Induktive Energieübertragung in eine kryogene Umgebung

Design und Charakterisierung einer drahtlosen Energieübertragungsstrecke für den Betrieb einer Greiferaktorik

Yves Olsommer[1*], Philipp Jahn[2],
Annika Raatz[2], Frank R. Ihmig[1]

[1] Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik IBMT, Abteilung für Stammzell- und Kryotechnologie, Joseph-von-Fraunhofer-Weg 1, 66280 Sulzbach/Saar, Deutschland
yves.olsommer@ibmt.fraunhofer.de, frank.ihmig@ibmt.fraunhofer.de

[2] Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
jahn@match.uni-hannover.de, raatz@match.uni-hannover.de

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

In der Forschung und Industrie ist die Automatisierung allgegenwärtig und findet ihren Weg in immer mehr hochspezialisierte Anwendungen - einschließlich der Kryokonservierung. Dennoch ist die manuelle Handhabung von biologischen oder toxischen Proben in wissenschaftlichen und kommerziellen Lagereinrichtungen immer noch vorherrschend. Dies bedingt für das Personal ein erhebliches Verletzungsrisiko durch Kälteverbrennungen. Darüber hinaus wird die Unversehrtheit der Proben durch Temperaturschwankungen oder Verunreinigungen gefährdet. In diesem Beitrag stellen wir einen Ansatz für die Automatisierung von Handhabungsprozessen bei tiefen Temperaturen zwischen -130 °C und -190 °C in Kryobanken vor. Das Automatisierungssystem basiert auf einem Parallelroboter, da seine Struktur die Positionierung der Antriebe außerhalb des gekühlten Arbeitsraums erlaubt. Die Gelenke und Manipulatoren des Roboters befinden sich innerhalb des kroygenen Lagerbehälters, der mit flüssigem Stickstoff gekühlt wird. Die Energieversorgung der kryotauglichen Greiferaktorik im Inneren des Lagerbehälters erfolgt induktiv. Zu diesem Zweck wurden Varianten von Spulendesigns und deren Anordnung mit der FEM-Software ANSYS unter Einbeziehung von applikationsspezifischen Randbedingungen modelliert. Die Dimensionierung der Schwingkreise wurde mit Berechnungen in Mathcad ergänzend durchgeführt. Die entwickelte Greiferaktorik lässt sich in flüssigem Stickstoff mit einem Wirkungsgrad von etwa 86% bei einem Spulenabstand von 9,5 cm und noch mit etwa 10% Wirkungsgrad bei einem Spulenabstand von 33,5 cm betreiben.

Stichwörter:

Kryorobotik, Kryoautomatisierung, Biobanken, Festkörpergelenke, Parallelkinematik, drahtlose Energieübertragung

DKV - Peer Review

Eingegangen am 26.08.2022
Geprüft am 24.09.2022
Angenommen am 24.09.2022

Von Experten aus Forschung und Industrie

1 Einleitung

Die Kryokonservierung von biologischem Material umfasst in den heutigen Forschungs- und Produktionseinrichtungen eine große Menge von Herausforderungen, besonders bei der Tieftemperaturhandhabung der Proben. Einerseits stellt die manuelle Handhabung von biologischen oder toxischen Proben eine erhebliche Gefahr für die Mitarbeitenden durch Kälteverbrennungen oder den Kontakt mit gefährlichen Stoffen dar. Andererseits birgt die Handhabung das Risiko, die Integrität und Qualität der Proben durch Temperaturschwankungen oder Kontamination zu beeinträchtigen.

Der technische Fortschritt bei der Langzeitlagerung selbst ermöglicht hingegen Lagerkapazitäten von mehr als einer Million Proben pro Behälter. Diese Fortschritte machen die Probenlagerung wirtschaftlicher, aber die enorm steigende Anzahl von Probenröhrchen kann nicht mehr allein durch manuelle Tätigkeiten effizient und sicher bewältigt werden [1]. Es gibt verschiedene Ansätze, Teile des Handhabungsprozesses mit Hilfe von Gasschleusen und seriellen Roboterstrukturen zu automatisieren [2]. Ein vollständig automatisiertes Handhabungssystem in einer kryogenen Umgebung fehlt jedoch. In diesem Beitrag wird ein neuer Ansatz für eine vollständige Automatisierung von Handhabungsvorgängen in einem Lagerbehälter vorgestellt, bei dem ein nachgiebiger Parallelroboter mit passiven Kardangelenken und mit drahtloser Energieversorgung der kryogenen Greiferaktorik zum Einsatz kommt.

2 Anforderungen und Beschreibung der technischen Plattform

Das Konzept des vorgestellten Parallelroboters unterliegt aufgrund der extremen Arbeitsumgebung Einschränkungen geometrischer und materialwissenschaftlicher Natur. In früheren Arbeiten wurden parallele kinematische Strukturen mit Hilfe von evolutionären Algorithmen wie der Partikelschwarmoptimierung und ähnlichen Strategien untersucht [3]. Dabei wurde eine parallelkinematische Deltastruktur mit vertikalen Antrieben in Form von Elektrospindeln mit passiven Kardangelenken als am besten geeignet ermittelt. Die Kardangelenke selbst stellen nachgiebige Mechanismen aus monolithischen Festkörpergelenken (FKG) dar. Mit den zuvor durchgeführten Simulationen und Optimierungen wurde festgestellt, dass ein individueller maximaler Biegewinkel von 30° notwendig ist, um die FKG in die Roboterstruktur zu implementieren. Die Herausforderung dabei war die geringe Beweglichkeit der monolithischen Gelenke im Vergleich zu herkömmlichen Drehgelenken und der bisher unerforschte Einfluss von tiefen Temperaturen auf deren Verformungsverhalten.

