Fraunhofer IBMT

match Institut für Montagetechnik

I.12 Induktive Energieübertragung in eine kryogene Umgebung

Design und Charakterisierung einer drahtlosen Energieübertragungsstrecke für den Betrieb einer Greiferaktorik

Yves Olsommer,
Philipp Jahn, Annika Raatz, Frank R. Ihmig

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Inhalt

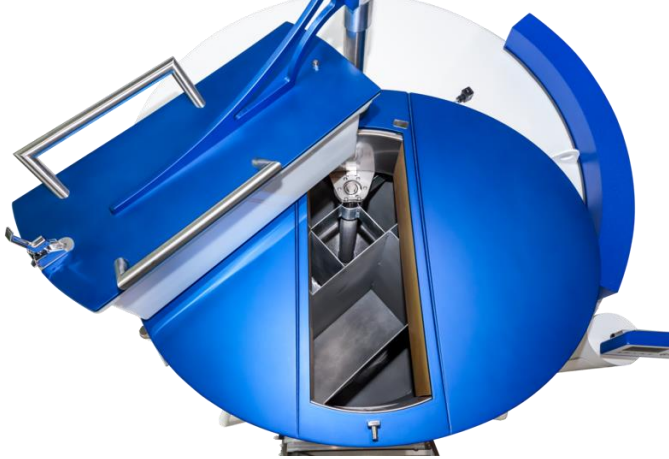
1. Einleitung
2. Modellierung
3. Charakterisierung des Funktionsmusters
4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Kryokonservierung

Was ist Kryokonservierung?

- Langzeitkonservierung biologischen Materials
- Temperaturen zwischen -130 °C und -196 °C
- Flüssiger Stickstoff
- Verletzungsrisiko durch Kälteverbrennungen oder Kontakt mit gefährlichen Stoffen
- Temperaturschwankungen oder Verunreinigungen gefährden die Integrität der Proben
- Zusammenstellung großer Probenmengen ist äußerst zeitaufwendig

www.pharmazeutische-zeitung.de



BIOSAFE® 2400

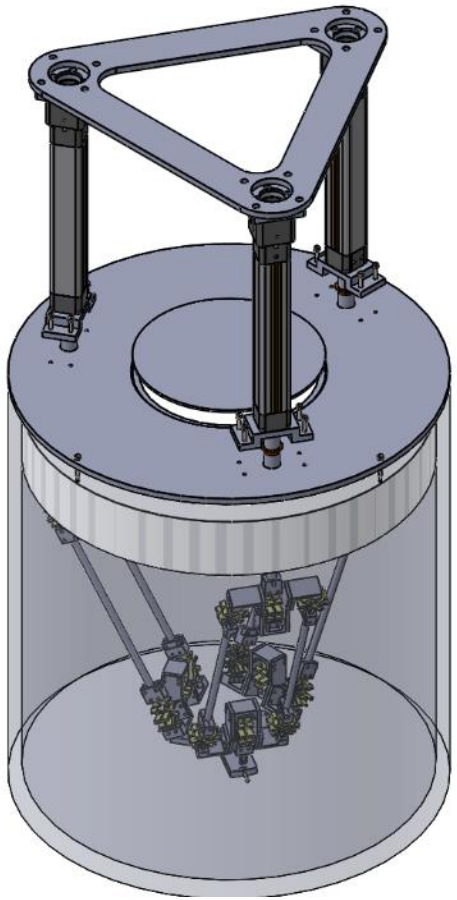
Geometrischer Inhalt	2.400 L (120.000 2 ml-Ampullen)
Leergewicht	1,3 t
Außendurchmesser	1,65 m
Gesamthöhe	2,10 m

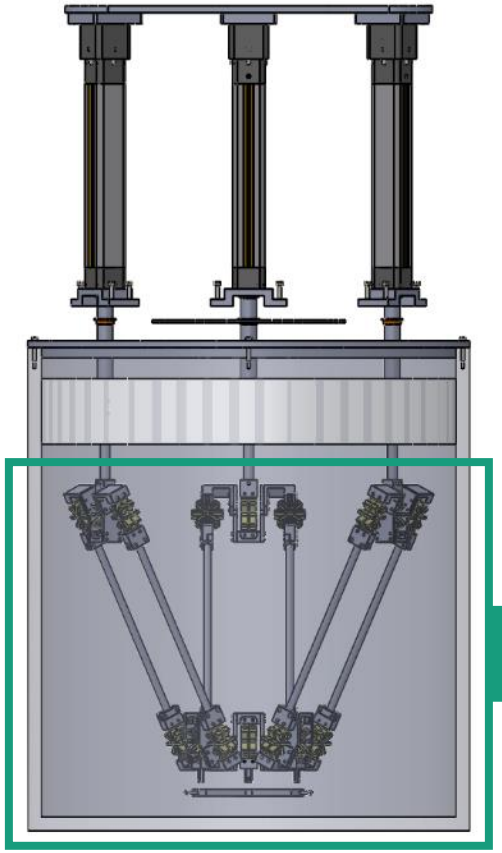
https://www.cryotherm.de/produkte/lifescience/produktinformation/biosafe

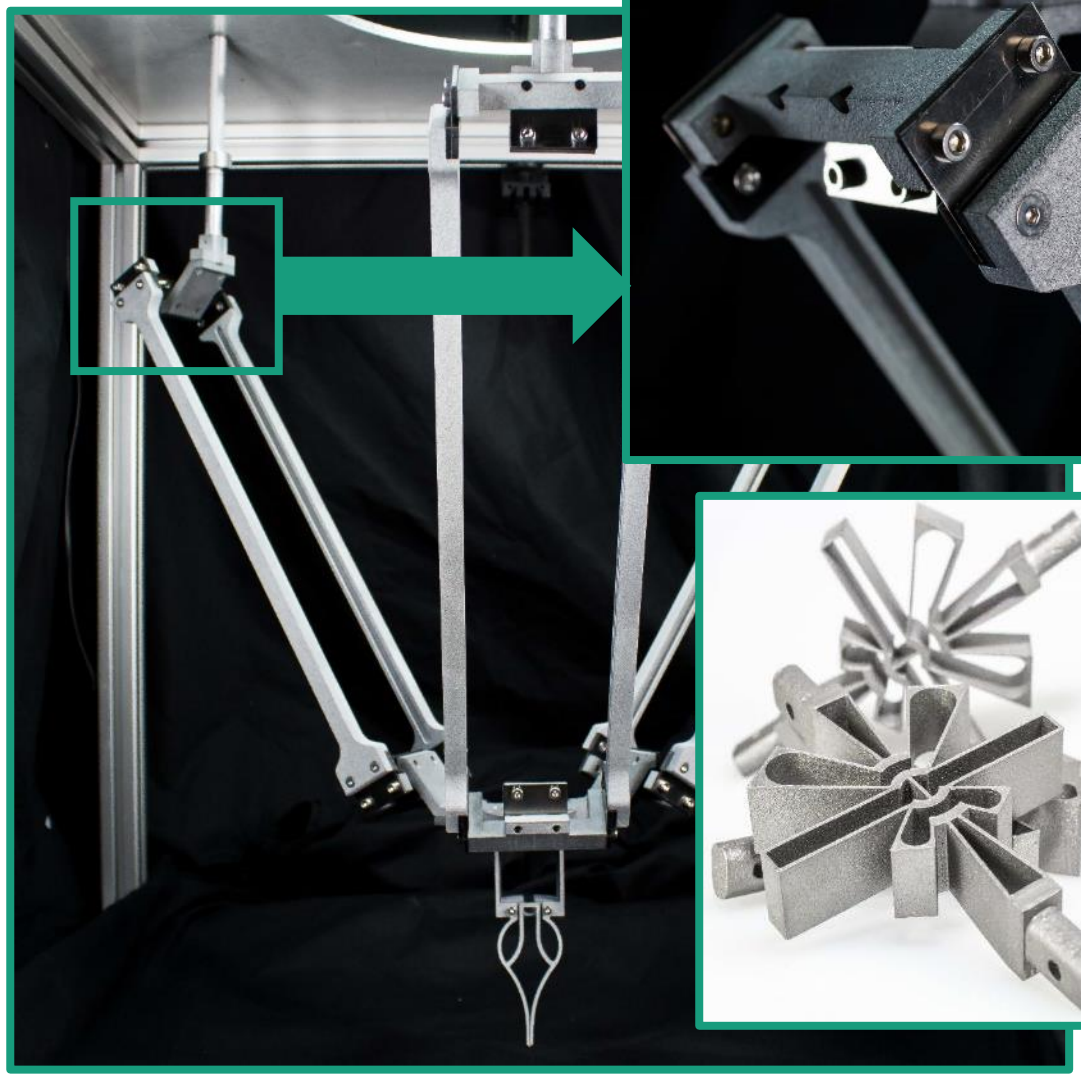
Fraunhofer IBMT

Kryokonservierung

Warum induktive Energieübertragung?







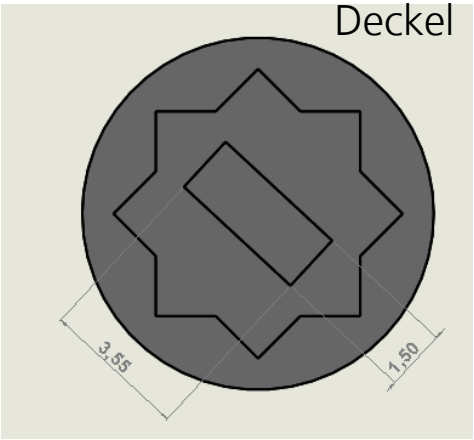
Fraunhofer IBMT

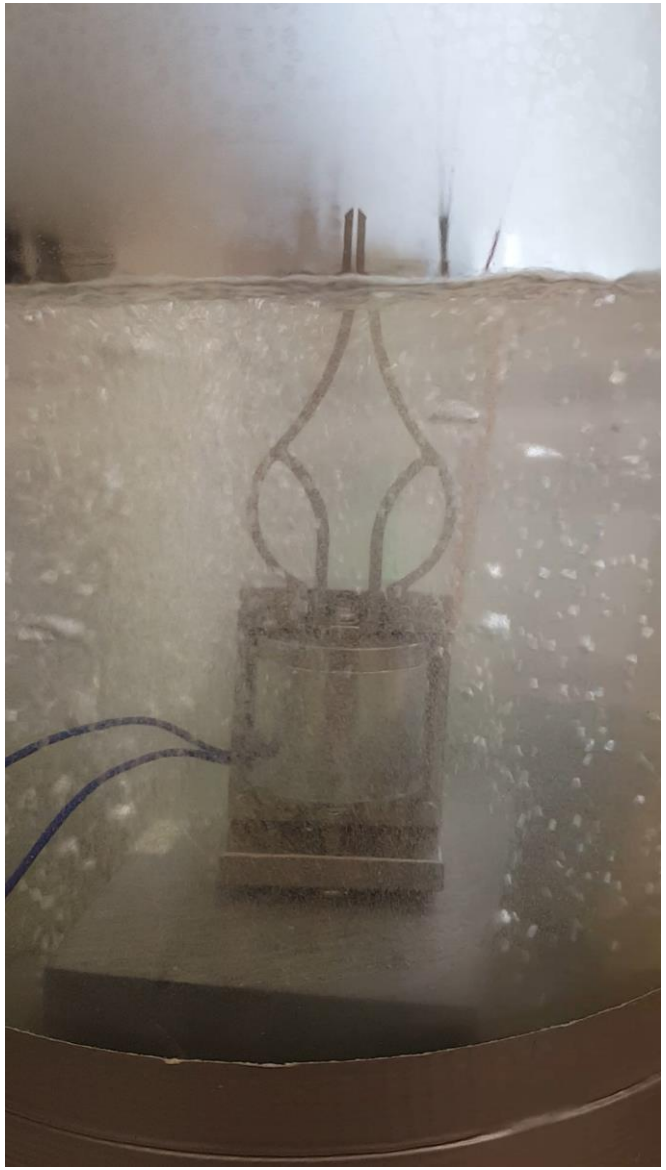
Kryokonservierung

Warum induktive Energieübertragung?

