

Herausforderungen in Design und Kalibration für hoch-präzise Mikroroboter für Spektroskopie Messungen von Galaxien

Luzius Kronig, Dr. Philipp Hörler, Prof. Hannes Bleuler, Prof. Jean-Paul Kneib, Dr. Mohamed Bouri
(EPFL Lausanne, Laboratoire de Systèmes Robotiques)

Der Nobelpreis für Physik ging 2011 an Saul Perlmutter, Brian Schmidt und Adam Riess für ihre 1998 publizierten Ergebnisse, die zweifelsfrei eine Beschleunigung der kosmischen Expansion nachweisen. Bis heute ist die Ursache dieser Beschleunigung völlig „im Dunkeln“. Sie wird daher einer noch unbekannteren „dunklen Energie“ zugeschrieben.

Ein erster Schritt, dieser dunklen Energie auf die Spur zu kommen, ist die Aufnahme einer genaueren 3-D Verteilung der fernen Galaxien. Dazu ist die Rotverschiebungs-Messung von Millionen schwach leuchtender (weil fernen) Galaxien notwendig. Ein Ausschnitt des Nachthimmels wird auf die Fokalebene eines erdbasierten Teleskops abgebildet. Um nun die Messung der Rotverschiebung durchzuführen, muss eine Glasfaser mit einer Genauigkeit von $\pm 5\mu\text{m}$ für ca. 10–15 Minuten Belichtung an die entsprechende Stelle der Fokalebene gehalten werden. Die Glasfaser leitet die eingefangenen Photonen der Galaxie weiter an einen Spektrographen, der das Lichtspektrum der Galaxie genau misst. Nach der Messung kann die Glasfaser auf eine neue Galaxie positioniert werden. Um mehrere Galaxien parallel zu vermessen wird versucht die Anzahl verwendeter Glasfasern zu maximieren.

Eine Möglichkeit, um das Platzieren von Glasfaserkabeln in der Fokalebene zu bewerkstelligen, ist der Gebrauch von SCARA-artigen Mikrorobotern. Diese Roboter haben zwei Rotationsaktuatoren für präzises Positionieren mit einem Roboterdurchmesser von nur 8-20mm je nach Teleskop. Das Positionieren der Glasfasern muss auf wenige Mikrometer genau geschehen. Normalerweise werden solche Genauigkeiten mit Hilfe eines präzisen Sensors (z.b. optische Encoder) am Wellenausgang der Aktuatoren erreicht. Für diese spezifische Anwendung mit geringen Platzverhältnissen existieren jedoch keine Sensoren mit einer genügend hohen Auflösung. Benötigt wird eine Winkelauflösung um die 0.02 grad bei einem Aktuoren-Durchmesser von nicht mehr als 4-6 mm. Die Positionsgenauigkeit wird daher mit Hilfe eines Reduktionsgetriebes realisiert. Das Reduktionsverhältnis erhöht nicht nur das Drehmoment, sondern reduziert auch Positionierfehler durch Streckung des Arbeitsbereiches zwischen Getriebeeingang und Wellenabgang. Getriebe haben jedoch verschiedene Nachteile sodass keine unendlich hohe Präzision erreicht werden kann. Die Positioniergenauigkeit ist limitiert u. a. durch ein nicht konstantes Reduktionsverhältnis, Spiel und Elastizität des Getriebes. Im Folgenden wird gezeigt wie durch Design, Regelung und Kalibrationsmethoden hohe Positioniergenauigkeiten erreicht werden können, ohne dass sperrige, hochauflösende Winkelsensoren benötigt werden.

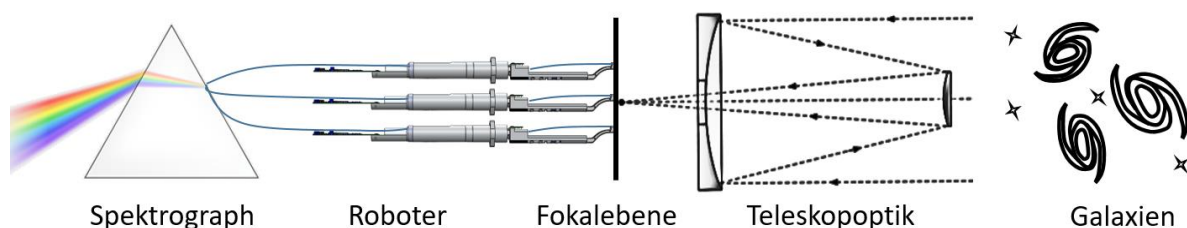


Abbildung 1: Lichtspektralmessungen von Galaxien

Design

Die Hauptanforderungen beim Design bestehen aus der absoluten Positioniergenauigkeit, der korrekten Ausrichtung der Glasfasern und der Einhaltung der maximalen Querschnittsfläche. Gute absolute Positioniergenauigkeit und Ausrichtung der Glasfasern sind unumgänglich um einen Lichtverlust zu minimisieren. Die normalerweise verwendeten Glasfasern haben einen lichtdurchlässigen Faserkern von ungefähr 100 μm wobei die zu messenden Galaxien, auf die Fokalebene projiziert, eine Grösse von ungefähr 80 bis 100 μm haben. Die x-y Positioniergenauigkeit der Fasern muss daher auf wenige Mikrometer genau sein. Ein Lichtverlust tritt auch auf durch Vignettierung. Dabei handelt es sich um den Ausrichtungsfehler der Glasfasern, welche zum gemeinsamen Fokalfunkt der Fokalebene zeigen müssen. Der Fehler der Faserausrichtung darf generell nicht grösser als 0.3 Grad betragen. Die Ausrichtung wird nicht aktiv gesteuert und muss daher durch sorgfältiges Design und Herstellung gewährleistet sein. Letztendlich ist darauf zu achten die Querschnittsfläche der Roboter klein zu halten, da die Anzahl der Fasern für eine fixe Grösse der Fokalebene gegeben ist. Die Fokalebene solcher Teleskope haben einen Durchmesser um die 1000mm mit einer Faserdichte zwischen 500 und 5000 Fasern pro Ebene. Der maximale Durchmesser p von Robotern bewegt sich daher zwischen nur 7 und 25 mm. In Zukunft wird sich die Faserdichte wahrscheinlich noch erhöhen und Roboter mit noch kleineren Querschnittsflächen werden benötigt.