Für die Herstellung der Gelenke musste zum einen ein für die extremen Einsatzbedingungen geeigneter Werkstoff gefunden werden. Zum anderen war eine an die Aufgabenstellung angepasste Gelenkgeometrie notwendig, um die gewünschten Biegewinkel unter den kryogenen Bedingungen zu erreichen und gleichzeitig ein ausreichend steifes Verhalten entlang und um die parasitären Achsen (alle Achsen, die nicht mit der primären Biegeachse identisch sind, werden als parasitär betrachtet) zu gewährleisten. In [4] konnten wir mit Simulationen und Testszenarien zeigen, dass FKG aus der Titanlegierung TiAl6V4 die erforderlichen Biegewinkel unter kryogenen Bedingungen ohne bleibende Verformung erreichen können.

Der Aufbau einer der drei identischen kinematischen Ketten der Parallelroboterkonstruktion ist in Bild 1 dargestellt. Die einzelne kinematische Kette besteht aus einem oberen (Bild 1a) und einem unteren (Bild 1b) nachgiebigen Kardangelenk, die durch zwei parallele Führungsstangen (1) verbunden sind. Das obere Kardangelenk ist über eine Kupplungsstange (2) mit der Kolbenstange des Linearantriebs verbunden. Das untere Kardangelenk ist über einen Winkel (4) mit der Endeffektorplattform (3) verschraubt. Die Gelenke der ersten Biegeachse (5, rot) und der zweiten Biegeachse (6, grün) sind durch den Winkel α=31,23° miteinander verschränkt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Gelenke der ersten Achse in der Ausgangsstellung des Endeffektors nicht ausgelenkt werden und die Gesamtkonstruktion somit weitgehend spannungsfrei ist. Der Winkel α sorgt dafür, dass das Gelenk der ersten Achse maximal ausgelenkt werden kann, ohne dass es zu Kollisionen innerhalb der Konstruktion kommt. Außerdem hat das Gelenk nur so einen symmetrischen bidirektionalen Biegewinkel zur Ausgangsstellung des Endeffektors.

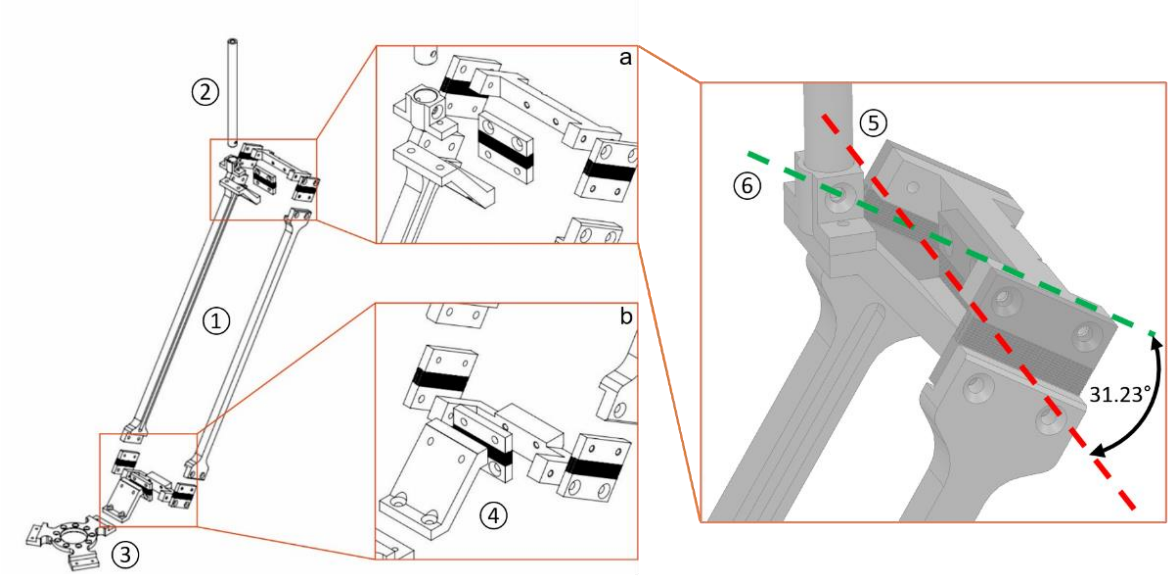

Bild 1: Einzelne kinematische Kette: (a) oberes Kardangelenk; (b) unteres Kardangelenk

Der Gesamtaufbau des Parallelroboters (Bild 2) besteht aus insgesamt drei identischen Kinematikketten. Diese sind jeweils in einem Winkel von 120° versetzt angeordnet. Die Kinematikketten sind am unteren Ende mit der Endeffektorplattform verbunden. Am oberen Ende ist die jeweilige Kupplungsstange mit der zugehörigen Kolbenstange des Linearaktors verschraubt. Diese sind über Gleitlager im Deckel (7) des Kryobehälters gelagert. Die drei Linearantriebe (8) erzeugen die translatorische Antriebsbewegung. Sie sind über eine Motorhalterung mit dem Deckel des Kryobehälters verschraubt und werden zusätzlich oben durch einen Rahmen (9) verbunden. Dadurch wird sichergestellt, dass sie während des Betriebs vertikal ausgerichtet bleiben. Der Greifer (10) wird mit seinem zylindrischen Träger von unten in die Endeffektorplattform eingesetzt und anschließend von oben verschraubt. Im unteren Bereich des Kryobehälters sind gemäß Bild 2 rechts zwei Micronic 96er Probenracks (11) und ein Barcodescanner (12) zur Probenidentifikation aufgestellt. Diese Anordnung definiert den Arbeitsraum des Roboters. Die gesamte Roboterstruktur hat eine bewegte Masse von etwa 1800 g.