Kryoröhrchen und 96er-Racks von Micronic:

- Kryoröhrchen mit graviertem 2D Data-Matrix-Code an der Unterseite
- Standardisierter Formfaktor der 96er-Racks mit 9 mm Rastermaß für die Kryoröhrchen
- Roborack-96 für 96 Kryoröhrchen mit verschiedenen Probenvolumina (1,10 ml/1,40 ml/2,00 ml/2,50 ml)





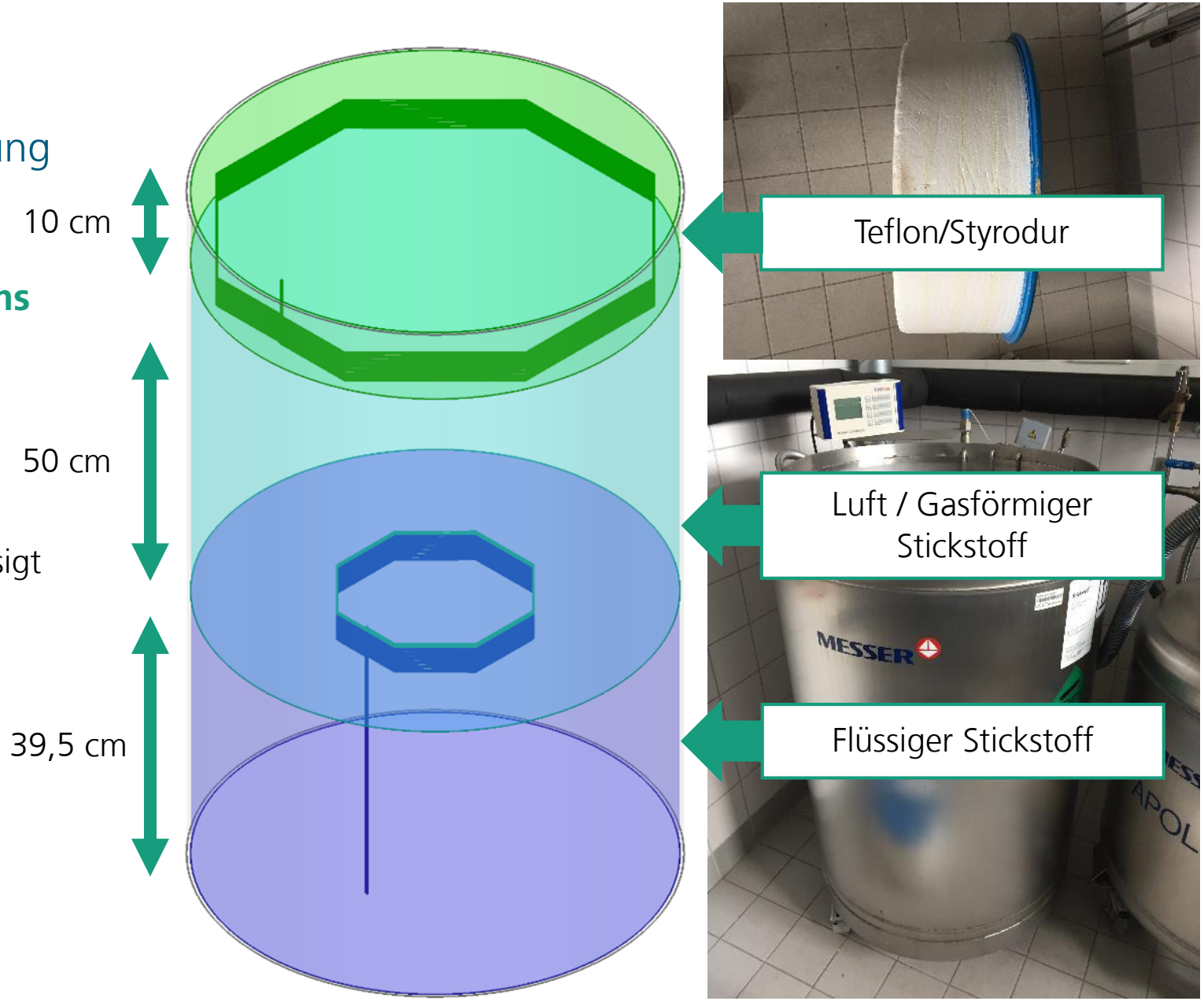
Fraunhofer IBMT

Modellierung und Simulation

Entwurf der induktiven Energieübertragung

Beschreibung des kryogenen Arbeitsraums

1. Behälter aus Edelstahl:
- Innendurchmesser vom 60 cm
- Wandstärke von 5 mm
2. Spulen aus Kupfer:
- Litze → Skin- und Proximity-Effekte vernachlässigt



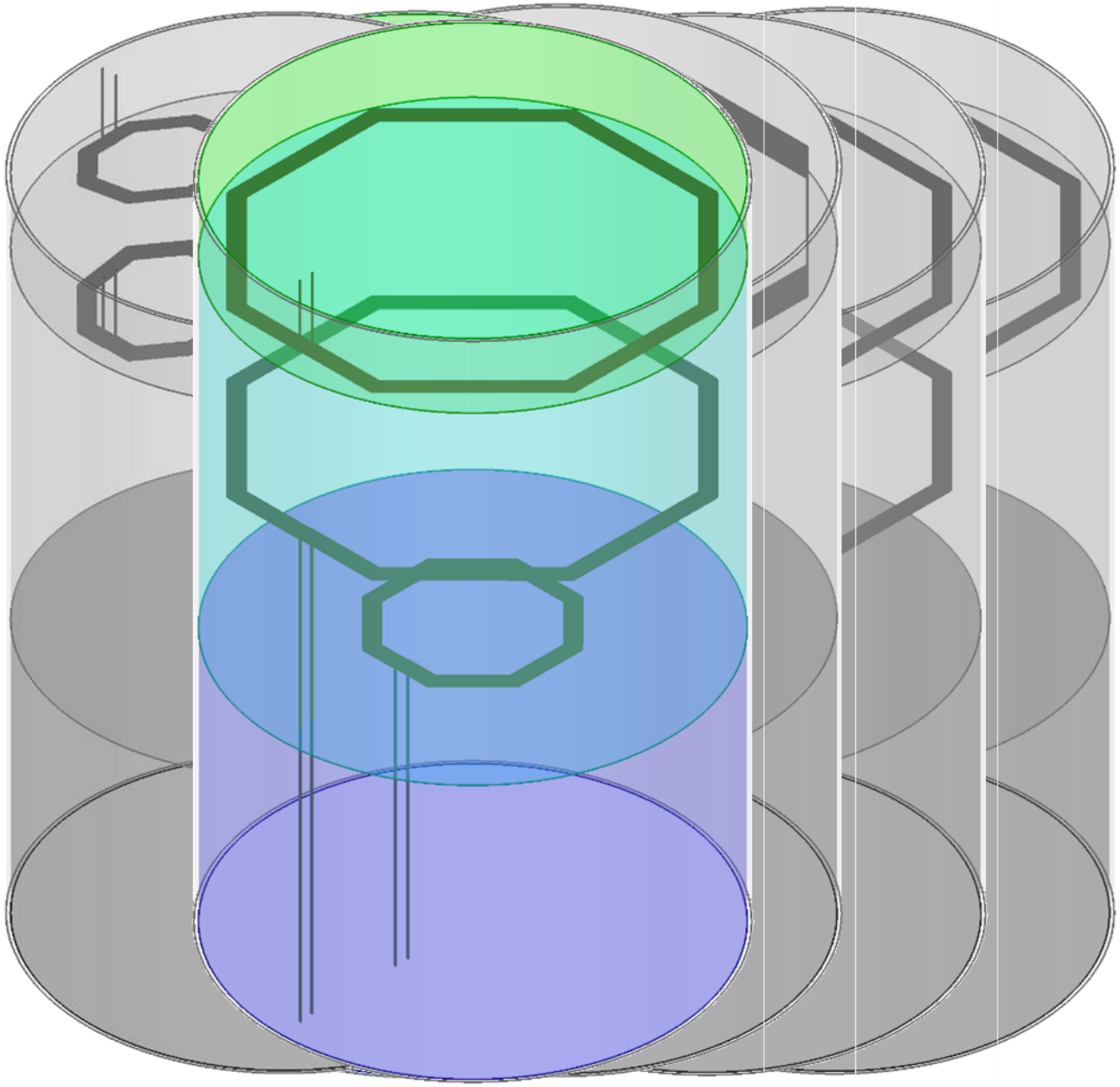
Fraunhofer IBMT

Modellierung und Simulation

Entwurf der induktiven Energieübertragung

Spulenanordnung in ANSYS (Modul Maxwell 3D) bestehend aus:

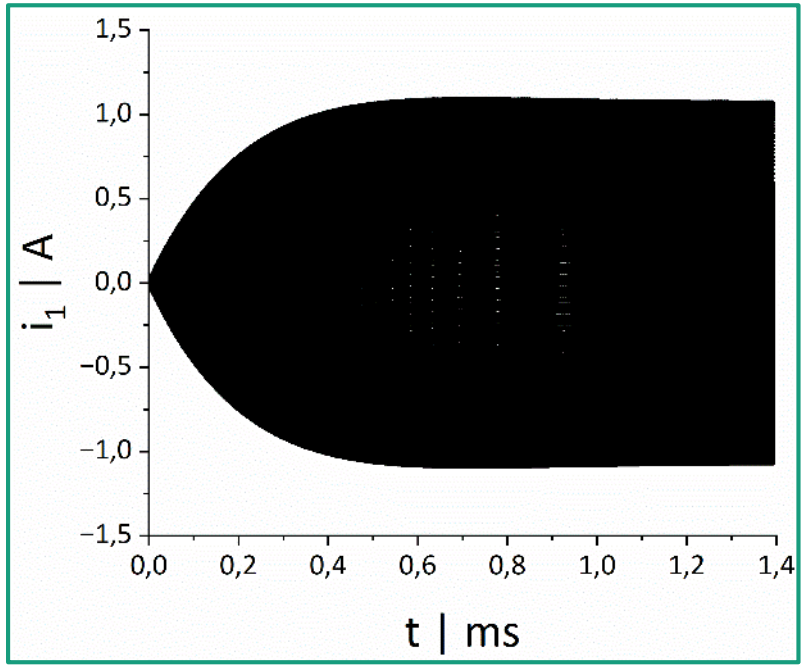
1. Zwei Flachspulen
2. **Zwei Flachspulen mit Resonator**
3. Zwei Zylinderspulen
4. Zwei Zylinderspulen mit Resonator
5. Einer kreisförmigen Anordnung von vier primärseitigen Flachspulen und einer sekundärseitigen Flachspule



Fraunhofer IBMT

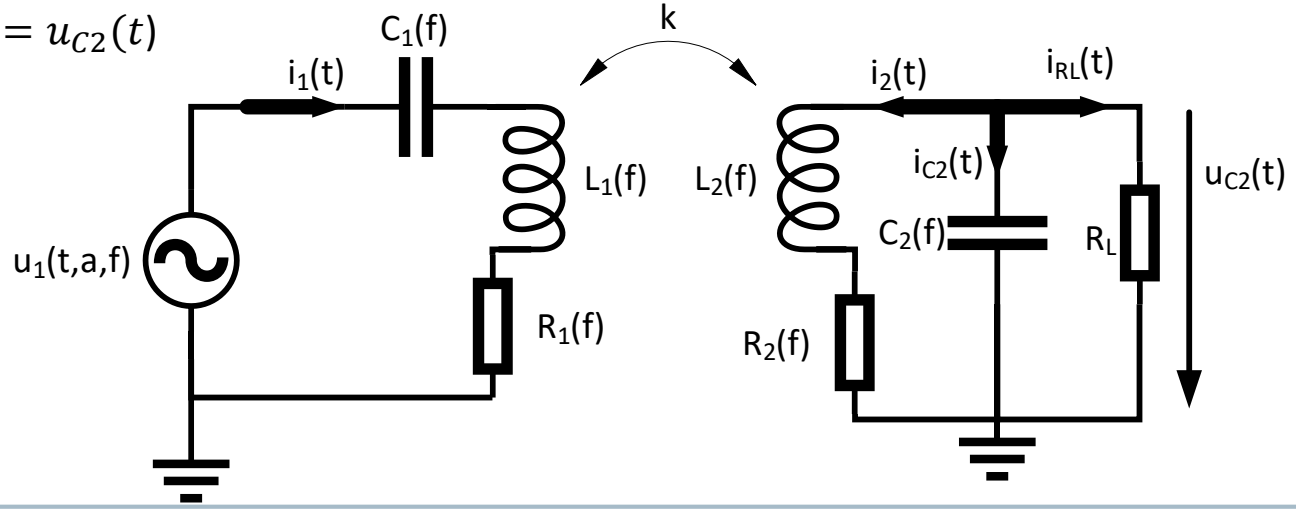
Modellierung und Simulation

Berechnungen zum Wirkungsgrad



DGL:

- $u_1(t,a,f) = u_{C1}(t) + R_1(f) \cdot i_1(t) + L_1(f) \cdot \frac{d}{dt} i_1(t) + k \cdot \sqrt{L_1(f) \cdot L_2(f)} \cdot \frac{d}{dt} i_2(t)$
- $i_1(t) = C_1(f) \cdot \frac{d}{dt} u_{C1}(t)$
- $R_2(f) \cdot i_2(t) + L_2(f) \cdot \frac{d}{dt} i_2(t) + k \cdot \sqrt{L_1(f) \cdot L_2(f)} \cdot \frac{d}{dt} i_1(t) = u_{C2}(t)$
- $i_{C2}(t) = C_2(f) \cdot \frac{d}{dt} u_{C2}(t)$
- $i_2(t) + i_{C2}(t) + \frac{u_{C2}(t)}{R_L} = 0$

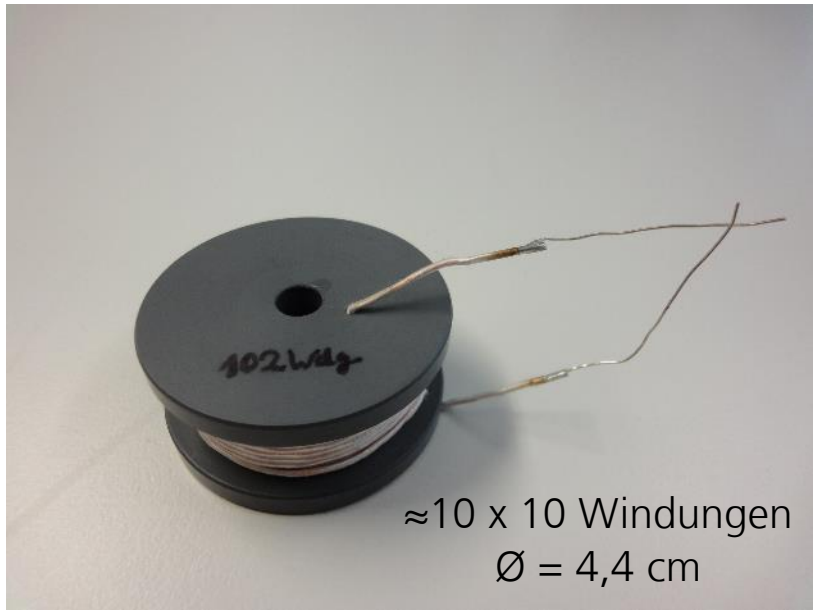


Fraunhofer IBMT

Modellierung und Simulation

Berechnungen zum Wirkungsgrad

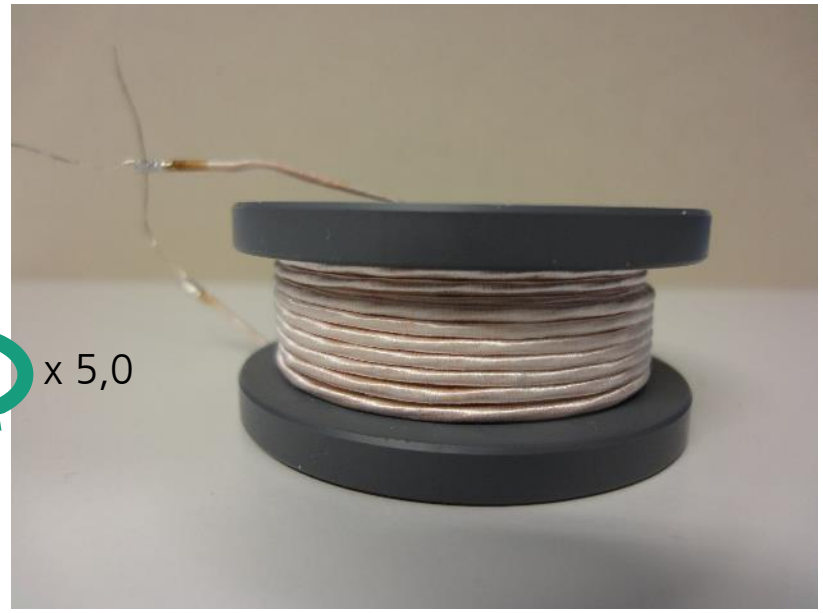
1. Der spezifische Widerstand von reinem Kupfer kann bei einer Temperatur von -196 °C etwa um den Faktor 9 abnehmen [1]
2. Spulendraht: umsponnene lackisolierte Kupferlitze CLI-S 100/90



Messungen bei 375 kHz

Spule	Temperatur	Induktivität | µH	Verlustwiderstand | Ω
Testspule	Raumtemperatur	261	9,3
Testspule	Flüssiger Stickstoff	248	46,7

x 5,0



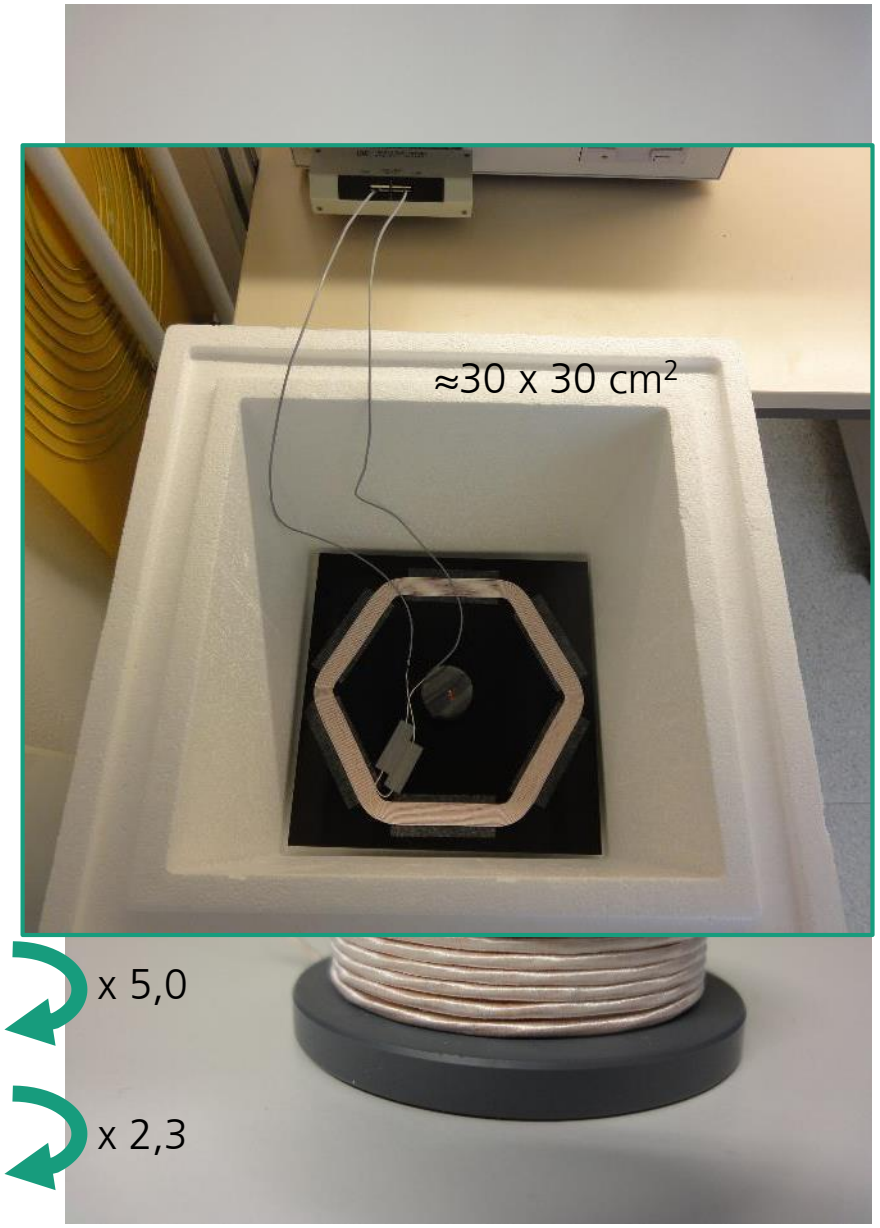
[1] Kenneth Rose, Ramon Mangaser, Christopher Mark, et al. (1999), Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 24:1, 63-99
[2] H. Gui et al. (2020), IEEE Transactions on Power Electronics, 35:5, 5144-5156