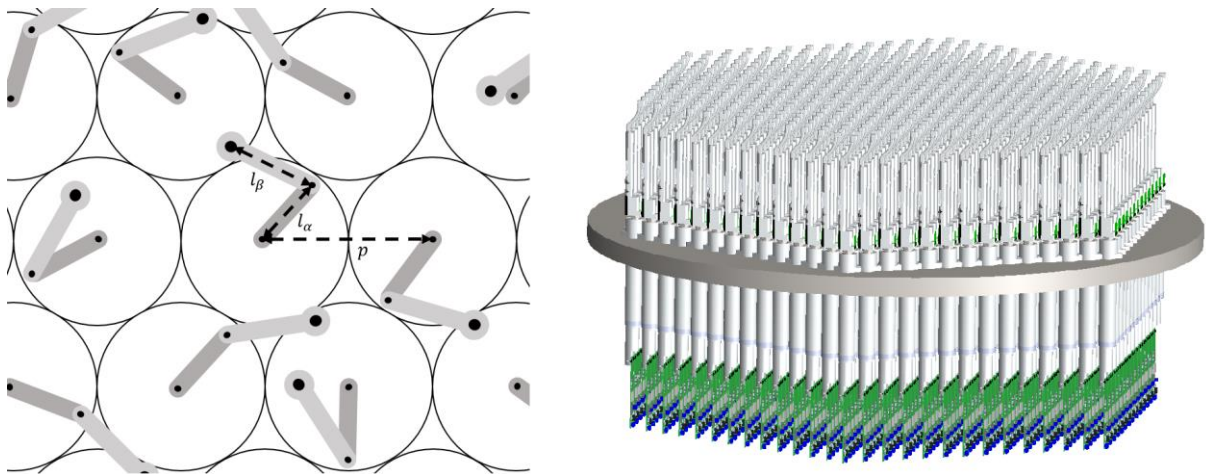


Abbildung 2 Links: Überlappung der Arbeitsbereiche, Rechts: Roboter in der Fokalebene

Abbildung 2 zeigt die Darstellung von den Robotern in der Fokalebene. Der Arbeitsraum der einzelnen Einheiten überlappt sich. Zwischen zwei Observations werden die Glasfasern auf neue Zielgalaxien gesteuert wobei darauf geachtet werden muss, dass die Arme nicht kollidieren. Da die Roboter in Durchmesser limitiert sind, wird der zur Verfügung stehende Platz in Länge ausgenutzt. Abbildung 3 zeigt den Querschnitt eines einzelnen Roboters. Die Glasfaser ist am zweiten Arm fixiert und verläuft mittig durch die hohle Rotationsachse des ersten Arms damit eine Krümmung der Faser soweit wie möglich minimiert werden kann. Zwei Bürstenlose Elektromotoren steuern die zwei Freiheitsgrade. Beide Rotationsachsen werden ausserhalb der Elektromotoren separat gelagert um die strikten Anforderungen der präzisen Faserausrichtung zu gewährleisten. Dabei werden die Kugellager so weit voneinander versetzt damit Fertigungstoleranzen einen vernachlässigbaren Einfluss auf die richtige Achsausrichtung haben.

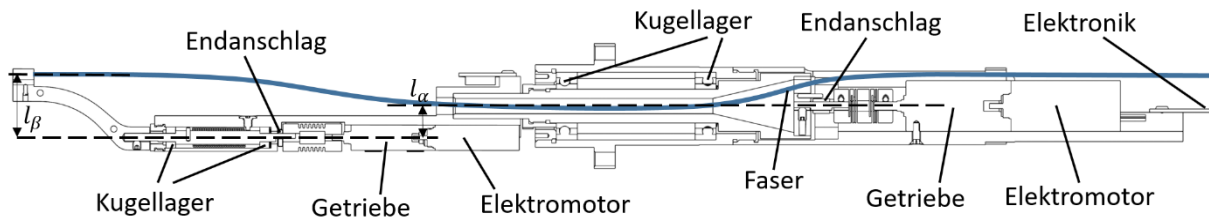


Abbildung 3 Querschnitt eines Roboters

Zusätzlich müssen die Kugellager vorgespannt werden um ein taumeln zu verhindern damit die Rotationsachsen möglichst kresirund drehen (siehe Abbildung 4). Während der Belichtungszeit einer Beobachtung stehen die Roboter still. Dagegen bewegt sich das Teleskop und korrigiert die Erdrotation was eine Verschiebung des Gravitationsvektors mit sich führt. Der ganze Roboter ist daher so steif wie möglich konstruiert um eine Biegung des Roboters durch Eigengewicht oder durch das Ziehen der Faser zu minimieren.

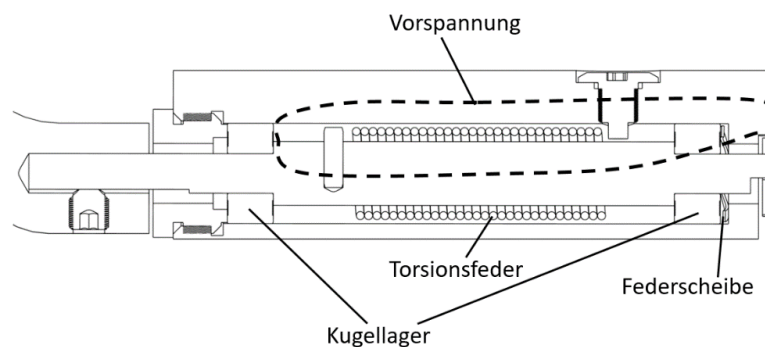


Abbildung 4: Detailansicht für die Lagerung einer Rotationsachse mit Spielreduktion