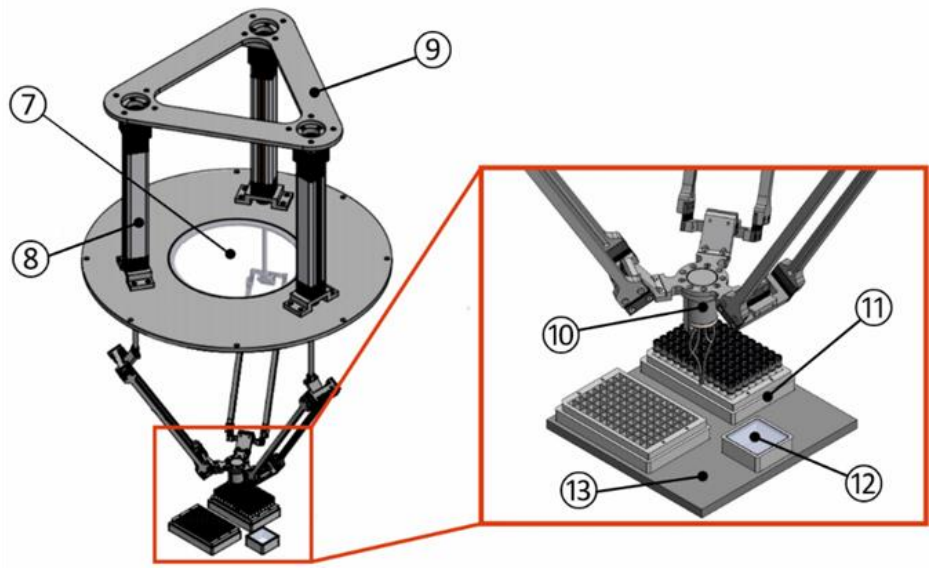

Bild 2: Vollständiger parallelkinematischer Roboter mit Antrieben, Scanner und Probenracks

Die schlanke Struktur der kinematischen Ketten und des Endeffektors sorgen so für eine deutlich höhere Dynamik des Systems. Gezeigt ist hier die parallele Roboterstruktur in ihrer Ausgangsposition. Die Spitze des Endeffektors befindet sich zentriert über den mit Probenröhrchen bestückten Lagerracks. Der Arbeitsbereich (13) ist ein Quadrat von 200 x 200 mm. Der Endeffektor selbst besteht aus einer monolithischen Greifzange mit nachgiebigem Mechanismus, einem Elektromagneten als Aktor und integrierter Steuerelektronik. Das realisierte Funktionsmuster arbeitet energieeffizient bei tiefen Temperaturen. Die digitale Regelung sorgt für eine konstante Bestromung des Aktors, indem das Tastverhältnis in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur angepasst wird [5].
Erste Konzeptideen für eine drahtlose Energieübertragung in eine kryogene Umgebung wurden in [6] beschrieben. Eine drahtlose Energieübertragung ist gefordert, weil herkömmliche kabelgebundene Lösungen eine Wärmebrücke bilden und zu einem nicht vernachlässigbaren Wärmeeintrag in das tiefkalte System führen. Weitere Nachteile von Kabelverbindungen sind beispielsweise der Platzbedarf für die Verlegung und Durchführung, der Verschleiß durch Alterung sowie die eingeschränkte Beweglichkeit. Eine besondere Anforderung besteht hier zusätzlich in der Überbrückung größerer Distanzen, um Energie vom Raumtemperaturbereich in den kryogenen Arbeitsbereich zu übertragen. In diesem Beitrag berichten wir über die Modellierung für den Systementwurf, die Realisierung eines Funktionsmusters zur induktiven Energieversorgung des entwickelten Kryo-Greifers sowie erste Ergebnisse zur Erprobung und Charakterisierung in kryogener Umgebung.

3 Modellierung und Simulation

3.1 Entwurf der induktiven Energieübertragung

Im Rahmen des Systementwurfs wurden zunächst Varianten von Spulengeometrien und deren Anordnung im kryogenen Arbeitsraum mit der FEM-Software ANSYS 2019 R3 (ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA) modelliert. Das Simulationsmodell besteht aus drei Gebieten, die von einem Behälter aus Edelstahl umhüllt sind (Bild 3). Oberhalb des Teflon- und unterhalb des Stickstoffgebietes ist der Behälter offen. Die Wandstärke des Behälters beträgt 5 mm und der Innendurchmesser liegt bei 60 cm.