Fraunhofer IBMT

Modellierung und Simulation

Berechnungen zum Wirkungsgrad

1. Der spezifische Widerstand von reinem Kupfer kann bei einer Temperatur von -196 °C etwa um den Faktor 9 abnehmen [1]
2. Spulendraht: umsponnene lackisolierte Kupferlitze CLI-S 100/90



Messungen bei 375 kHz

Spule	Temperatur	Induktivität | µH	Verlustwiderstand | Ω
Testspule	Raumtemperatur	261	9,3
Testspule	Flüssiger Stickstoff	248	46,7
KR-D-12W-12	Raumtemperatur	79	0,4
KR-D-12W-12	Flüssiger Stickstoff	79	0,9

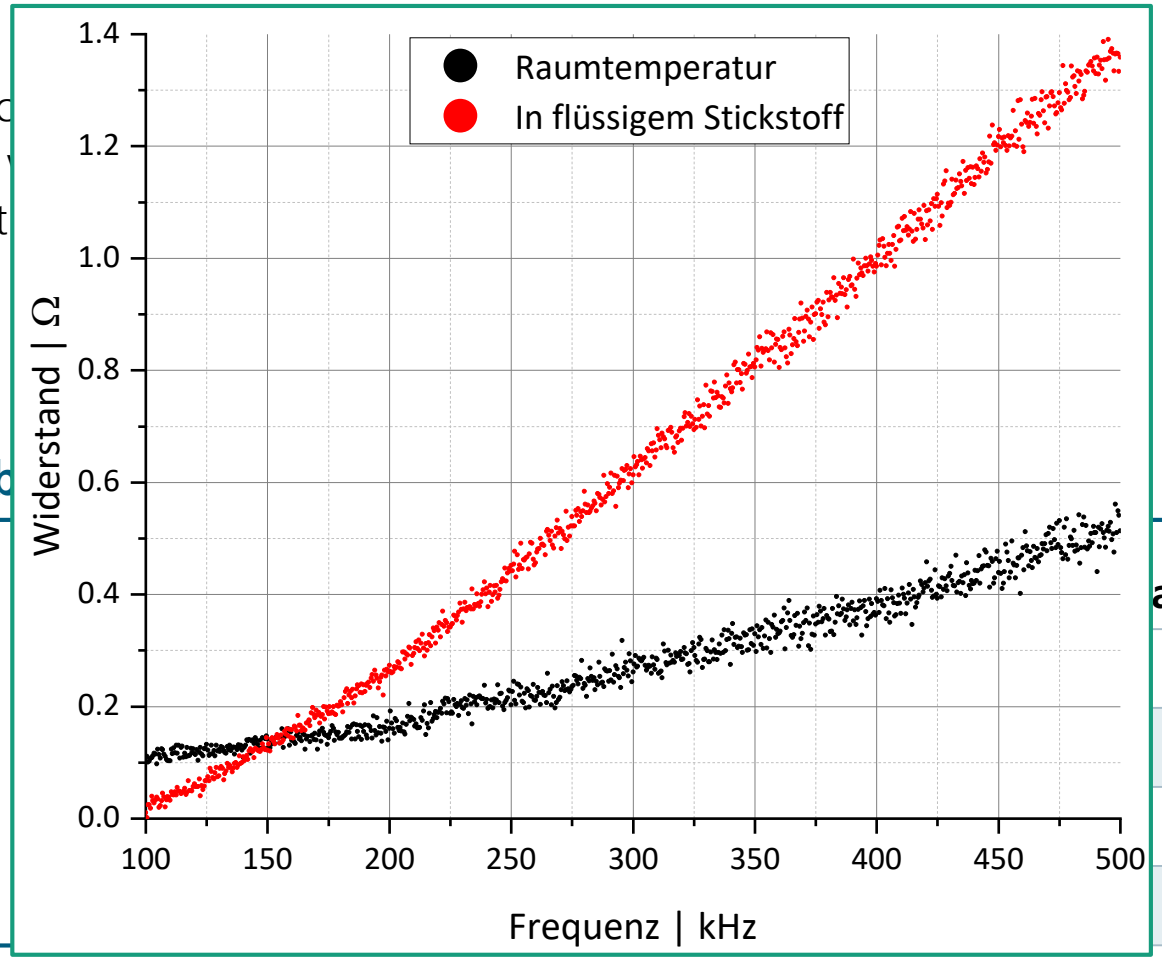
[1] Kenneth Rose, Ramon Mangaser, Christopher Mark, et al. (1999), Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 24:1, 63-99
[2] H. Gui et al. (2020), IEEE Transactions on Power Electronics, 35:5, 5144-5156

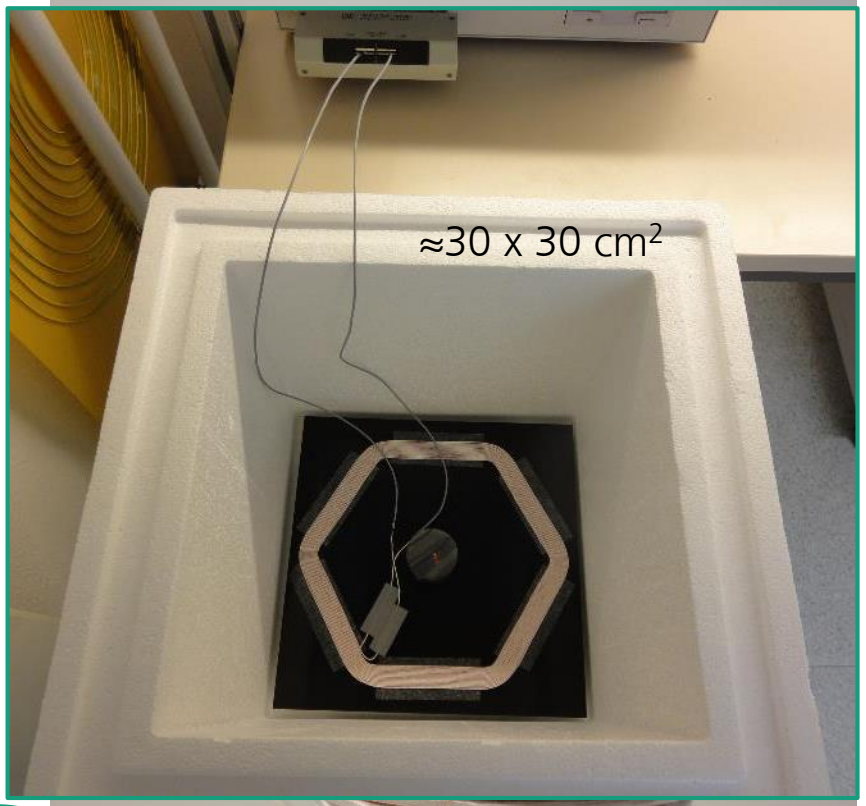
Fraunhofer IBMT

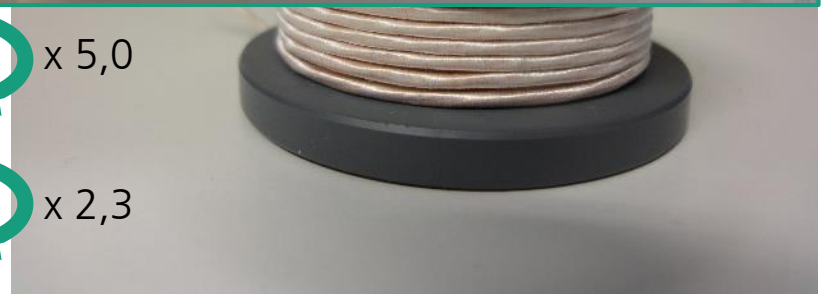
Modellierung und Simulation

Berechnungen zum Wirkungsgrad

1. Der spezifisc
   Temperatur
2. Spulendraht







Messungen b

Spule	and | Ω
Testspule	9,3
Testspule	46,7
KR-D-12W-12	0,4
KR-D-12W-12	0,9

x 5,0

x 2,3

[1] Kenneth Rose, Ramon Mangaser, Christopher Mark, et al. (1999), Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 24:1, 63-99
[2] H. Gui et al. (2020), IEEE Transactions on Power Electronics, 35:5, 5144-5156

