korrektur der geometrischen Verzeichnung durch das Objektiv
- Fehlererkennung und -markierung (Detektion dunkler Objekte durch einfache Grauwertschwelle, Vermessung, Markierung des umschreibenden Rechtecks)

Diese Funktionen wurden in der Software „RoBISurf“ realisiert. Sie kann noch um die Zuordnung der Fehler zu realen Koordinaten und ggf. die Erstellung einer Fehlerliste erweitert werden.

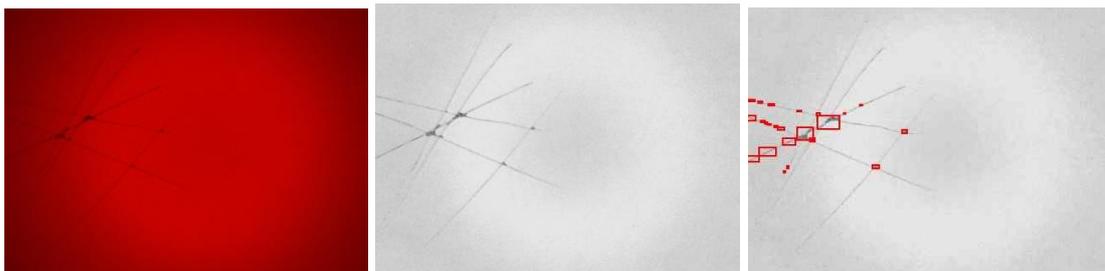


Abb.5.1-5: Verarbeitungsschritte:
Originalbild

nach Helligkeitsausgleich

mit Fehlermarkierung

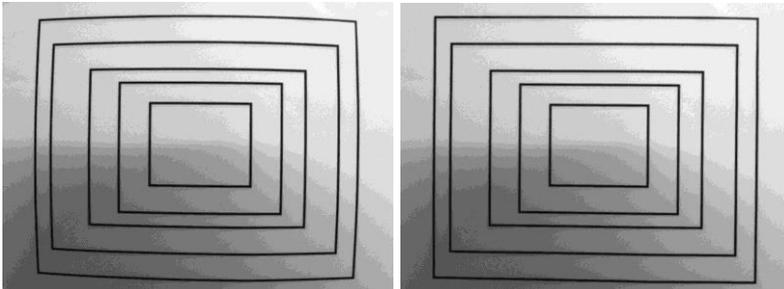


Abb.5.7: Verarbeitungsschritte :
Originalbild

nach geometrischer Entzerrung

Ein weiterer Arbeitsgang wäre erforderlich, um ein „Panorama“-Bild der Blattoberfläche zu erstellen und darin auf Basis der numerischen Oberflächenkoordinaten navigieren zu können. Dazu können bekannte Verfahren (Stitching) eingesetzt werden, mit denen Teilbilder anhand überlagernder Bildbereiche zu größeren Bildern zusammengefasst werden können, wenn diese Bildbereiche ausreichend unterscheidbare Strukturen aufweisen. Da ein Bild einer Blattoberfläche nicht mit voller Auflösung als Bilddatei gehandhabt werden kann, muss ein Verfahren angewandt werden, mit dem die Auflösung skaliert und aus der Bildserie jeweils anhand der Blattkoordinaten die darzustellenden Einzelbilder bestimmt und dargestellt werden. Diese Aufgabe kann jedoch erst konzipiert werden, wenn ein Koordinatensystem für die Blattoberfläche definiert und eine Zuordnung der Kameraposition zum Einzelbild möglich ist.

Bisherige Testläufe

Einige Messfahrten (vgl. Abb.5.1-5) auf einer ebenen, hell lackierten und mit Kratzern versehenen Testoberfläche verliefen erfolgreich. Die durch die Kombination aus Kamera, Optik und Beleuchtung gelieferte Bildqualität reicht für eine Weiterverarbeitung der Bilddaten aus.

Offene Probleme

Bisher offen sind folgende Fragen:

- Die Tragkraft des Roboters reicht nicht für Testläufe mit den zur Bildaufnahme installierten Komponenten aus. Um Gewicht einzusparen, könnte der Akku entfallen.