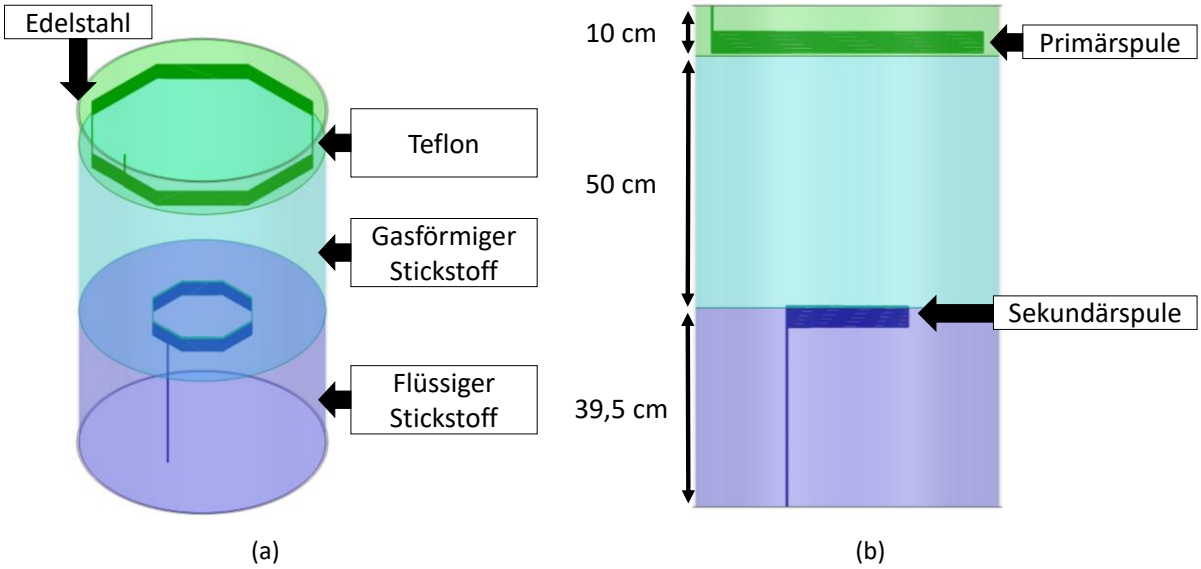

Bild 3: Spulenanordnung in ANSYS (Modul Maxwell 3D): (a) Darstellung der unterschiedlichen Medien; (b) Darstellung der Primär- und Sekundärspule, sowie der Dicke des Teflon-, gasförmigen Stickstoff- und flüssigen Stickstoffgebietes

Die Spulen verfügen über die elektrischen Eigenschaften von Kupfer und wurden in ANSYS als „stranded“ definiert, wodurch die Skin- und Proximity-Effekte in der Modellierung vernachlässigt werden (homogene Verteilung der Stromdichte). Im gesamten Simulationsmodell gelten natürliche und Neumann-Randbedingungen. Die Kopplungsfaktoren wurden bei einer Frequenz von 375 kHz und jeweils für Anordnungen mit Zylinder- oder Flachspulen mit und ohne Resonator sowie für eine kreisförmige Anordnung von vier primärseitigen Flachspulen und

einer sekundärseitigen Flachspule berechnet und vergleichend analysiert. Die Berechnungen wurden jeweils für verschiedene Abstände zwischen den Spulen und im Falle der vier primärseitigen Flachspulen für verschiedene Neigungswinkel durchgeführt.
Aus den untersuchten Varianten der Spulengeometrien und ihren Anordnungen wurde die Variante bestehend aus zwei Flachspulen und einem optionalen Resonator zur Realisierung eines möglichst effizienten induktiven Energieübertragungssystems ausgewählt. Die berechneten Kopplungsfaktoren waren für diese Variante am höchsten. Ergebnisse wurden für einen Abstand von 10 cm und 50 cm zwischen der Primär- und Sekundärspule berechnet. Der Resonator lag äquidistant zwischen den beiden Spulen. Es resultierten Kopplungsfaktoren zwischen der Primärspule und dem Resonator von 17,33% bzw. 0,51%, zwischen dem Resonator und der Sekundärspule von 5,08% bzw. 0,80% und zwischen der Primär- und Sekundärspule von 3,33% bzw. 0,03%.
Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die Anordnung der Flachspulen mit einem Abstand von 10 cm tiefergehend untersucht. Um den praktischen Aufbau eines Labormusters zu vereinfachen, wurde der Resonator zunächst als Sekundärspule betrieben, so dass ein Energieübertragungssystem bestehend aus zwei Flachspulen resultierte.

3.2 Berechnungen zum Wirkungsgrad

Für die gewählte Anordnung erfolgte die Berechnung der Induktivitäten und Kapazitäten der Schwingkreise mit dem Ziel, einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Bei einer Temperatur von -196 °C sinkt der spezifische Widerstand von reinem Kupfer etwa um das 9-fache[7]. Da eigene Messungen jedoch zeigten, dass die frequenzabhängigen Ohm'schen Verluste einer Spule bei dieser Temperatur dennoch größer als bei Raumtemperatur sein können, wurden die Skin- und Proximity-Effekte für diese Berechnungen berücksichtigt [6].
Der praktische Aufbau eines Labormusters war notwendig, um die Berechnungen von Kopplungsfaktor und Wirkungsgrad mit Messungen zu vergleichen. Die primär- und sekundärseitige Spule wurde mit der Kupferlitze CLI-S 100/90 bestehend aus 90 umsponnenen lackisolierten Einzeldrähten mit einem Durchmesser von 0,1 mm realisiert. Beide Spulen wurden auf einer ca. 30 x 30 cm^2 großen Platte aus PVC befestigt. Die Primärspule besteht aus 75 Windungen und hat einen Außendurchmesser von 27,1 cm sowie einen Innendurchmesser von ca. 5,9 cm. Die Sekundärspule besteht aus 12 Windungen und hat einen Außendurchmesser von 26,9 cm sowie einen Innendurchmesser von ca. 23,7 cm. Im Messaufbau (Bild 4) wurde der primärseitige Reihenschwingkreis mit dem Signalgenerator 33120A (Hewlett-Packard, Palo Alto, CA, USA) und dem Verstärker PA1011 (Rigol Technologies, Inc., Suzhou, China) mit einem sinusförmigen Signal betrieben. Zur Ermittlung des Wirkungsgrades wurde mit der StromzangeTCP0020 (Tektronix, Inc., Beaverton, USA) und dem Tastkopf TT-MF312-2-6 11020-2-6 (TESTEC Elektronik, GmbH, Frankfurt) der Strom und die Spannung am Ausgang des Verstärkers gemessen. Ebenso wurde die Spannung an der ohmschen Last am sekundärseitigen Parallelschwingkreis gemessen. Die Signale wurden mit einem Oszilloskop MDO4104-6 von Tektronix gemessen und mit der Software OpenChoice Desktop von Tektronix auf einen Rechner exportiert.
Der Kopplungsfaktor wurde bei Raumtemperatur und bei einer Frequenz von 375 kHz für verschiedene Abstände (9,2 cm, 13,2 cm, 17,2 cm) zwischen der Primär- und Sekundärseite messtechnisch ermittelt (18,2%, 10,7%, 6,7%). Der Wirkungsgrad wurde sowohl bei Raumtemperatur, als auch mit dem in flüssigen Stickstoff eingetauchten sekundärseitigen Schwingkreis gemessen. Der sekundärseitige Lastwiderstand wurde mit 10 Ω, 51 Ω, 100 Ω, 510 Ω und 1000 Ω variiert. Bild 5 zeigt beispielhaft die Messergebnisse für einen Lastwiderstand von 10 Ω und 510 Ω. Bei einem Lastwiderstand von 510 Ω und 1000 Ω wurde für alle drei Abstände ein Wirkungsgrad von über 70% erreicht, die besten Werte lagen sogar über 90%. Bei den niedrigeren Lastwiderständen sind jedoch geringere Abstände notwendig, um Wirkungsgrade im Bereich von 70% zu erreichen. Bei einem Lastwiderstand von 10 Ω konnte bei einem Abstand von 9,2 cm ein maximaler Wirkungsgrad von 29,3% bei Raumtemperatur und 30,9% in flüssigem Stickstoff erreicht werden. Bei allen Messergebnissen zeigte sich für die Energieübertragung zur tiefkalten Sekundärseite keine Verschlechterung des Wirkungsgrades im Vergleich zum Betrieb bei Raumtemperatur.