Fraunhofer IBMT

Messaufbau

Evaluierung des Wirkungsgrades

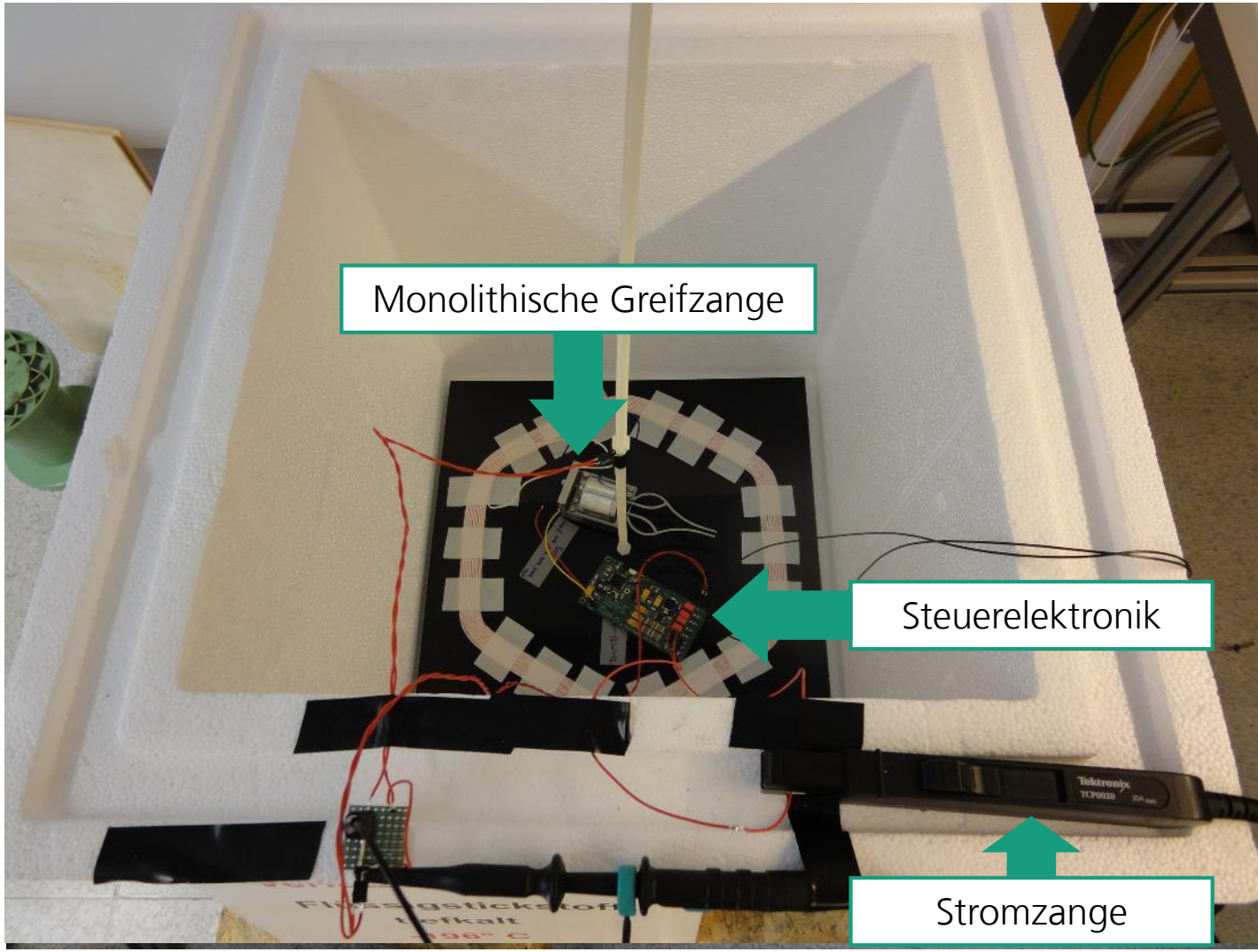
1. Primärspule:
   - Windungszahl: 75
   - Außendurchmesser: 27,1 cm
   - Innendurchmesser: 5,9 cm

2. Sekundärspule:
   - Windungszahl: 12
   - Außendurchmesser: 26,9 cm
   - Innendurchmesser: 23,7 cm

Messungen:

- Lasten:
  - 10 Ω, 51 Ω, 100 Ω, 510 Ω und 1000 Ω
  - Monolithische Greifzange und Steuerelektronik
- Abstände:
  - Von 9,2 cm bis 33,5 cm

Styroporbehälter mit sekundärseitigem Parallelschwingkreis und Greiferaktorik



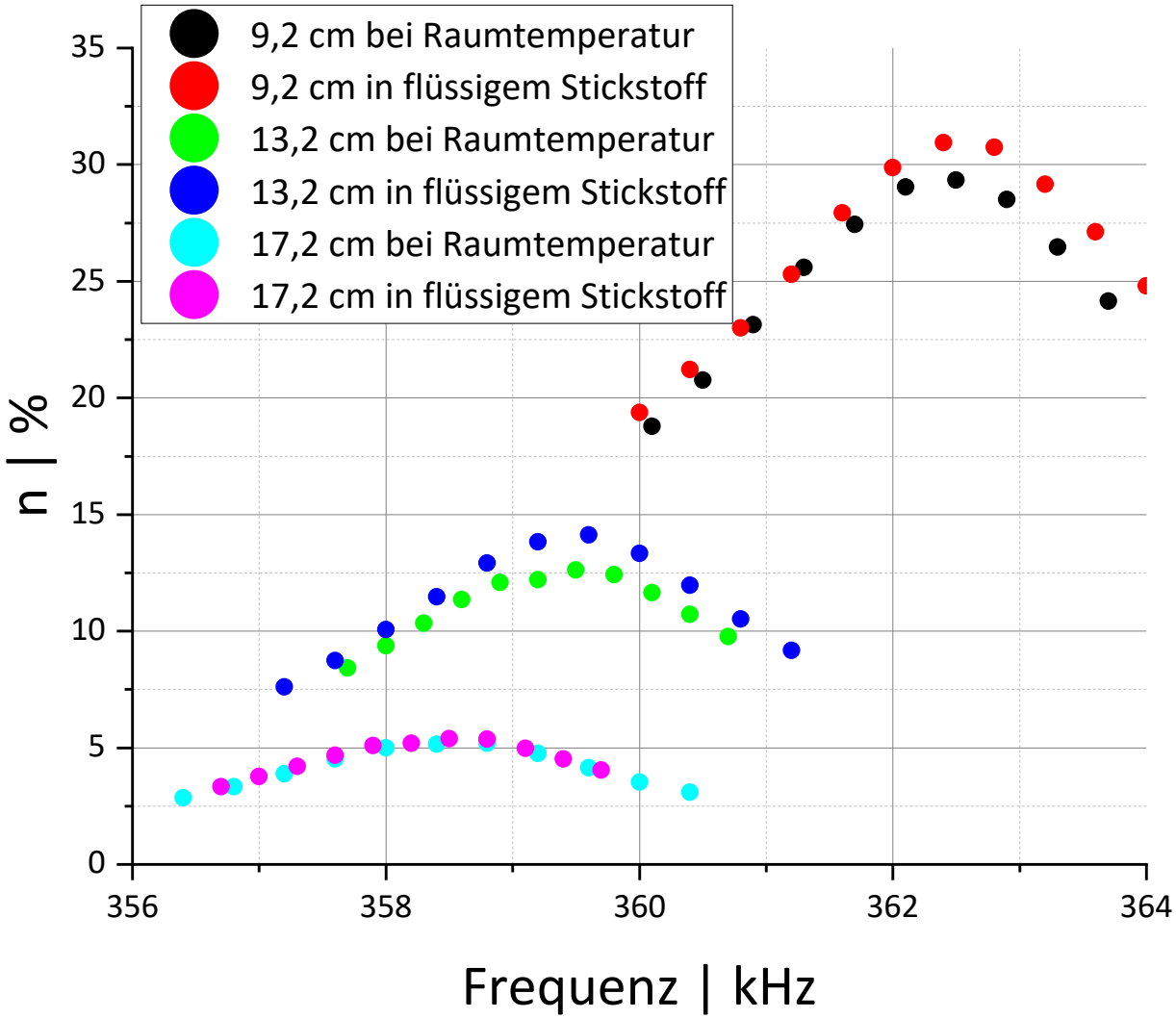
Fraunhofer IBMT

Simulation und Messung

Evaluierung des Wirkungsgrades

Mit einer Last von 10 Ω

Abstand	Umgebung	Maximaler Wirkungsgrad
9,2 cm	Raumtemperatur	29,3%
9,2 cm	In flüssigem Stickstoff	30,9%
13,2 cm	Raumtemperatur	12,6%
13,2 cm	In flüssigem Stickstoff	14,1%
17,2 cm	Raumtemperatur	5,2%
17,2 cm	In flüssigem Stickstoff	5,4%