Hoch präzise Positionssteuerung wird normalerweise erreicht durch genaue Sensoren wie z.B. Interferometer. Zudem wird normalerweise versucht Coulomb Reibung zu Reduzieren um ein Stick-slip Effekt vermieden. Dies ist möglich mit flexiblen Lamellen oder mit Luft und Magnetlagern. Es ist bei dieser Anwendung jedoch wegen der geringen Platzverhältnissen weder möglich solche Aktuatoren noch Sensoren mit genügend hoher Auflösung zu verwenden. Für eine genügende Präzision werden deshalb Reduktionsgetriebe verwendet. Diese Getriebe haben jedoch gewisse Nachteile wie ein nicht konstantes Reduktionsverhältnis, Spiel und Elastizität. Diese Elemente müssen in Design und Regelung berücksichtigt werden. Das Reduktionsverhältnis des Getriebes wird so gewählt damit eine genügende Präzision erreicht wird. Zum Beispiel wird bei einer Motorencoderauflösung von 5 grad und mit einer geforderten Präzision am Wellenabgang von 0.01 grad ein Reduktionsverhältnis von mindestens 500:1 benötigt. Des Weiteren wird das Getriebe so gewählt, dass es durch die extern wirkenden Kräfte mithilfe der internen Reibung nicht rückwärtsfahrbar ist. Dies ist erforderlich da die Roboter während der Galaxienbeobachtung ausgeschaltet sind und kein Haltemoment liefern. In einem ersten Schritt wird schon während dem Design das Spiel des Getriebes soweit wie möglich reduziert. Dabei gibt es drei verschiedene Vorgehensweisen (Abbildung 5).

- Die einfachste Möglichkeit ist ein Spiel reduziertes Getriebe zu verwenden. Spiel-reduzierte Getriebe für diese Anwendungen besitzen meist zwei parallel Laufende Stirnradgetriebe die mit Hilfe eines gemeinsamen Eingangs und Abgangszahnrad gegeneinander verspannt werden. Dies sorgt für eine Torsionsspannung durch das ganze Getriebe welches das Spiel minimiert. Der Vorteil dieser Methode ist eine konstante Torsionsspannung durch das gesamte Getriebe.

- Eine zweite Möglichkeit ist die Verwendung einer Torsionsfeder. Da der Arbeitsbereich nicht grösser als eine volle Umdrehung beträgt ist es möglich am Wellenausgang eine Torsionsfeder zu verwenden. Ein Nachteil der Torsionsfeder ist neben dem limitierten Arbeitsbereich auch dass die Torsionsspannung nicht durch das ganze Getriebe aufrechterhalten werden kann. Da das Getriebe per Design nicht rückwärtsfahrbar ist, reduziert die Torsionsfeder das Spiel nicht für die allerersten Etagen des Getriebes. Eine Kombination aus Reibung und Abschwächung des Momentes durch die Untersetzung bewirkt das die Torsionsspannung nur für die letzten Zahnradetagen wirkt. Das Moment der Torsionsfeder muss grösser sein als die extern wirkenden Kräfte und Momente um sicher zu gehen, dass die Position des Getriebeabgangs nicht im Totgang zu liegen kommt.
- Die dritte Möglichkeit ist die Verwendung eines Reibungselements. Ein Element wird an den Wellenabgang gedrückt und erzeugt so Couloumb Reibung welche auch in diesem Fall höher sein muss als die extern wirkende Kräfte und Momente. Die Reibung vermindert kein Spiel an sich, sie erzeugt jedoch ein Haltemoment und verhindert so das sich die Zielposition bewegen kann während der Belichtungszeit. Der Nachteil von zusätzlichen Reibungselementen besteht in möglichem Abrieb welcher das Teleskop kontaminieren könnte.

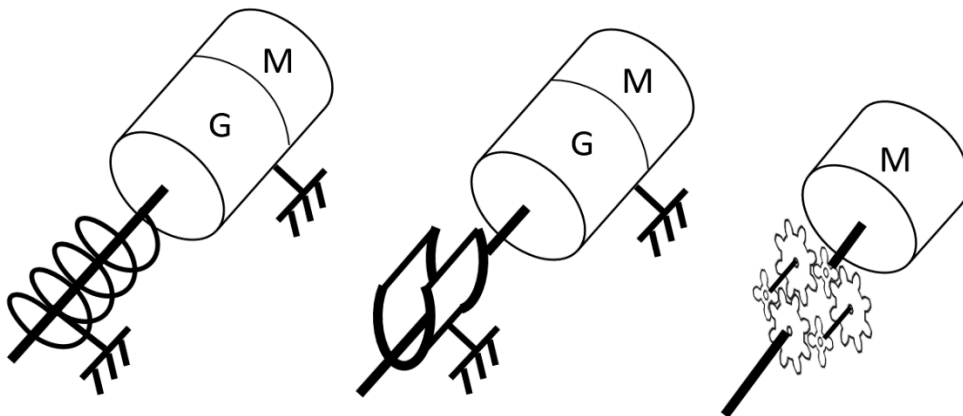


Abbildung 5 Spielreduktion Links: Torsionsfeder, Mitte: Reibungselement, Rechts: Getriebe

Encoder auf der Motorenseite werden benötigt um die exakte Position der Faser zu berechnen. Die Encoder sind jedoch nur absolut für eine Umdrehung auf Motorenseite. Um den ganzen Arbeitsbereich zu messen wird daher ein Zähler verwendet der sich erhöht oder verkleinert bei jeder Umdrehung des Motors. Als Sicherheit, falls die Anzahl Umdrehungen z.B. durch plötzlichen Stromausfall verloren geht, wird ein Initialisierungsmechanismus eingebaut. Dabei werden die Achsen des Roboters auf eine bekannte Referenzposition gefahren und der Zähler auf null gesetzt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten für die Realisierung der Referenzposition. Die einfachste Variante ist ein mechanischer Endanschlag. Dabei wird die Rotationsachse in den Endanschlag gesteuert dabei steigt das benötigte Drehmoment des Motors abrupt an. Dieser Anstieg wird gemessen und somit ist die Roboterkonfiguration bekannt und der Zähler kann initialisiert werden. Es ist wichtig, dass das Getriebe dabei nicht beschädigt werden kann. Eine andere Variante die Referenzposition zu finden ist der Gebrauch von Optischen, Elektrischen oder Tastsensoren. Abbildung 6 zeigt zum Beispiel ein Tastschalter der ausgelöst wird sobald der Roboter auf eine Stahlkugel fährt und somit den Schalter drückt. Die benötigte Präzision für die Bestimmung der Referenzposition ist geringer

als die Verlangte Präzision am Wellenausgang, da nur die Position der Rotationsachse auf Motorenseite bestimmt werden muss. Die Repetibilität der Referenzposition muss daher kleiner sein als eine Umdrehung auf Motorenseite.