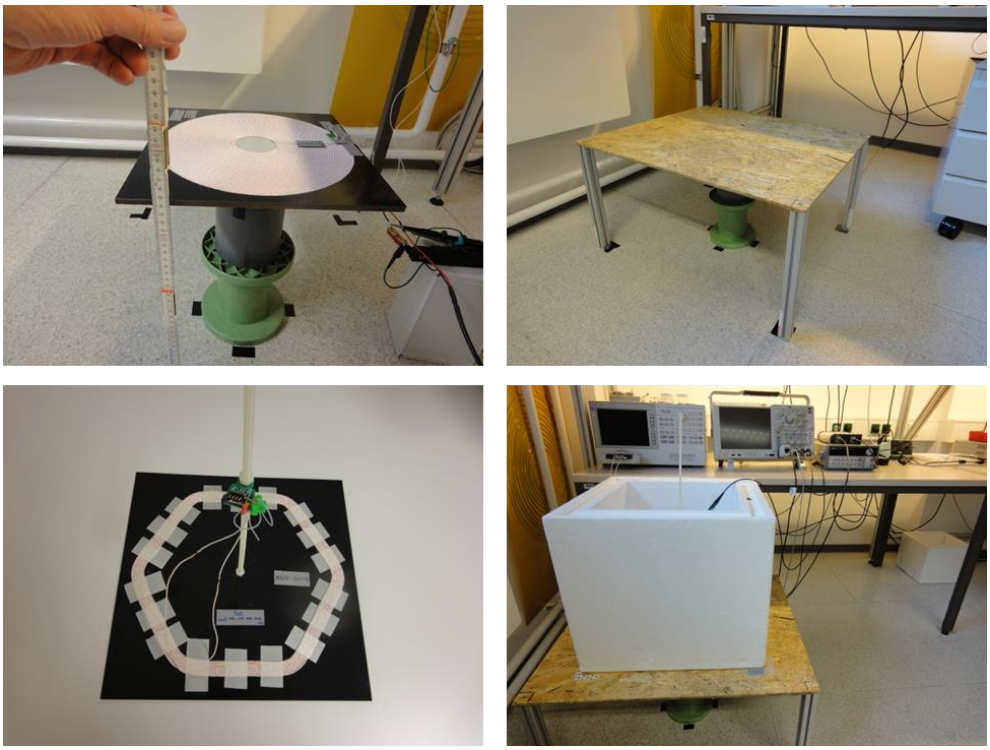

Bild 4: Messaufbau des Labormusters: Primärseitiger Serienschwingkreis (oben links) und Holzplatte (oben rechts) zur Platzierung des sekundärseitigen Parallelschwingkreises (unten links) in einem Styroporbehälter mit flüssigem Stickstoff (unten rechts)

Das induktive Energieübertragungssystem wurde ebenfalls mittels der zugehörigen Differentialgleichungen in Mathcad Prime 3.1 (PTC, Boston, MA, USA) modelliert. Die Bauteile des primärseitigen Reihenschwingkreises, bestehend aus der Induktivität L_1, dem Verlustwiderstand R_1 und der Kapazität C_1 sowie die des sekundärseitigen Parallelschwingkreises L_2, R_2 und C_2 wurden mit dem Präzisionsimpedanzanalysator 4294A (Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, PA, USA, 4294A R1.11 Mar 25 2013) über einem Frequenzbereich von 100 kHz bis 500 kHz gemessen und in Mathcad als Funktion der Frequenz dargestellt, mit dem Ziel die Genauigkeit der Berechnungen zu erhöhen. Während die Bauteile L_1, R_1 und C_1 bei Raumtemperatur gemessen wurden, erfolgte die Messung der Bauteile L_2, R_2 und C_2 sowohl bei Raumtemperatur als auch im flüssigen Stickstoff.