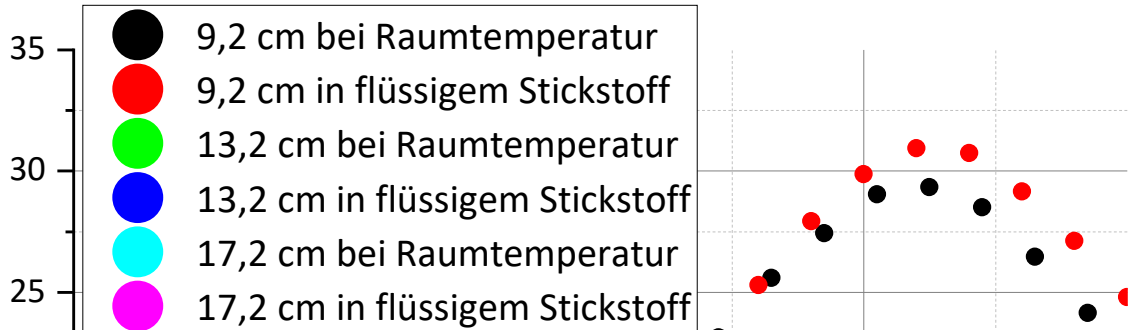


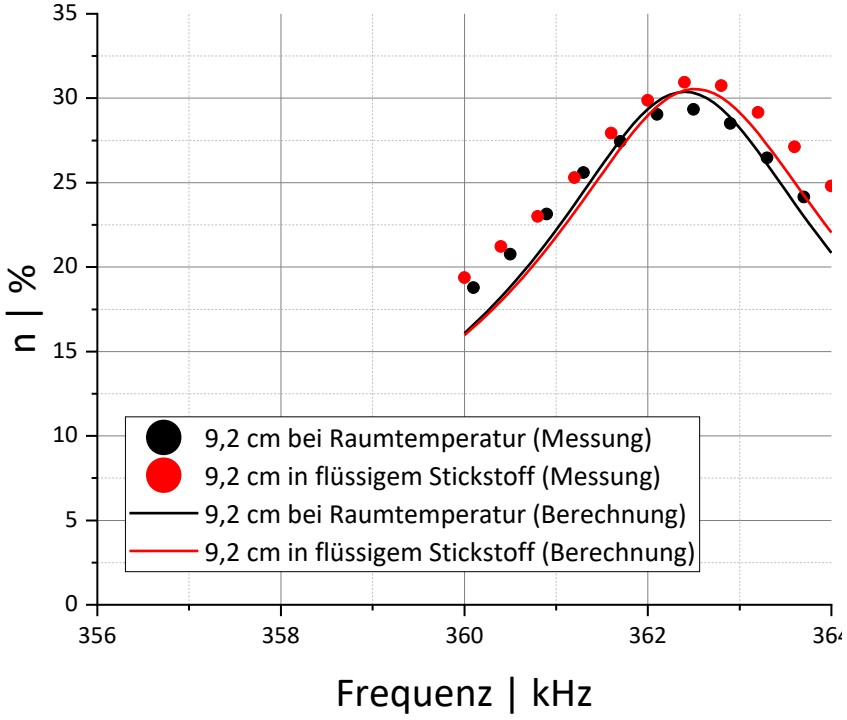
Fraunhofer IBMT

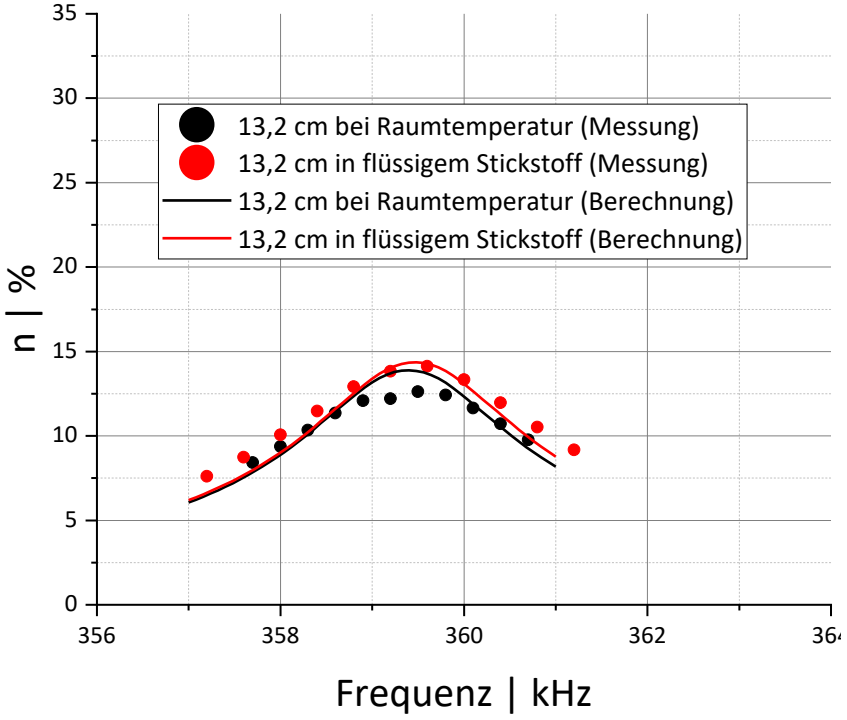
Simulation und Messung

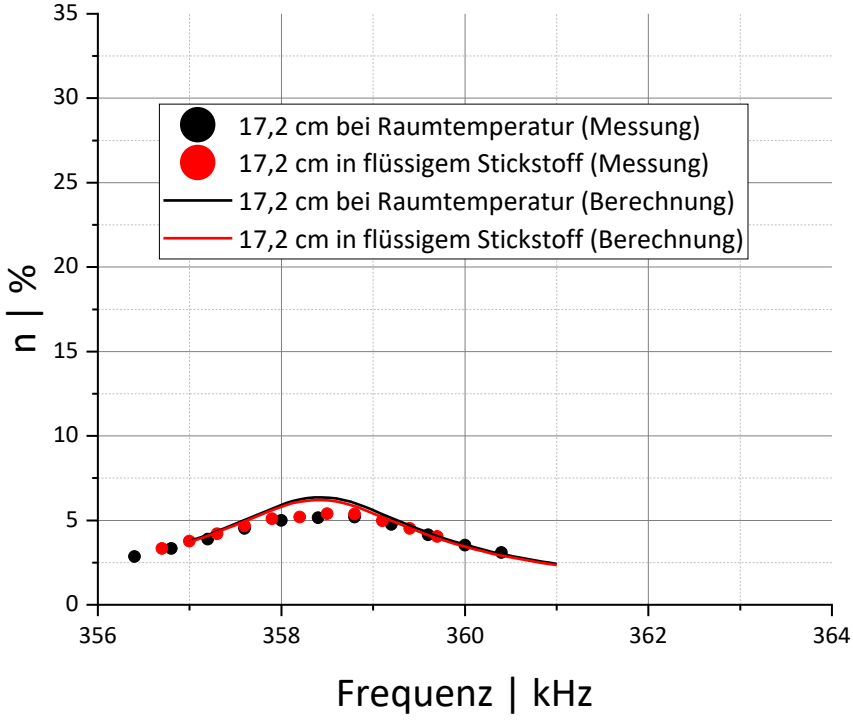
Evaluierung des Wirkungsgrades

Mit einer Last von 10 Ω









Fraunhofer IBMT

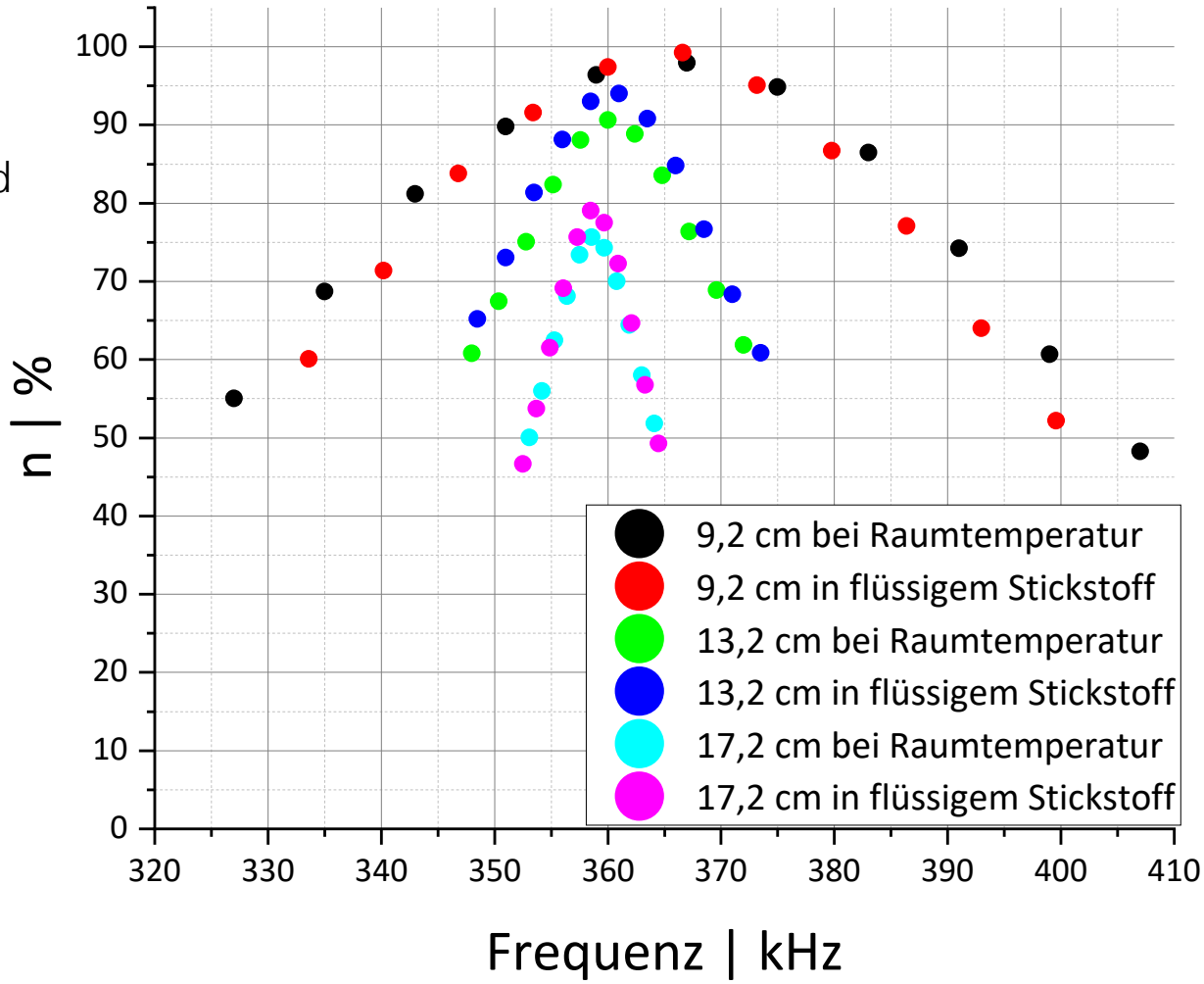
Simulation und Messung

Evaluierung des Wirkungsgrades

Mit einer Last von 510 Ω

1. Wirkungsgrad > 70% bei einer Last von 510 Ω und 1000 Ω und alle drei Abstände

Abstand	Umgebung	Maximaler Wirkungsgrad
9,2 cm	Raumtemperatur	97,9%
9,2 cm	In flüssigem Stickstoff	99,2%
13,2 cm	Raumtemperatur	90,6%
13,2 cm	In flüssigem Stickstoff	94,0%
17,2 cm	Raumtemperatur	75,6%
17,2 cm	In flüssigem Stickstoff	79,0%



[1J. -K. Liao, Y. -K. Huang and H. -M. Hsu (2017), IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), pp. 1-3
[2] B. -Y. Liu, Z. -K. Chen and H. -M. Hsu (2018), IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC) pp. 1-4