- Bei der Steuerung des Roboters besteht bisher keine Möglichkeit, eine Zielposition numerisch vorzugeben.
- Die Kameraposition (Länge ab Blattwurzel bzw. Kante, Drehlage) müsste bekannt sein, ein Konzept für die Kartierung eines Rotorblattes ist zu erstellen.
- Die Kamera muss bei der Bildaufnahme getriggert werden, d.h. von der Gecko-Steuerung muss ein Signal bereitgestellt werden, wenn die Kamera vibrationsfrei in Position ist.

5.2 Thermographische Prüftechnik

Die thermographische Untersuchungsmethode dient dazu Fehlstellen zu erkennen und zu analysieren. Hierbei wird das Untersuchungsobjekt einem Wärmeimpuls ausgesetzt (Abb. 5.1-1). Dieser verursacht eine Wärmefront, die in das Objekt eindringt, während die Oberfläche sich abkühlt. Wird die Ableitung der Wärme ins Objektinnere durch Fehlstellen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit behindert, bleibt die Oberfläche über der Fehlstelle länger warm. Dies kann im Thermographiebild erkannt und zur Erkennung der Fehlstellen ausgenutzt werden. 5.2.-2 zeigt als Beispiel Thermographiebilder eines einwandfreien (links) und eines defekten Bereiches (rechts) der Tragfläche eines historischen Segelflugeugs.

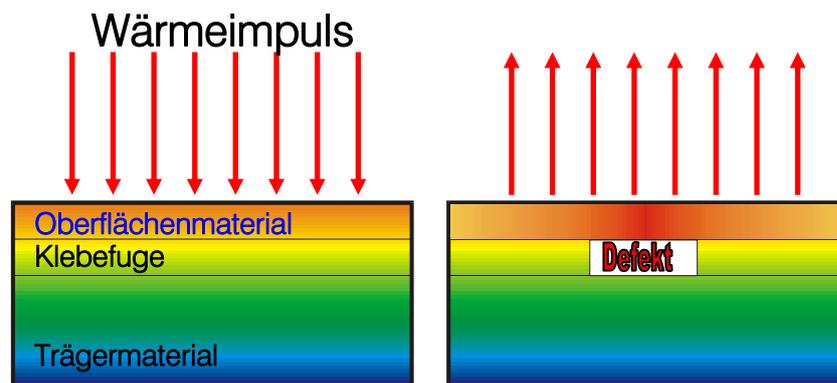


Abb. 5.1-1: Prinzip der aktiven Thermographie (Quelle: Wilhelm-Klauditz-Institut)

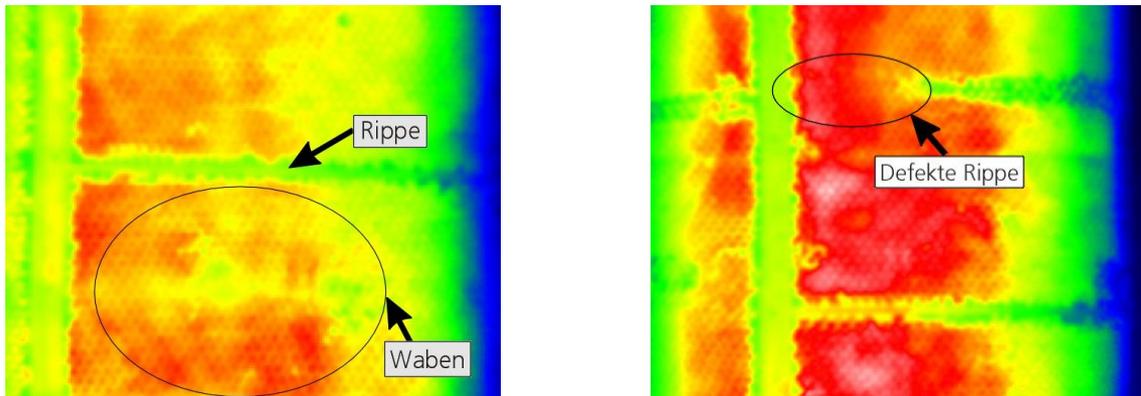


Abb.5.2-2: Thermographiebilder von Tragflächen eines historischen Segelflugzeugs (Quelle: Wilhelm-Klauditz-Institut)

Für den geplanten Einsatz der aktiven thermographischen Untersuchungsmethode am Rotorblatt ist es notwendig den zu untersuchenden Bereich entweder zu erwärmen oder abzukühlen. Entscheidend bei der Implementierung jeglicher Sensor- oder Kameratechnik auf der vorliegenden Roboterplattform ist natürlich die Gewichtsfrage. Die maximale Zuladung sollte 1000 Gramm nicht überschreiten. (Leider wurde dies bei der oben beschriebenen Prototypenentwicklung, der rein optischen Untersuchung durch das Wilhelm-Klauditz-Institut nicht berücksichtigt (4000 Gramm Zuladung) obwohl das reine Kameragewicht lediglich 50 Gramm betrug.)