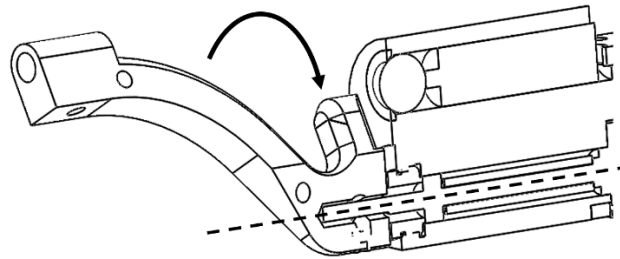


Abbildung 6 Tastschalter für die Kalibration der Referenzposition

Kalibration

Die Grundbedingung für die präzise Positionsregelung ist eine gute Positionswiederholbarkeit von nicht mehr als 0.02 Grad. Des Weiteren muss jeder einzelne Roboter kalibriert werden da z.B. die Armlängen auf wenige Mikrometer genau bekannt sein müssen. Dafür wird ein eigens dafür entwickelter Prüfstand verwendet, welcher die genaue Position und Ausrichtungswinkel der Faserspitze messen kann. Abbildung 7 zeigt die Funktionsweise des Prüfstand. Ein Roboter wird fixiert und mit einer Single-Mode-Faser ausgestattet welche mit einem Laser beleuchtet wird. Der aus der Faser tretende Lichtkegel wird mit zwei Kameras gemessen. Die erste Kamera misst die exakte x-y Position der Faserspitze und die zweite Kamera misst mit Hilfe einer Fokallinse den Austrittswinkel des Lichtkegels. Die x-y Positionsmessungen werden für die Kalibration benötigt. Mit dem Messen des Austrittswinkels wird die korrekte Faserausrichtung und somit auch die richtigen Rotationsachsenausrichtungen der Achsen überprüft.

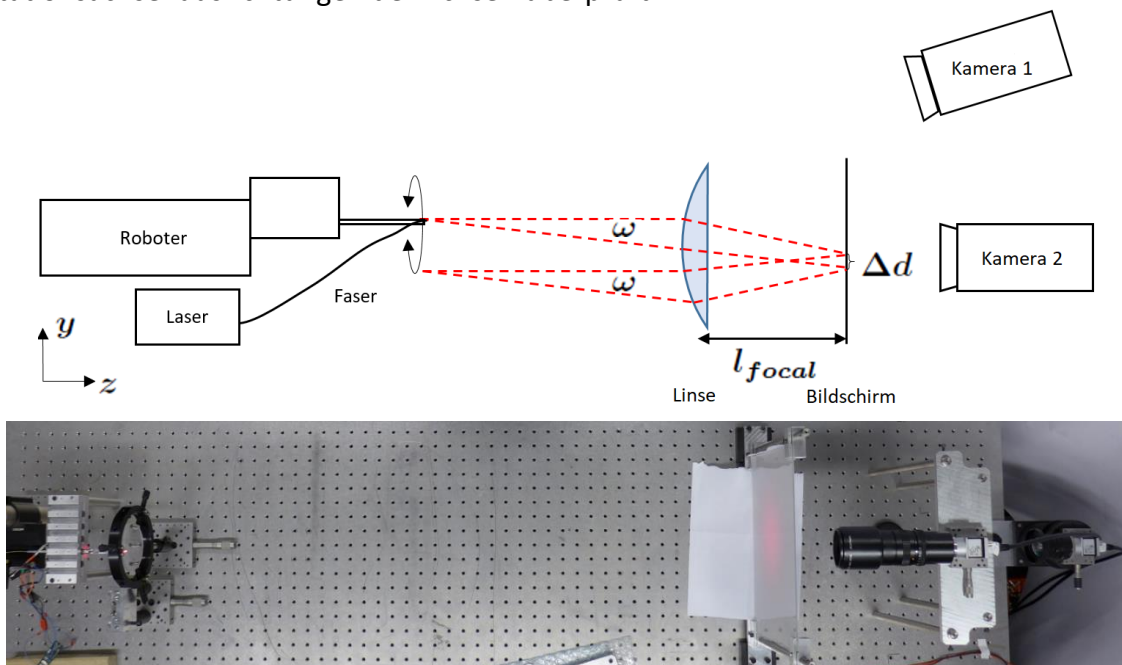


Abbildung 7 Optischer Prüfstand [6]

Für die Kalibration werden mehrere Positionsmessungen für verschiedene Motorpositionen durchgeführt. Zuerst wird die Referenzposition angefahren um die Kalibrationsmessung in der Initialposition zu starten. Dann werden die Achsen an vordefinierte Motorpositionen gesteuert wo Faserposition und Winkel gemessen wird. Die angesteuerten Motorpositionen

entsprechen eigenständigen Kreisen für beide Rotationsachsen. Entweder wird die Alpha-achse bewegt mit fixierter Beta-Achse oder Umgekehrt (Abbildung 8).

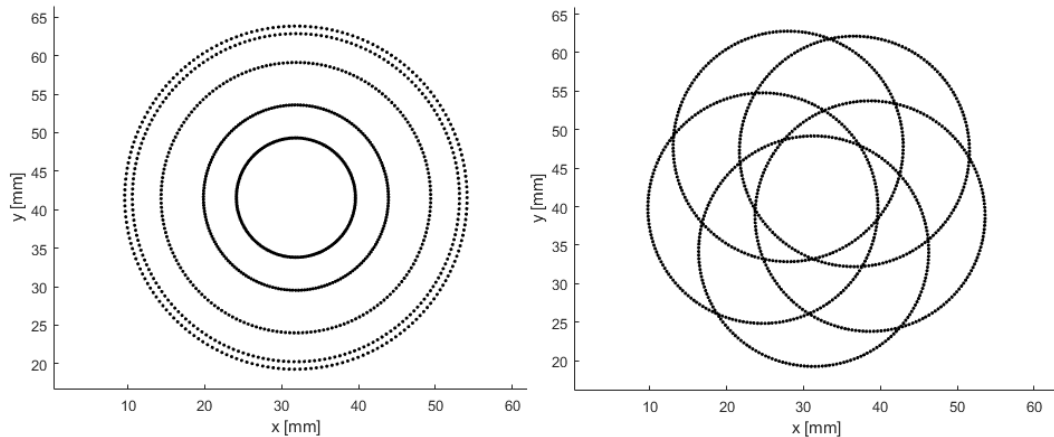


Abbildung 8 Gemessene Positionen für die Kalibration links: alpha achse dreht rechts: beta achse dreht, 200 Punkte pro Kreis