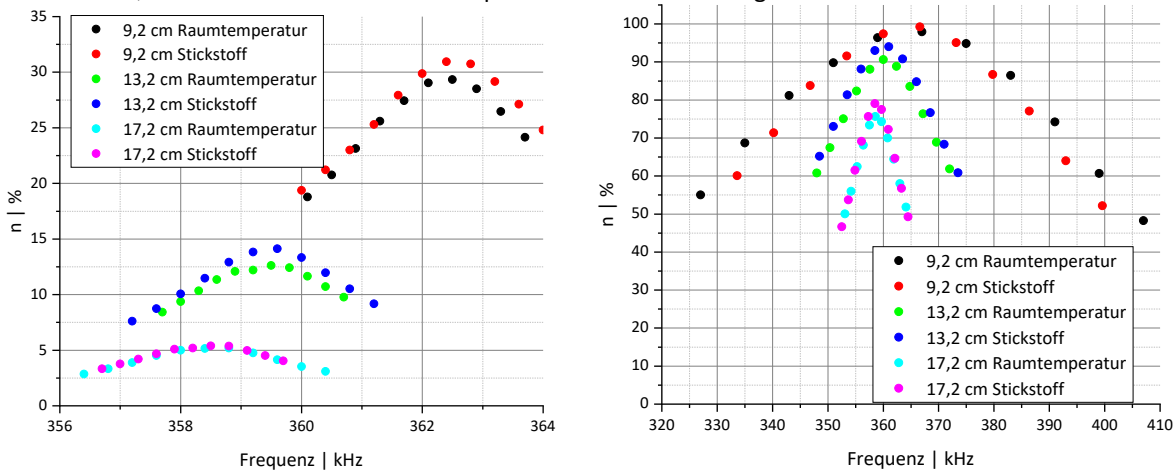

Bild 5: Gemessener Wirkungsgrad n in Abhängigkeit der Frequenz für einen Abstand von 9,2 cm, 13,2 cm und 17,2 cm zwischen der primär- und sekundärseitigen Spule. Der Wirkungsgrad wurde bei Raumtemperatur und in kryogener Umgebung gemessen. Der Lastwiderstand beträgt 10 Ω (links) und 510 Ω (rechts).

Aus dem Vergleich zwischen Messung und Simulation ergab sich, dass die gemessenen Kopplungsfaktoren von den in den Berechnungen gewählten Kopplungsfaktoren leicht abweichen. Bei einem Abstand von 9,2 cm, 13,2 cm und 17,2 cm wurde ein Kopplungsfaktor von 18,2%, 10,7% und 6,7% gemessen. Eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und den Berechnungen ergab sich jedoch bei der Wahl eines Kopplungsfaktors von 16%, 10% und 6%. Eine weitere Abweichung bestand darin, dass die Differenz des gemessenen Wirkungsgrades bei Raumtemperatur und in flüssigem Stickstoff etwas größer ist als die des berechneten Wirkungsgrades. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre, dass zwischen den Messungen bei Raumtemperatur und in flüssigem Stickstoff der Kopplungsfaktor nicht exakt identisch bleibt aufgrund einer leichten Änderung der Platzierung der sekundärseitigen Spule im Styroporbehälter nach dem Einfüllen des flüssigen Stickstoffs. Zudem konnte auch während der Messungen festgestellt werden, dass bei hoher Kopplung und geringer Last die Rückwirkung des sekundärseitigen Schwingkreises auf den primärseitigen Schwingkreis so hoch ist, dass der gemessene Strom aus dem Verstärker stark abnimmt. Hierdurch wird die Strommessung aufgrund der begrenzten Empfindlichkeit der Stromzange TCP0020 von 10 mA/mV ungenauer.

4 Realisierung und Erprobung des Funktionsmusters

Zur Evaluierung des Wirkungsgrades der induktiven Energieversorgung für den entwickelten Kryo-Greifer bei Raumtemperatur und in kryogener Umgebung wurde der Messaufbau in Bild 6 realisiert.

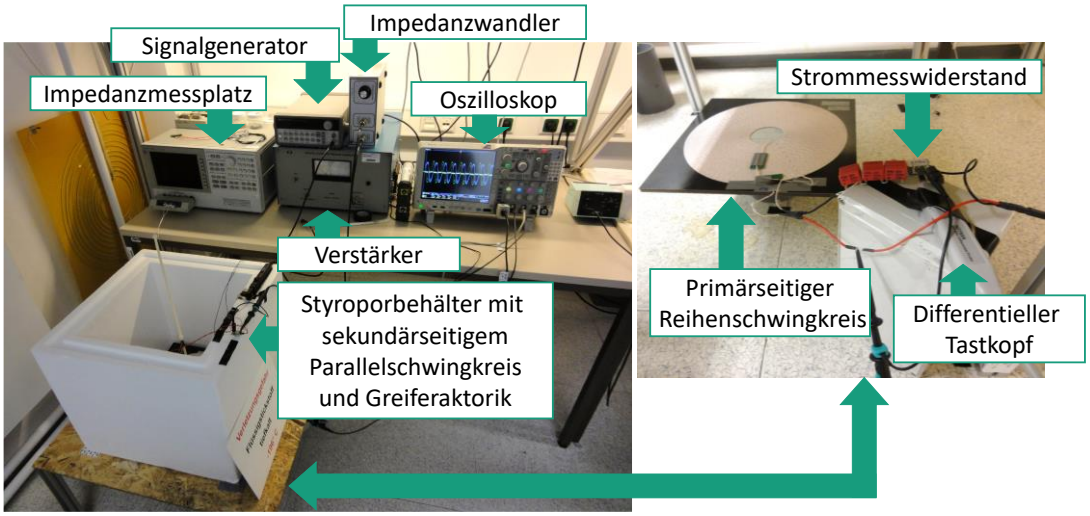

Bild 6: Messaufbau zur Evaluierung des Wirkungsgrades: Primärseitiger Serienschwingkreis (oben rechts) unter dem Gestell mit Holzplatte (unten links). Styroporbehälter mit sekundärseitigem Parallelschwingkreis und Greiferaktorik (unten links)