Es war also die Aufgabe zu lösen einen sehr leichte Thermographiekamera, sowie ein Heiz- oder Kühlsystem geringen Gewichtes zu finden. Zudem musste die Energieversorgung der Kamera, sowie des Heiz- oder Kühlsystems geklärt werden.

Heiz- oder Kühlsystem:

Wegen der geringen möglichen Nutzlast des Roboters, des hohen Energieaufwandes und eventueller Brandgefahr scheidet Heizsysteme elektrischer oder chemischer Art aus. Die Entscheidung, eine Vortexkühlung zu nutzen, fiel aufgrund des geringen Gewichtes und der ohnehin schon vorhandenen Versorgungsenergie *Druckluft*. Nach Rücksprache mit verschiedenen Herstellern dieser Vortexkühler wurde ein passendes System gewählt. Weiterhin wurde ein Verteiler mit Gleichrichtern entwickelt, der eine möglichst homogene Verteilung der Kaltluft gewährleisten soll, die für aussagekräftige Ergebnisse der thermographischen Untersuchung nötig ist.

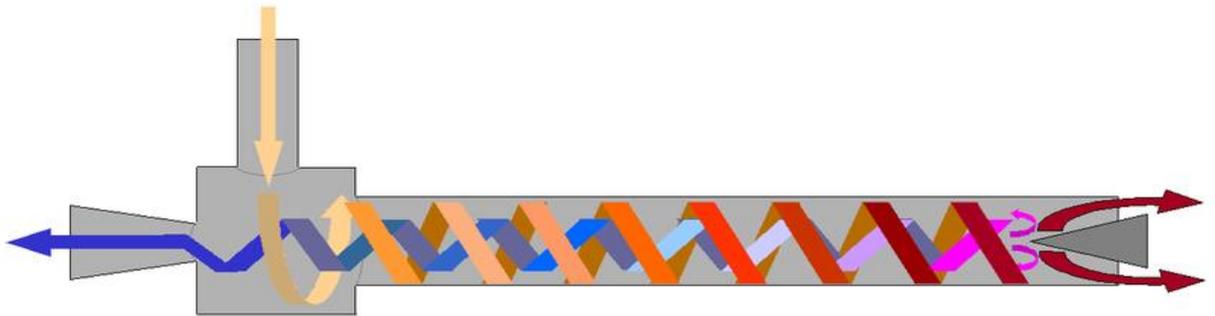


Abb.5.2-3: Die Funktionsweise der Vortexkühlung. Der tangentielle Lufteintritt erzeugt eine Wirbelströmung, welche am Kegel (rechte Seite) reflektiert wird. Hierbei entsteht eine weitere, konzentrische Wirbelströmung in entgegengesetzter Richtung. Die Expansion der Wirbelströmung erzeugt einen kalten Luftstrom mit ungefähr -20°C , an der rechten Seite entsteht ein heißer Luftstrahl mit ungefähr $+100^{\circ}\text{C}$.

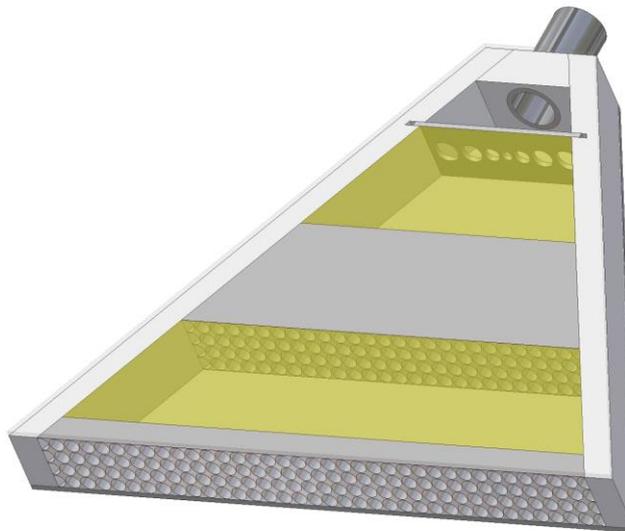


Abb.5.2-4: CAD-Modell des Diffusors mit Lochblech, Röhrenbündel und Fliesmaterial zur Gleichrichtung der Strömung (Quelle: Idaswind GmbH)