Der Roboter wird mit einem simplen Starrkörpermodell angenähert. Das Modell welches die Position der Faser r_{tot} in der x-y Ebene beschreibt wird durch die folgende Gleichung wiedergegeben und auf Bild 9 dargestellt. Wobei l_α und l_β die Armlängen sind, x_c und y_c sind die Mittelpunktskoordinaten und die Winkel α und β sind schliesslich die Ausgangswinkel der Getriebe.

$$r_{totx} = x_c + l_\alpha \cdot \cos(\alpha + \alpha_{off}) + l_\beta \cdot \cos(\alpha + \alpha_{off} + \beta)$$

$$r_{toty} = y_c + l_\alpha \cdot \sin(\alpha + \alpha_{off}) + l_\beta \cdot \sin(\alpha + \alpha_{off} + \beta)$$

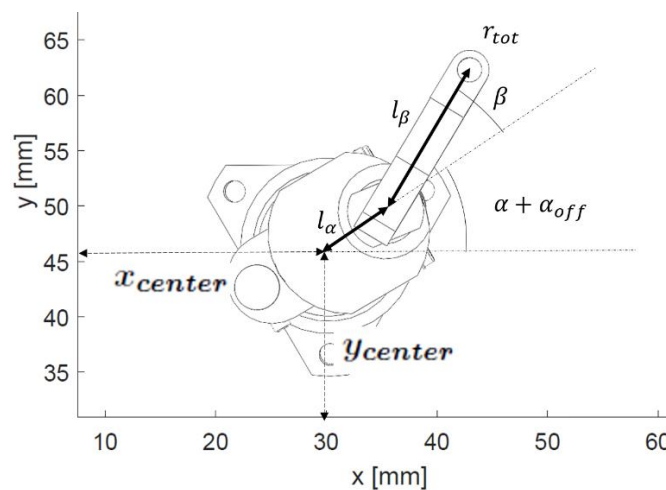


Abbildung 9 Roboter Draufsicht [6]

Die Parameter des Starrkörpermodells können mit Hilfe der gemessenen Punkte r_{meas_i} und eines numerischen Optimierungsalgorithmus gefunden werden:

$$\min_{x_c, y_c, l_\alpha, l_\beta, \alpha_{off}} \left\| \begin{matrix} r_{tot1} - r_{meas1} \\ \dots \\ r_{toti} - r_{measi} \end{matrix} \right\|_2^2$$

Wie schon erwähnt wird die Positionsgenauigkeit mit dem Reduktionsgetriebe realisiert. Das Verhältnis zwischen Getriebeeingang α_{motor} und Ausgang α entspricht jedoch leider nicht $\alpha = k \cdot \alpha_{motor}$. Das Getriebe besitzt u.a. ein nicht konstantes Reduktionsverhältnis k , Spiel und Elastizität. Abbildung 10 zeigt ein mögliches Modell des Getriebes. Das Modell ist in

hohem Masse nicht linear und besitzt viele unbekannte Parameter welche nicht alle bestimmt und kalibriert werden können.

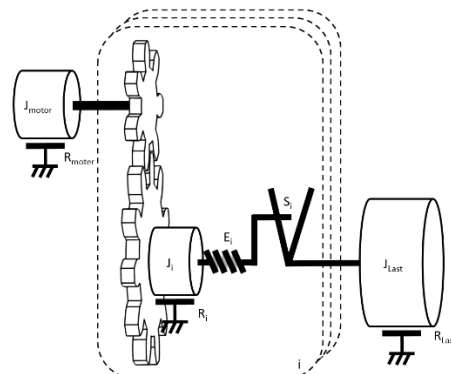


Abbildung 10 Getriebemodell

Unverzichtbar ist jedoch, dass sich ändernde Reduktionsverhältnis $k(\alpha)$ zu kalibrieren. Eine konstante Untersetzung ist gegeben, wenn die Eingriffslinie der Zahnräder eine nicht verschiebbare Gerade ist. Zwei Hauptwirkungen für ein nicht-konstantes Untersetzungsverhältnis wurden identifiziert. Zum einen besitzen die hergestellten Zahnräder nicht ein perfektes Evolventen-Zahnprofil was dazu führt, dass die Eingriffslinie von einer Geraden abweicht. Ausserdem kann jede Zahnpaarkombination ihre eigene verschiedene Eingriffslinie besitzen. Die zweite Ursache für eine sich ändernde Untersetzung ist das der Grundkreisradius eines Zahnrades nicht konstant bleibt über eine volle Umdrehung. Ursachen sind Fertigungsfehler welche sich in einer wobbelnde (eiernde) Rotationsachse des Zahnrades oder nicht kreisrunden Zahnräder manifestieren. Die Folge ist, dass sich die Eingriffslinie während einer Umdrehung verschiebt.