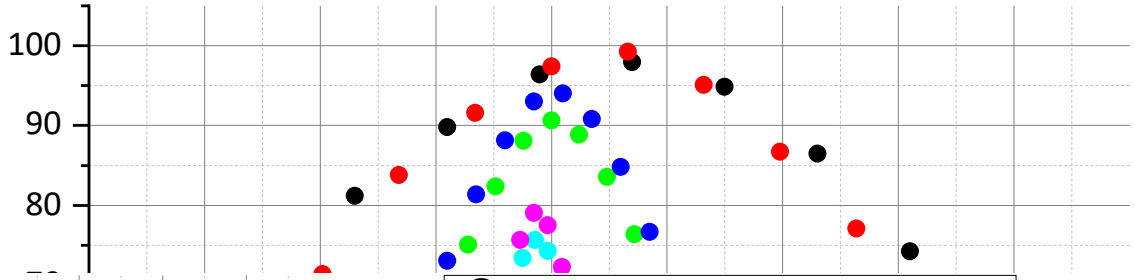
Fraunhofer IBMT

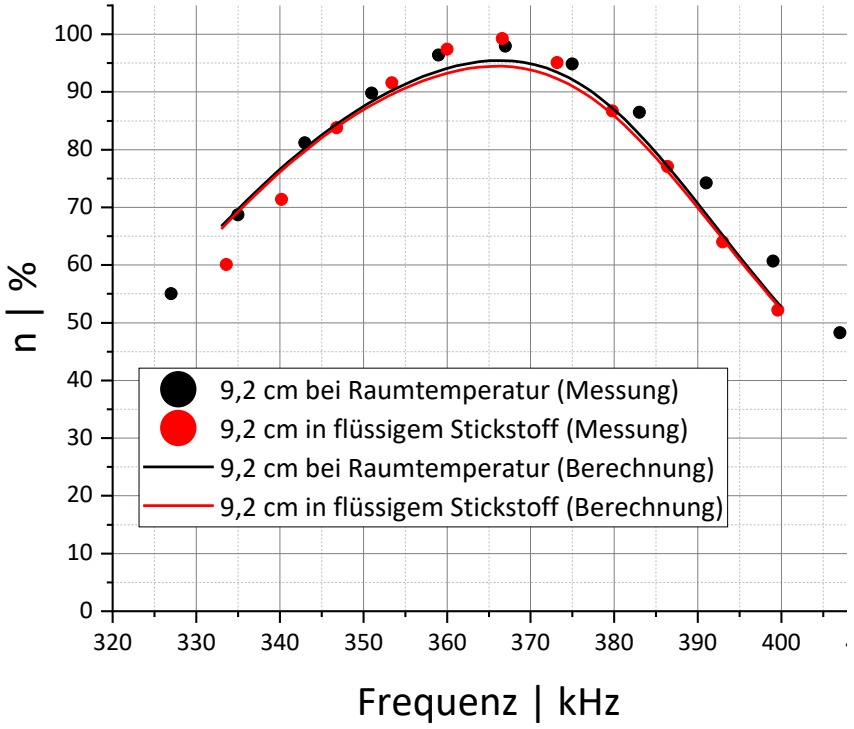
Simulation und Messung

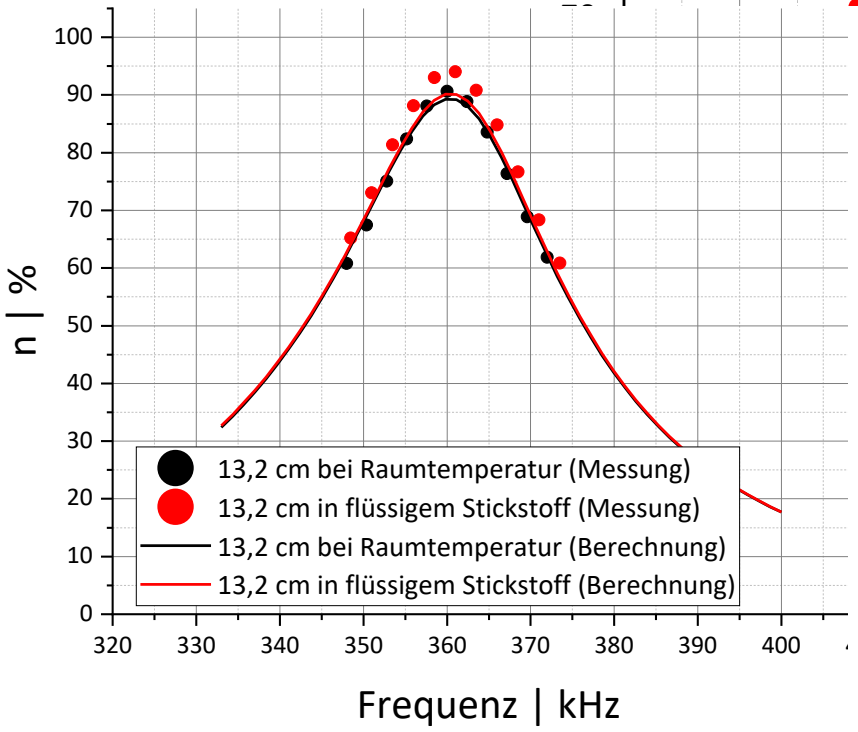
Evaluierung des Wirkungsgrades

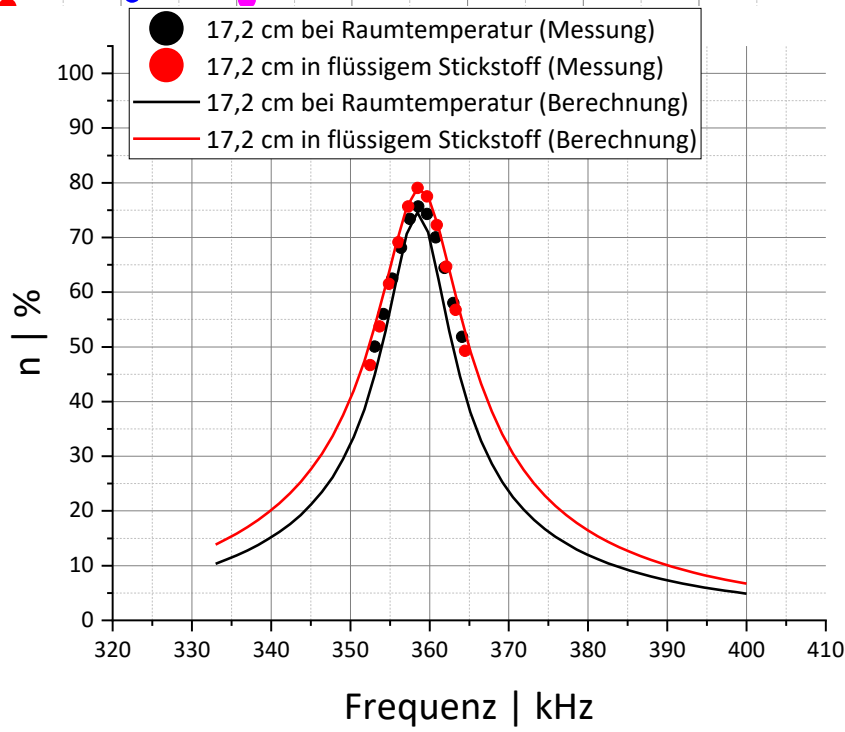
Mit einer Last von 510 Ω

1. Wirkungsgrad > 70% bei einer Last von 510 Ω und 1000 Ω und alle drei Abstände









[1J. -K. Liao, Y. -K. Huang and H. -M. Hsu (2017), IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), pp. 1-3
[2] B. -Y. Liu, Z. -K. Chen and H. -M. Hsu (2018), IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC) pp. 1-4

Fraunhofer IBMT

Messung

Realisierung und Erprobung des Funktionsmusters

Monolithische Greifzange und Steuerelektronik

1. Bei Raumtemperatur → Tastverhältnis von 50% (≈1,4 W Leistungsaufnahme)
2. In flüssigem Stickstoff → Tastverhältnis von 10% (≈0,3 W Leistungsaufnahme)

Abstand	Maximaler Wirkungsgrad (bei Raumtemperatur)	Maximaler Wirkungsgrad (in flüssigem Stickstoff)
9,5 cm		
12,5 cm		
17,5 cm		
22,5 cm		
27,5 cm		
33,5 cm		

Fraunhofer IBMT

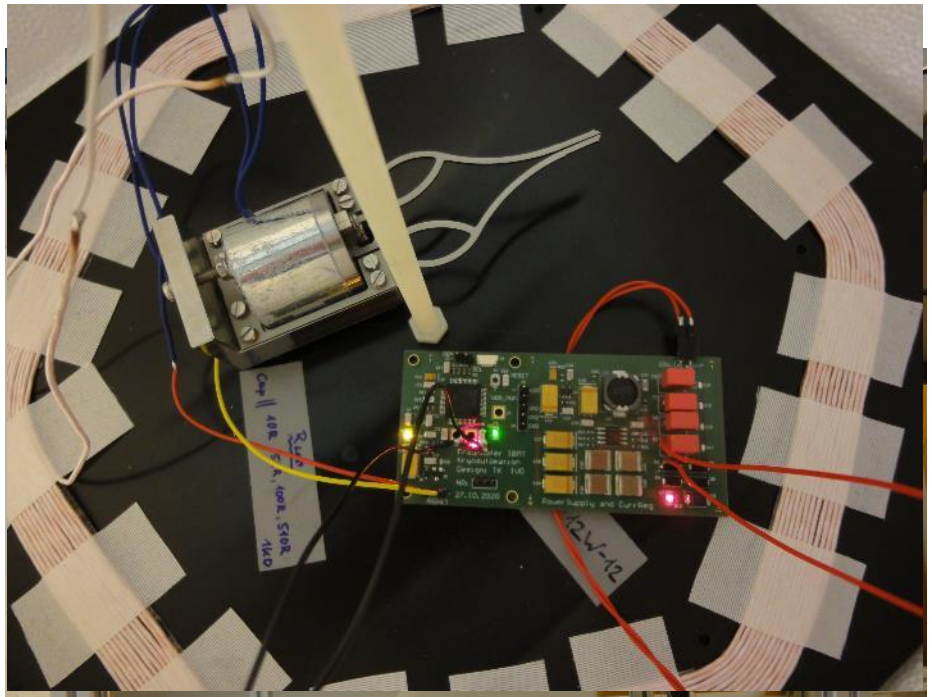
Messung

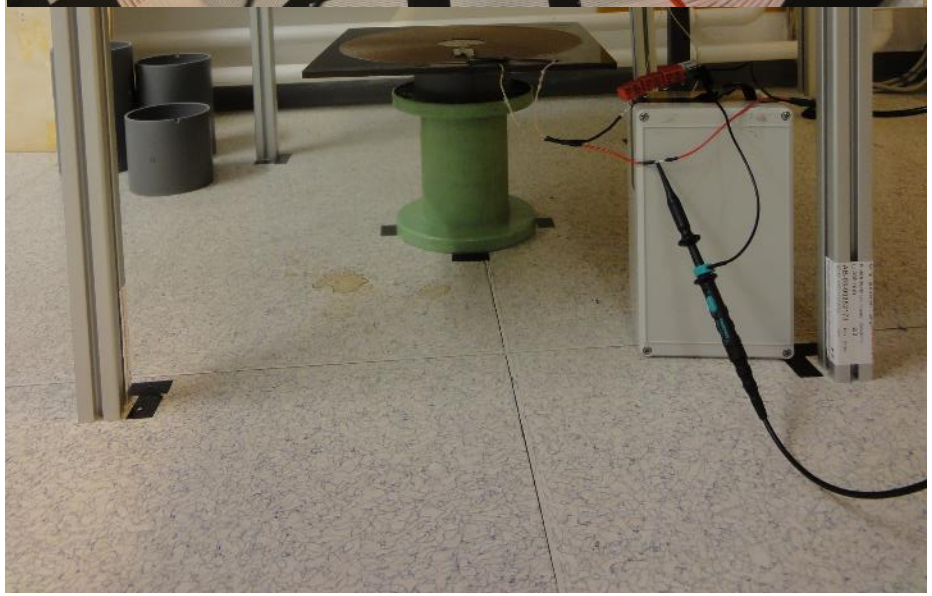
Realisierung und Erprobung des Funktionsmusters

Monolithische Greifzange und Steuerelektronik

1. Bei Raumtemperatur → Tastverhältnis von 50% (≈1,4 W Leistungsaufnahme)
2. In flüssigem Stickstoff → Tastverhältnis von 10% (≈0,3 W Leistungsaufnahme)

Abstand	Maximaler Wirkungsgrad (bei Raumtemperatur)	Maximaler Wirkungsgrad (in flüssigem Stickstoff)
9,5 cm	84,3%	
12,5 cm	77,5%	
17,5 cm	58,5%	
22,5 cm	42,6%	
27,5 cm	23,0%	
33,5 cm	9,0%	