Thermographiekamera:



Abb.5.2-5 Thermographiekamera ThermoVision A10 der Firma Flir

Die Thermographiekamera ThermoVison A10 zeichnet sich durch:

- Sehr kompakte Bauweise :35x37x49 [mm]
- Geringes Gewicht :120 Gramm
- Geringen Energieverbrauch :1,5 W
- Temperaturempfindlichkeit : <0,085°C

6. Fortschritte auf dem Gebiet an anderen Stellen

Uns sind folgende andere Stellen bekannt, die sich mit ähnlichen Themen befassen:

6.1 Force Technology

(FORCE Technology Niels Jernes Vej 2-4, 9220 Aalborg Ø Denmark):

Bei diesem Vorhaben geht es um eine Art Scanner der das Rotorblatt befahren soll und mittels Ultraschalluntersuchung einen Zustandsbericht des Rotorblattes erstellen soll. Der hier gezeigte Scanner befindet sich nach unserer Kenntnis noch in der Konzeptionsphase.

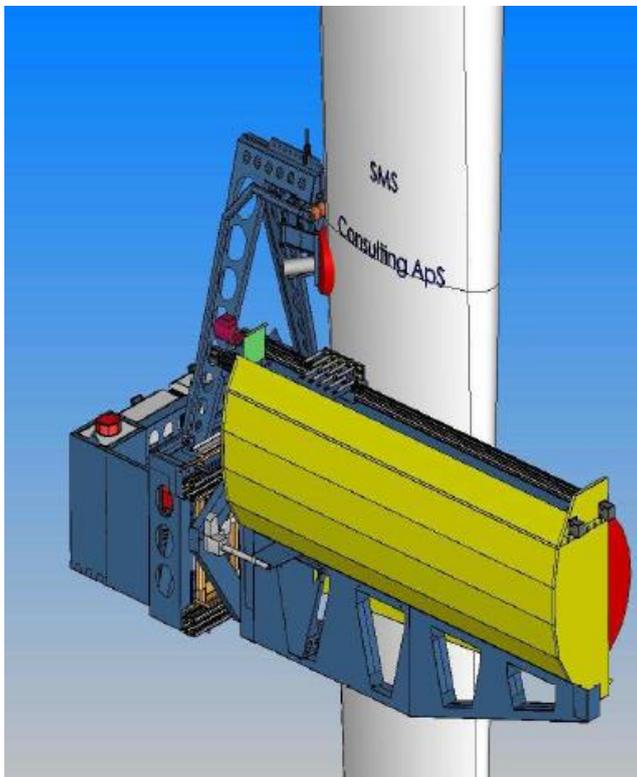




Abb 6.1-1 Konzept des Scanners zur Ultraschalluntersuchung

6.2. RIWEA

Innerhalb des Innonet – Programms wurde das Vorhaben:

Roboter zur Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Thermographie und Ultraschall (RIWEA) gestartet.

Projektpartner sind hier:

**Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb
und -automatisierung (FhG-IFF)**

www.iff.fraunhofer.de

Projektschwerpunkte:

Roboter, Trägersystem, Steuerung/Navigation,
Projektkoordination

Fraunhofer-Institut für Holzforschung (FhG-WKI)

www.wki.fraunhofer.de

Projektschwerpunkt:

Thermographieprüfsystem

**Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe
im Bauwesen (IWB)**

www.iwb.uni-stuttgart.de

Projektschwerpunkt:

Ultraschallprüfsystem

H&B Omega Europa GmbH

Projektschwerpunkte:

Konstruktion Trägersystem, Sicherheitsberechnungen,
Fertigungsplanung

TTI GmbH – TGU Smartmote

www.smartmote.de

Projektschwerpunkt:

Ultraschallprüfsystem

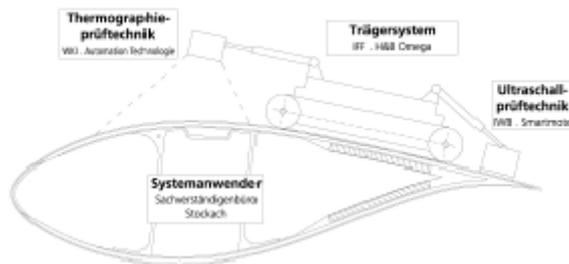


Abb.6.2-1: Konzept Roboters zur Rotorblattuntersuchung

Nach unseren Erfahrungen ist dieses Konzept nicht geeignet, um an der errichteten Windkraftanlage Untersuchungen vorzunehmen. Die Untersuchung kann aus Sicherheitsgründen in aller Regel nur am senkrecht nach unten hängenden Rotorblatt vorgenommen werden. Das in Abb. 6.2-1 gezeigte Konzept funktioniert augenscheinlich nur in horizontaler Blattanordnung. Es wurde dann bezüglich der Zugangstechnik auf herkömmliche Methoden zurückgegriffen. Solche Zugangsplattformen am Markt erhältlich.



Abb. 6.2.-2: Alternatives Konzept des RIWEA-Projekts zu der Roboterversion (vgl. Abb.6.2-1)



7. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Projektidee wurde erstmals auf der Dewek 2004 vorgestellt. Während der Projektlaufzeit wurde der jeweilige Entwicklungsstand im Jahr 2007 auf der LIGNA 2007, sowie im Jahre 2008 auf der Husumwind präsentiert. Eine weitere Veröffentlichung aus dem Jahre 2007 ist unter <http://www.umweltdienstleister.de/index.phtml?read=906> zu finden.

7.1 Dewek 2008

Auf der Dewek 2004 wurde von Jürgen Wagner die Projektidee in einem Vortrag im Rahmen der Session 1 - Monitoring & Quality vorgestellt.

7.2 Präsentation auf der LIGNA 2007

Auf der LIGNA 2007 wurde die Version 1.4 der Roboterplattform am Stand des Wilhelm-Klauditz-Instituts präsentiert. Die Präsentation stieß auf großes Interesse der Besucher und motivierte so auch das Entwicklungsteam.