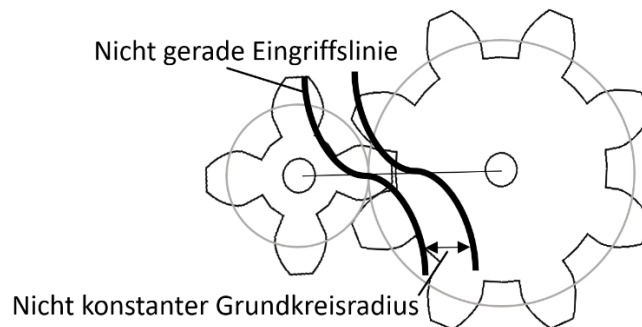


Abbildung 11 Effekte für ein nicht kontantes Reduktionsverhältnis

Abbildung 11 zeigt eine Skizze der beiden Effekte. Das Untersetzungsverhältnis k hängt somit von der Motorenposition ab α und besteht aus der Summe der zwei Effekte für alle Zahnräder des Getriebes. Die nicht konstante Untersetzung wird als die Abweichung von der Durchschnittsuntersetzung kalibriert und wird im Folgenden als Untersetzungskorrektur benannt:

$$\alpha = k \cdot \alpha_{motor} + \delta(\alpha)$$

$$\beta = k \cdot \beta_{motor} + \delta(\beta)$$

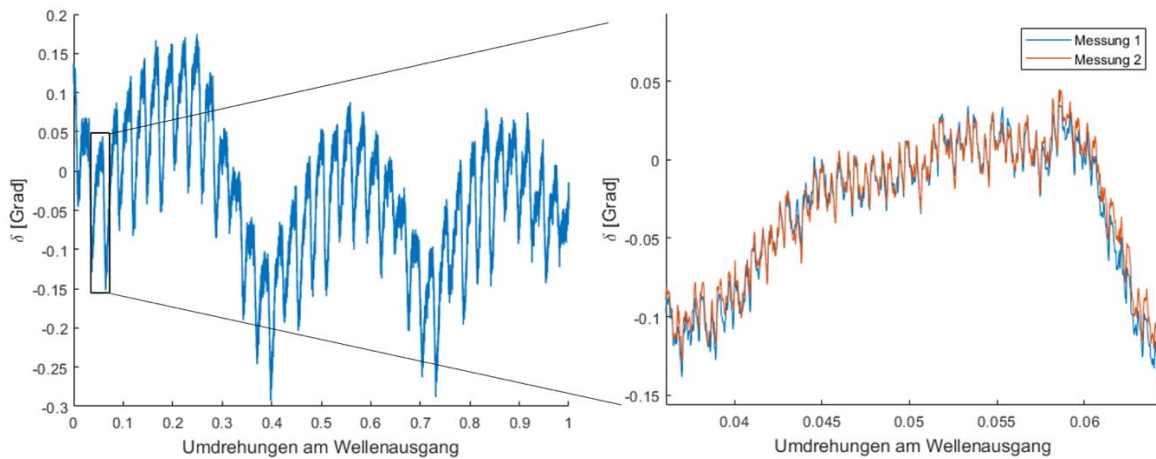


Abbildung 12 Untersetzungskorrektur eines Planetengetriebes für eine Umdrehung am Wellenausgang

Für eine ganze Umdrehung des Getriebeabgangs dreht sich jedes Zahnrad n mal und somit wiederholt sich der Effekt eines nicht runden Grundkreisradius auch n mal. Unter Annahme, dass sich die Eingriffslinien eines Zahnpaars ähneln wiederholt sich der Effekt des Zahnprofils $n \cdot z$ mal für eine Umdrehung am Getriebeabgang wobei z die Anzahl Zähne pro Zahnrad ist. Die Amplitude der Untersetzungskorrektur für jedes Zahnrad wird kleiner je weiter es vom Getriebeabgang ist, da die Amplitude durch das Untersetzungsverhältnis der nachfolgenden Zahnräder verkleinert wird. Bei konstanten Fertigungstoleranzen ist daher der Einfluss des letzten Zahnrades am grössten. Die Untersetzungskorrektur wird für jede Achse einzeln bestimmt, da für die Kalibration eigenständige Kreise abgefahren werden. Abbildung 12 zeigt als Beispiel die gemessene Untersetzungskorrektur von einem 6mm Planetengetriebe. Der Einfluss der 36 Zähne des letzten Zahnrades sind leicht zu erkennen. Es ist zu beachten, dass die Untersetzungskorrektur bis zu 0,3 Grad betragen kann und daher unbedingt kalibriert werden muss um die gewünschte Genauigkeit von 0,05 Grad zu erreichen. Mithilfe einer Frequenzanalyse lässt sich eruieren welches Zahnrad wie viel zur Untersetzungskorrektur beiträgt (Abbildung 13). Auf der Abbildung ist zu sehen wie die Amplitudenspitzen den jeweiligen Zahnrädern zugewiesen werden können.

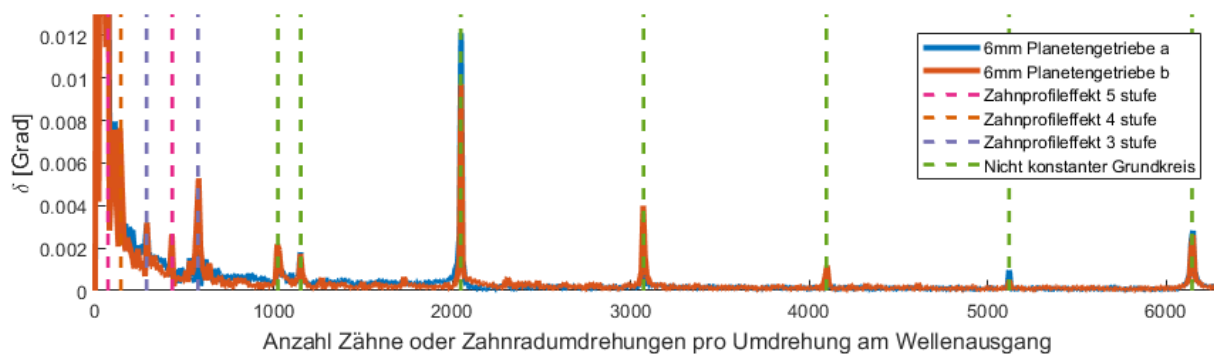


Abbildung 13 Frequenzanalyse der Untersetzungskorrektur

Wenn man den Elektromotor an eine gewisse Encoder-Position steuert und dann die Position des Wellenabgangs misst, so stellt man fest, dass sie Position nicht nur von der aktuellen Encoder-Position abhängt, sondern auch von dessen Anfahrtsverlauf. Dies kann man sich einfach durch das Spiel im Getriebe erklären. Das Spiel besteht auch dann, wenn das Haltemoment durch Reibung oder Torsionsfeder die Ausgangsposition konstant hält, da ein Restspiel in den ersten Untersetzungsstufen des Getriebes verbleibt. Hier wird der Begriff Hysterese verwendet für den Winkelunterschied am Ausgang für eine Motorenposition mit entgegengesetzten Anfahrtswegen. Um die gewünschte Wiederholgenauigkeit zu erreichen

muss daher darauf geachtet werden, dass die Anfahrwinkel der Motoren eine monoton steigende (oder fallende) Funktion besitzen und der Anfahrwinkel grösser als die maximale Hysterese ist. Hysterese besteht jedoch auch dann noch wenn ein Getriebe mit kompletter Spielreduktion benutzt wird (Abbildung 5 rechts). Der Grund hierfür liegt an einem Zusammenspiel von Reibung und Elastizität wie auf Abbildung 14 ersichtlich ist.