Fraunhofer IBMT

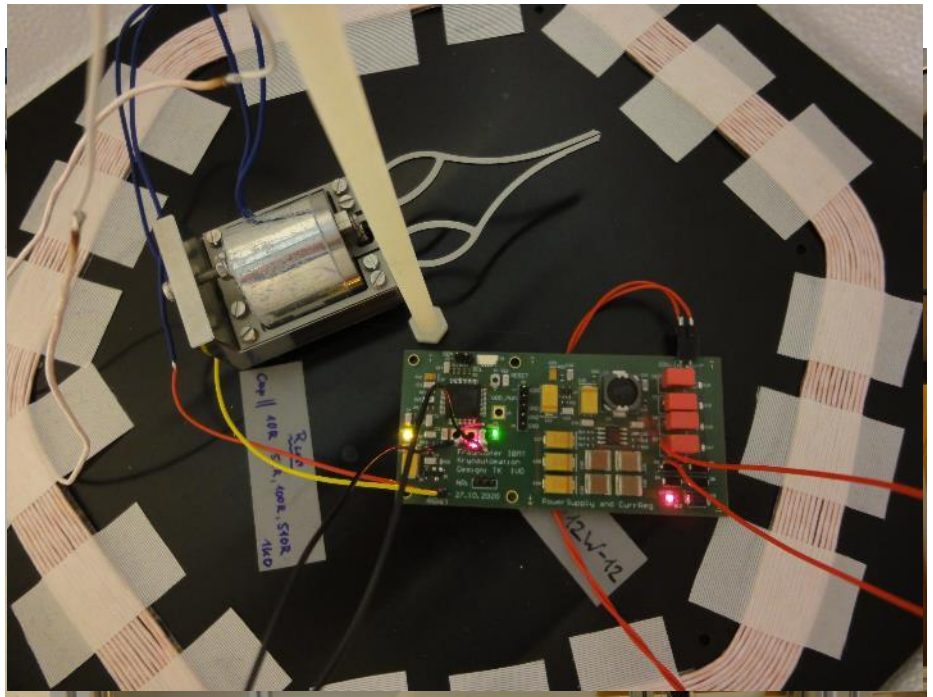
Messung

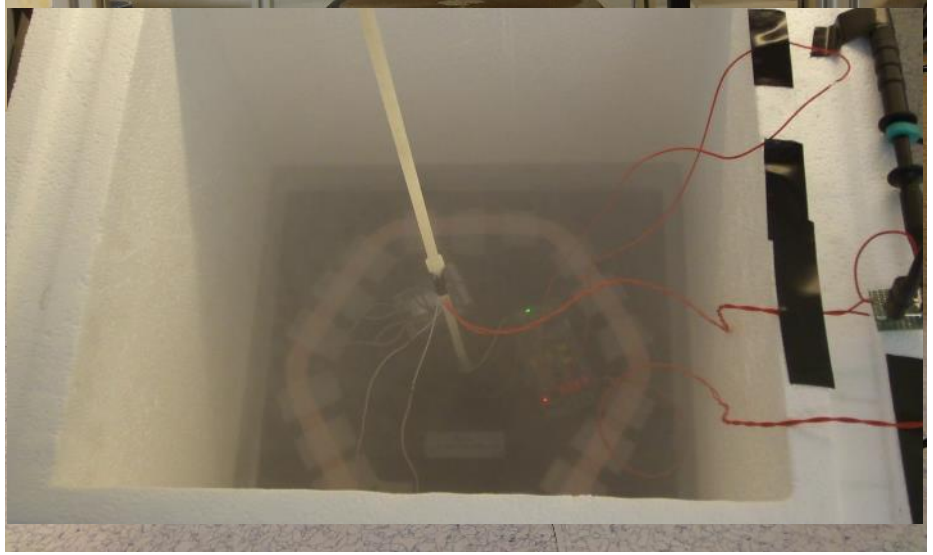
Realisierung und Erprobung des Funktionsmusters

Monolithische Greifzange und Steuerelektronik

1. Bei Raumtemperatur → Tastverhältnis von 50% (≈1,4 W Leistungsaufnahme)
2. In flüssigem Stickstoff → Tastverhältnis von 10% (≈0,3 W Leistungsaufnahme)

Abstand	Maximaler Wirkungsgrad (bei Raumtemperatur)	Maximaler Wirkungsgrad (in flüssigem Stickstoff)
9,5 cm	84,3%	86,5%
12,5 cm	77,5%	76,8%
17,5 cm	58,5%	65,4%
22,5 cm	42,6%	42,3%
27,5 cm	23,0%	26,4%
33,5 cm	9,0%	10,1%





Fraunhofer IBMT

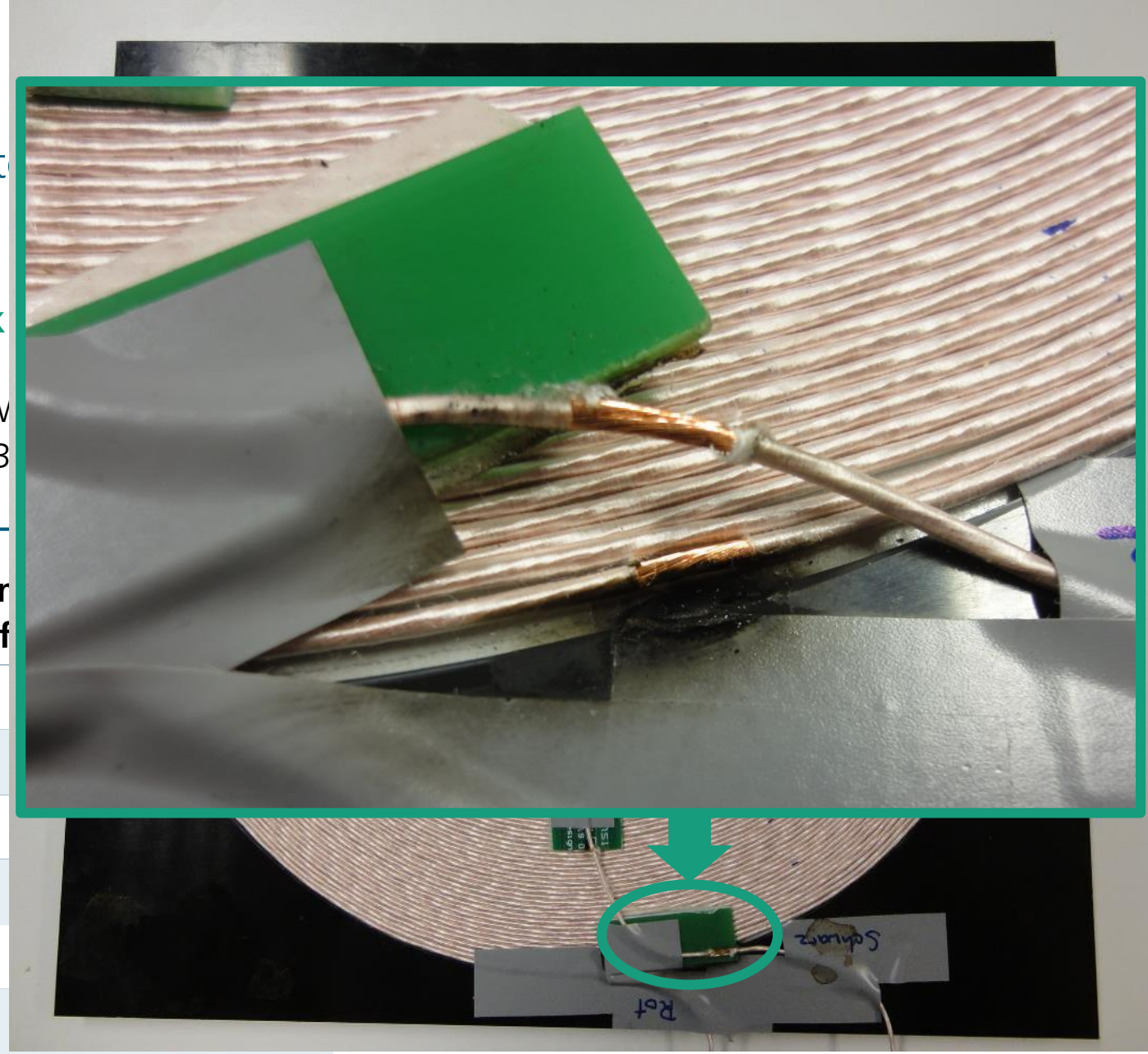
Messung

Realisierung und Erprobung des Funktionsmust

Monolithische Greifzange und Steuerelektronik

1. Bei Raumtemperatur → Tastverhältnis von 50% (≈1,4 V
2. In flüssigem Stickstoff → Tastverhältnis von 10% (≈0,3
3. **Oberhalb von 33,5 cm → Überspannung**

Abstand	Maximaler Wirkungsgrad (bei Raumtemperatur)	Maxir (in f
9,5 cm	84,3%	
12,5 cm	77,5%	
17,5 cm	58,5%	
22,5 cm	42,6%	
27,5 cm	23,0%	
33,5 cm	9,0%	



Fraunhofer IBMT

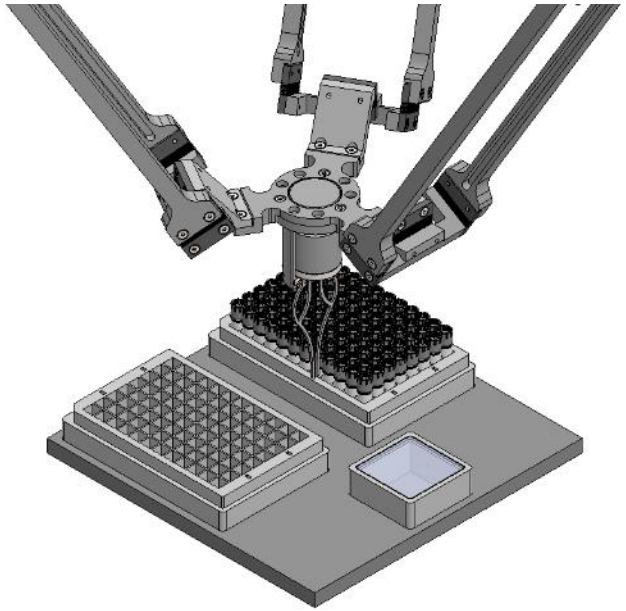
Zusammenfassung

Ergebnisse:

1. Realisierung und Erprobung des Funktionsmusters unter kryogenen Umgebungsbedingungen (ANSYS & Mathcad)
2. Wirkungsgrad von 86,5% und 76,8% in flüssigem Stickstoff bei einem jeweiligen Abstand von 9,5 cm und 12,5 cm
3. Grundlage für die geplante Automatisierung von Handhabungsprozessen unter kryogenen Umgebungsbedingungen

Nächste Schritte:

1. Integration des induktiven Energieübertragungssystems in einem Behälter aus Edelstahl und der Robotorstruktur → Wirbelstromverluste
2. Integration des Barcodescanners



ngsgrad ickstoff)
86,5%
76,8%
65,4%
42,3%
26,4%
10,1%

Fraunhofer IBMT

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.

Fraunhofer IBMT

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

match Institut für Montagetechnik