Der primärseitige Reihenschwingkreis wurde mit dem Signalgenerator 33120A, dem Impedanzwandler T1K-7A (T&C Power Conversion, Inc., Rochester, NY, USA) und dem Verstärker ENI 2100L (Electronic Navigation Industries, Inc., Rochester, NY, USA) mit einem sinusförmigen Signal betrieben. Die primärseitige Spannung wurde am Ausgang des Impedanzwandlers T1K-7A mit einem Tastkopf TT-MF312-2-6 11020-2-6 gemessen. Zur Ermittlung des primärseitigen Stroms wurde der Spannungsabfall über einem 1,1 Ω-Strommesswiderstand mit dem differenziellen Tastkopf N2793A von Agilent gemessen. Die Spannung und der Strom an der Last des sekundärseitigen Parallelschwingkreises wurden mit einem Tastkopf TT-MF312-2-6 11020-2-6 und einer Stromzange TCP0020 gemessen. Die Messungen wurden mit dem Oszilloskop MDO4104-6 erfasst und mit der Software OpenChoice Desktop auf einem Rechner exportiert. Der Wirkungsgrad wurde für unterschiedliche Abstände (9,5 cm, 12,5 cm, 17,5 cm, 22,5 cm, 27,5 cm und 33,5 cm) zwischen den Schwingkreisen sowohl bei Raumtemperatur, als auch mit der in flüssigen Stickstoff eingetauchten Empfängerspule und Greiferaktorik ermittelt. Der Wirkungsgrad resultiert aus dem Verhältnis des zeitlichen Mittelwertes der gemessenen Leistungen auf der Sekundärseite und der Primärseite. Der entwickelte Greifer ließ sich in flüssigem Stickstoff mit einem Wirkungsgrad von etwa 86% im Spulenabstand von 9,5 cm betreiben (Bild 7). Auch im Spulenabstand von 33,5 cm ließ sich der Greifer mit der übertragenen Energie noch betreiben, allerdings nur noch mit 10% Wirkungsgrad. Für die verschiedenen Abstände ergab sich eine Leistungsaufnahme zwischen 0,299 W und 0,335 W im kryogenen Fall gegenüber 1,347 W

und 1,459 W bei Raumtemperatur. Es ergab sich kein deutlicher Unterschied zwischen den gemessenen Wirkungsgraden in flüssigem Sickstoff (mit einem Tastverhältnis von 10%) und bei Raumtemperatur (mit einem Tastverhältnis von 50%). Allerdings benötigt das mechatronische Greifsystem vorteilhafterweise nur etwa ein Fünftel der Energie beim Betrieb im flüssigen Stickstoff aufgrund des reduzierten Tastverhältnisses. Mit den entwickelten Spulentopologien liegt der Wirkungsgrad bei einem Spulenabstand von 12,5 cm noch oberhalb von 75%.

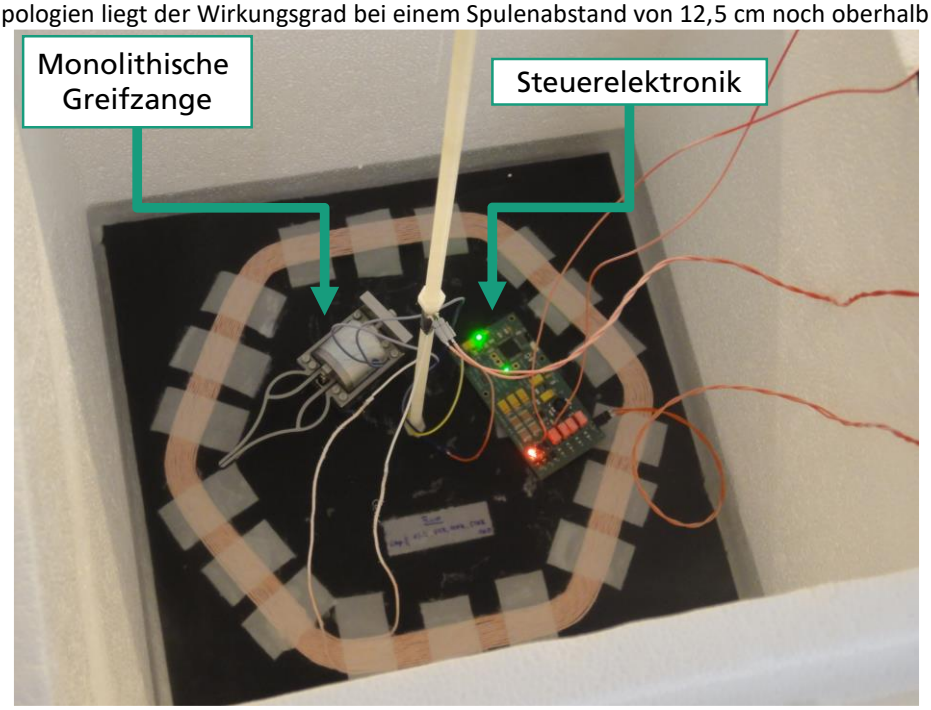

Bild 7: Sekundärseitige Empfängerspule, monolithische Greifzange und Steuerelektronik in einem mit flüssigem Stickstoff befüllten Styroporbehälter. Die Steuerelektronik wird induktiv über die Empfängerspule mit Energie versorgt.