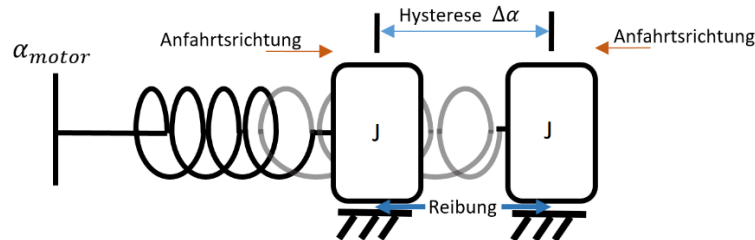


Abbildung 14 Hysterese durch Elastizität und Reibung

Wie beim Untersetzungsverhältnis hängt die Hysterese von der Position der Rotationsachse ab. Die Elastizität zwischen Getriebeeingang und Ausgang hängt zum Beispiel davon ab ob wie die Zahnräder ineinandergreifen. Abbildung 15 zeigt die gemessene Hysterese eines Spielreduzierten 6mm Getriebes. Die Elastizität sowie die Untersetzungskorrektur sind wiederholbar. Die Reibung ist jedoch abhängig von verschiedenen Faktoren wie Drehgeschwindigkeit, Schmierung, Temperatur usw. Es ist daher essentiell die Torsionssteifigkeit des Getriebe so hoch wie möglich zu halten um den Einfluss der Reibung und externen Drehmomente auf die Hysterese so klein wie möglich zu machen. Höhere Steifigkeit kann z.B. durch eine adäquate Materialauswahl oder Härtebehandlung der Zahnräder erreicht werden.

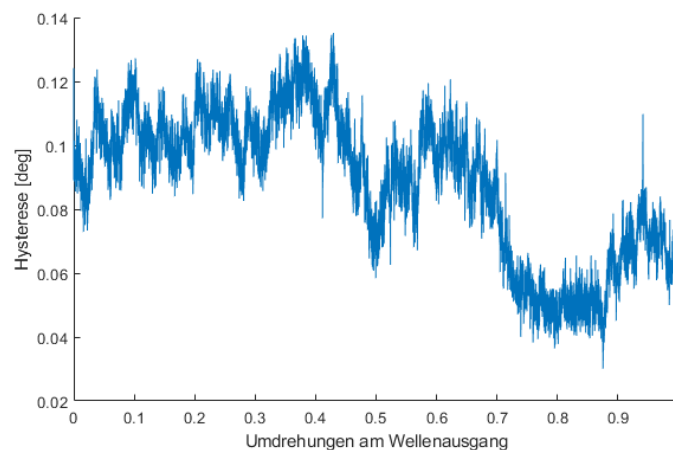


Abbildung 15 Hysterese für ein 6mm Planetengetriebe mit Torsionsfeder

Regelung

Jede Rotationsachse wird mit einem 3 Phasen Bürstenlosen Gleichstrommotor betrieben. Jede der drei Phasen wird mit einer Pulsdauermodulation (PWM) so angesteuert, dass ein rotierendes elektrisches Feld entsteht. Der Permanentmagnet des Rotors richtet sich nach dem Magnetfeld aus. Die Einschaltdauer eines Zyklus wird wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
 PH_A &= |v_{field}| \cdot 0.5 \cdot (1 + \sin(\alpha_{field})) \\
 PH_B &= |v_{field}| \cdot 0.5 \cdot (1 + \sin(\alpha_{field} + 120^\circ)) \\
 PH_C &= |v_{field}| \cdot 0.5 \cdot (1 + \sin(\alpha_{field} + 240^\circ))
 \end{aligned}$$

Wobei $|v_{field}|$ die Stärke des Magnetfeldes ist und α_{field} seine Ausrichtung (siehe Abbildung 16 links). Das PWM Signal wird somit in t_{feld} und t_{halt} eingeteilt (Abbildung 16 rechts). Die Länge der Wartezeit t_{halt} regelt die Stärke des Magnetfeldvektors v_{field} .