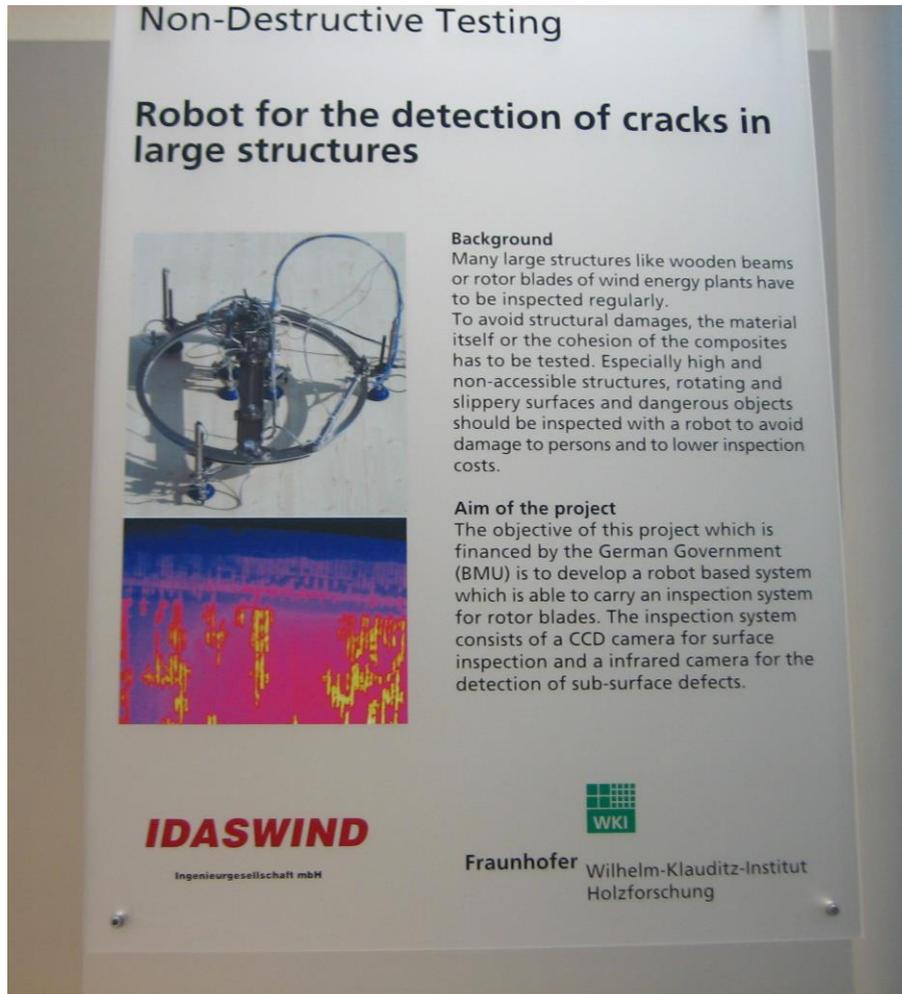


Abb.7.2-1: Präsentation des Systems auf der LIGNA 2007 (Quelle: Wilhelm-Klauditz-Institut)



Abb.7.2-2: Präsentation des Roboters auf der LIGNA 2007 (Quelle: Wilhelm-Klauditz-Institut)



IDASWIND GmbH

Prüfsystem für Rotorblätter - Abschlussbericht

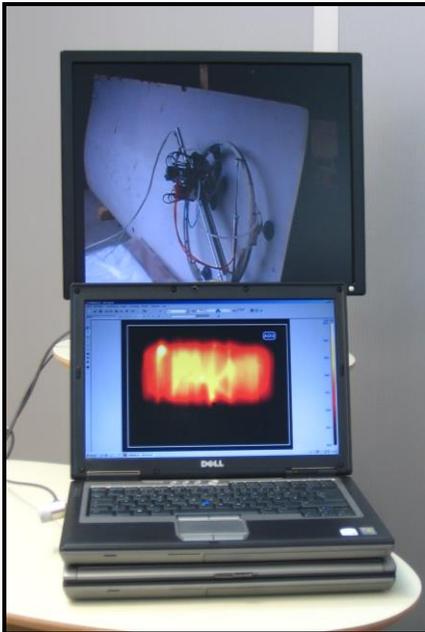


Abb.7.2 -3: Videopräsentation der Roboterplattform (Quelle: Wilhelm-Klauditz-Institut)

7.3 Präsentation auf der Husumwind 2008



Abb.7.3-1: Präsentation des Systems auf der Husumwind 2008 am Messestand des Wilhelm-Klauditz-Instituts. Videopräsentation der Version 1.4 und der Version 2 der Roboterplattform. (Quelle: Idaswind GmbH)



IDASWIND GmbH

Prüfsystem für Rotorblätter - Abschlussbericht

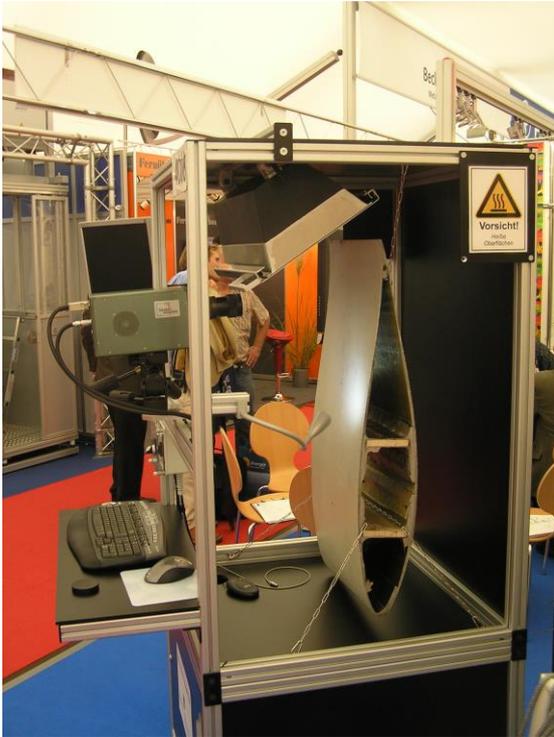


Abb.7.3-24: Messestand des Wilhelm-Klauditz-Instituts auf der Husumwind 2008.
Thermographische Untersuchung eines Rotorblattsegmentes. (Quelle: Idaswind GmbH)