5 Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag konnte durch Modellierung in ANSYS und Mathcad ein System zur induktiven Energieversorgung des entwickelten Kryo-Greifers entworfen werden. Sowohl die Greiferaktorik als auch die induktive Energieversorgung wurden in einer kryogenen Umgebung charakterisiert und erprobt. Der entwickelte Greifer ließ sich in flüssigem Stickstoff samt Steuerelektronik mit einem Wirkungsgrad von etwa 86% und 75% im jeweiligen Spulenabstand von 9,5 cm und 12,5 cm drahtlos betreiben. Trotz des höheren Verlustwiderstandes der sekundärseitigen Spule bei einer Temperatur von -196 °C weisen alle Messergebnisse keine Verschlechterung des Wirkungsgrades im Vergleich zum Betrieb bei Raumtemperatur auf. Die Ergebnisse stellen eine wesentliche Grundlage für die geplante Automatisierung von Handhabungsprozessen unter kryogenen Umgebungsbedingungen dar.

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden fünf Varianten von Spulengeometrien und deren Anordnung im kryogenen Arbeitsraum mit der FEM-Software ANSYS modelliert und vergleichend analysiert. Die höchsten Kopplungsfaktoren wurden mit der Variante bestehend aus einer primär- und sekundärseitigen Flachspule und einem optionalen Resonator erzielt. Um den praktischen Aufbau eines Labormusters zu vereinfachen, wurde der Resonator zunächst als Sekundärspule betrieben. Die Berechnung der Induktivitäten und Kapazitäten der Schwingkreise mit dem Ziel, einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, wurde ergänzend in Mathcad durchgeführt. Eigene Messungen zeigten, dass die frequenzabhängigen Ohm'schen Verluste einer Spule bei einer Temperatur von -196 °C zunehmen, obwohl der spezifische Widerstand von reinem Kupfer etwa um den Faktor 9 abnehmen kann [7]. Um die Genauigkeit der Berechnungen zu verbessern, wurde der primärseitige Schwingkreis (L_1, R_1, C_1) bei Raumtemperatur

und der sekundärseitige Schwingkreis (L_2, R_2, C_2) zusätzlich in flüssigem Stickstoff durch Messung charakterisiert und in Mathcad implementiert.
Das induktive Energieübertragungssystem wurde in einem Messaufbau mit fünf Lastwiderständen (10 Ω, 51 Ω, 100 Ω, 510 Ω, 1000 Ω) sowie bei drei Abständen zwischen der primär- und sekundärseitigen Spule (9,2 cm, 13,2 cm, 17,2 cm) charakterisiert. Aus dem Vergleich zwischen Messung und Berechnung konnte eine gute Vorhersage des Systemverhaltens erzielt werden. Die in [5] realisierte Greiferaktorik konnte in flüssigem Stickstoff induktiv bis zu einem Abstand von 33,5 cm mit Energie versorgt werden. Oberhalb dieses Abstandes entstanden erhöhte Überspannungen zwischen dem Kondensator und der Spule im primärseitigen Reihenschwingkreis aufgrund einer geringeren Rückwirkung des sekundärseitigen Schwingkreises auf die Primärseite.
Der entwickelte Greifer konnte in flüssigem Stickstoff mit einem Wirkungsgrad von ca. 86% und 75% in den jeweiligen Spulenabständen von 9,5 cm und 12,5 cm betrieben werden. Vorteilhafterweise benötigte das mechatronische Greifsystem nur etwa ein Fünftel der Energie beim Betrieb im flüssigen Stickstoff aufgrund des reduzierten Tastverhältnisses. Für die zukünftige Integration des induktiven Energieübertragungssystems in einem Behälter aus Edelstahl werden im nächsten Schritt ebenfalls die Wirbelstromverluste in den Berechnungen berücksichtigt.

7 Danksagung

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts "Methoden zur Automatisierung von Handhabungsprozessen unter kryogenen Umgebungsbedingungen" (Projektnummer: 349906175) erarbeitet. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung dieses Projekts.

8 Literaturverzeichnis

[1] Alikani, M., Parmegiani, L., Human Reproductive Cell Cryopreservation, Storage, Handling, and Transport: Risks and Risk Management, Semin Reprod Med 36 (2018), 265-272
[2] Rittinghaus, T., Keller, J., Nussbeck, S., Glasmacher, B., Kryo-Lagerroboter in der Biobank: Erfassung der Probentemperatur, KI Kälte · Luft · Klimatechnik 08-09 (2021), 52-55
[3] Schappler, M., Jahn, P., Raatz, A., et al., Combined Structural and Dimensional Synthesis of a Parallel Robot for Cryogenic Handling Tasks, in: Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 125 (2021), 65-77
[4] Jahn, P., Ihmig, F., Raatz, A., Design of a parallel robot with additively manufactured flexure hinges for a cryogenic work environment, Procedia CIRP 103 (2021), 280-285
[5] Ihmig, F., Koch, T., Biehl, M., Jahn, P., Raatz, A., Robotergestützte Handhabung im kryogenen Arbeitsumfeld, Tagungsband der Digital-Fachtagung VDI Mechatronik, online, 2021, 164-169
[6] Jahn, P., Ihmig, F., Olsommer, Y., Biehl, M., Raatz, A., Roboterkomponenten für den kryogenen Arbeitsraum: Entwicklung von Festkörpergelenken und monolithischen Greifersystemen für eine Parallelroboterstruktur, Deutsche Kälte- und Klimatagung, online, 2020
[7] Rose, K., Mangaser, R., Mark, C., Sayre, E., Cryogenically Cooled CMOS, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences 24 (1999), 63-99