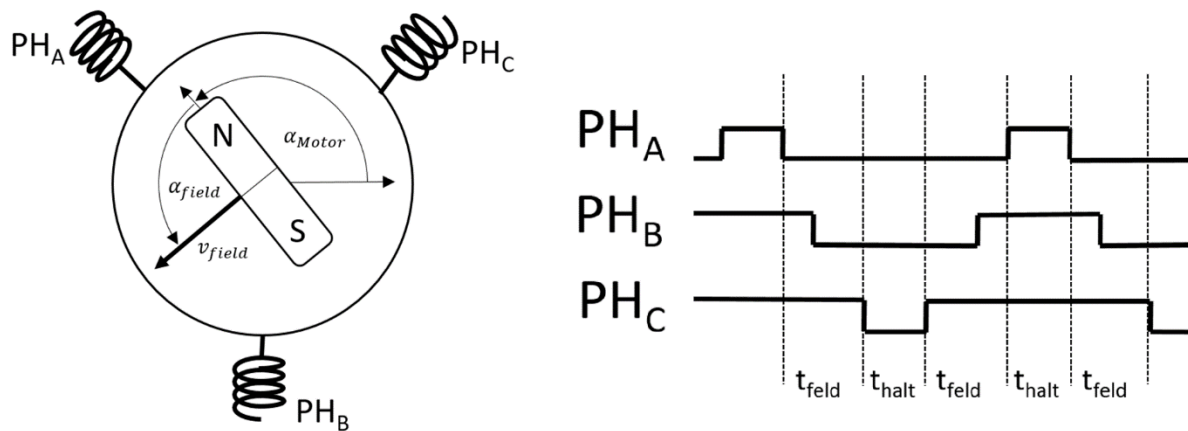


Abbildung 16 Vektorsteuerung von Bürstenlosen Gleichstrommotoren

Die Motoren können nun entweder in «open» oder «closed loop» angesteuert werden. Mit «open loop» Steuerung richtet sich der Magnet des Motors stets dem Magnetfeldvektor aus und es wird angenommen das $\alpha_{field} \approx \alpha_{motor}$. Dies funktioniert gut da die Massenträgheit auf der Motorenseite sehr klein ist und da das Drehmoment M welches auf den Motor wirkt vom Winkel zwischen generierten Feld und Magnet abhängt $M = v_{field} \times v_{motor}$. Ein Nachteil der «open loop» Steuerung ist, dass sehr viel Energie in Wärme verloren geht. Für eine ideale Steuerung beträgt die Winkeldifferenz zwischen Magnet und generiertem Feld 90 Grad. Bei der «closed loop» Steuerung wird diese optimale Winkeldifferenz mit Hilfe eines Encoders eingehalten. Dazu wird ein simpler PID Regler verwendet welcher die Differenz zwischen Regelungs-Sollwert α_{motor} und gemessene Ausrichtung $\tilde{\alpha}_{motor}$ minimiert:

$$M = f_{PID}(\alpha_{motor} - \tilde{\alpha}_{motor})$$

$$|v_{field}| = |M|$$

$$\alpha_{field} = \alpha_{motor} + \text{sign}(M) \cdot 90^\circ$$

Jeder Roboter erhält eine vorausberechnete Bewegungsbahn $r_{tot}(t)$ welche dann mit der inversen Kinematik in Rotationssteuerbefehle ($\alpha(t)$, $\beta(t)$) umgerechnet wird. Bevor diese mit dem PID Regler abgefahren werden kann, muss sie noch in Koordinaten auf der Motorenseite umgewandelt werden mit Berücksichtigung der Untersetzungskorrektur:

$$\alpha_{motor} = 1/k (\alpha - \delta(\alpha))$$

$$\beta_{motor} = 1/k (\beta - \delta(\beta))$$

Bei der Erstellung der Bewegungsbahn ist darauf zu achten, dass es zu keinen Kollisionen zwischen den einzelnen Robotern kommt. Ausserdem muss die Bahn so berechnet werden, dass die letzte Annäherungsstrecke bevor Stillstand die Anfahrtsrichtung nicht ändert um nicht im Spiel der Hysterese zu stoppen. Dabei wird eine monoton steigende (oder fallende) Anfahrtsstrecke gewählt. Für die «closed loop» Steuerung werden die PID Regelparameter so berechnet, dass das resultierende System überdämpft ist und es somit zu keiner Überschwingung kommen kann.

Zusammenfassung

Die Erforschung der dunklen Energie führt zu interessanten Problemstellungen in der Mechatronik, um präzise spektroskopische Messungen durchzuführen. Kleine SCARA Roboter positionieren Glasfasern mit Mikrometer-Genauigkeit in der Fokalebene eines Teleskopes. Design, Kalibration und Regelung müssen sorgfältig durchgeführt werden um die Anforderungen zu erfüllen. Dabei müssen die Auswirkungen von Fertigungstoleranzen, Elastizität, Hysterese und Spiel beachtet und minimiert werden.

Literatur

- [1] Perlmutter, S. et al: *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae*. The Astrophysical Journal, Volume 517, Number 2. (1999), S. 565– 586.
- [2] Fahim N.: *An 8-mm diameter Fiber Robot Positioner for Massive Spectroscopy Surveys*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 450, no. 1, pp. 794–806, Apr. 2015.
- [3] Schubnell M et al: The DESI fiber positioner system, Proc.SPIE (2016)
- [4] Hörler P et al: A 24mm diameter fibre positioner for spectroscopic surveys, Proc.SPIE (2016)
- [5] Hörler P et al: High density fiber positioner system for massive spectroscopic surveys, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2018
- [6] Kronig L. et al: Design and performances of an optical metrology system to test position and tilt accuracy of fiber positioners, Proc.SPIE (2018)
- [7] Jenni L. et al: *Developing micro DC-brushless motor driver and position control for fiber positioners*, Proc. SPIE 9147 (2014), S. 914744–914744–7.
- [8] Makarem L., et al: Collision-free motion planning for fiber positioner robots: discretization of velocity profiles. Proc. SPIE 9152 (2014), 91520Q–91520Q– 10.
- [9] Makarem L., et al: Collision avoidance in nextgeneration fiber positioner robotic systems for large survey spectrographs, A&A, Volume 566, no. A84, June 2014
- [10] Cirasuolo M., et al: *MOONS: the Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph for the VLT*, 2014, vol. 9147, p. 91470N–91470N–13.
- [11] Fisher C., et al: *Developing engineering model Cobra fiber positioners for the Subaru Telescope's prime focus spectrometer*, 2014, vol. 9151, p. 91511Y–91511Y–13.
- [12] McConnachie A., et al: *The Maunakea Spectroscopic Explorer: the science driven design rationale* SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2014.

Herausforderungen in Design und Kalibration für hoch-präzise Mikroroboter für Spektroskopie Messungen von Galaxien

Kronig, Luzius Gregor; Hörler, Philipp; Bleuler, Hannes; Kneib, Jean-Paul; Bouri, Mohamed

In: IFToMM D-A-CH Konferenz / Fünfte IFToMM D-A-CH Konferenz 2019

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt.

Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: <https://doi.org/10.17185/duepublico/48212>

URN: <urn:nbn:de:hbz:464-20190222-123109-5>

Link: <https://duepublico.uni-duisburg-essen.de:443/servlets/DocumentServlet?id=48212>

Lizenz:

Sofern nicht im Inhalt ausdrücklich anders gekennzeichnet, liegen alle Nutzungsrechte bei den Urhebern bzw. Herausgebern. Nutzung - ausgenommen anwendbare Schrankenregelungen des Urheberrechts - nur mit deren Genehmigung.