

Robuste Kühlung und Sicherheitsdiagnostik für supraleitende Motoren

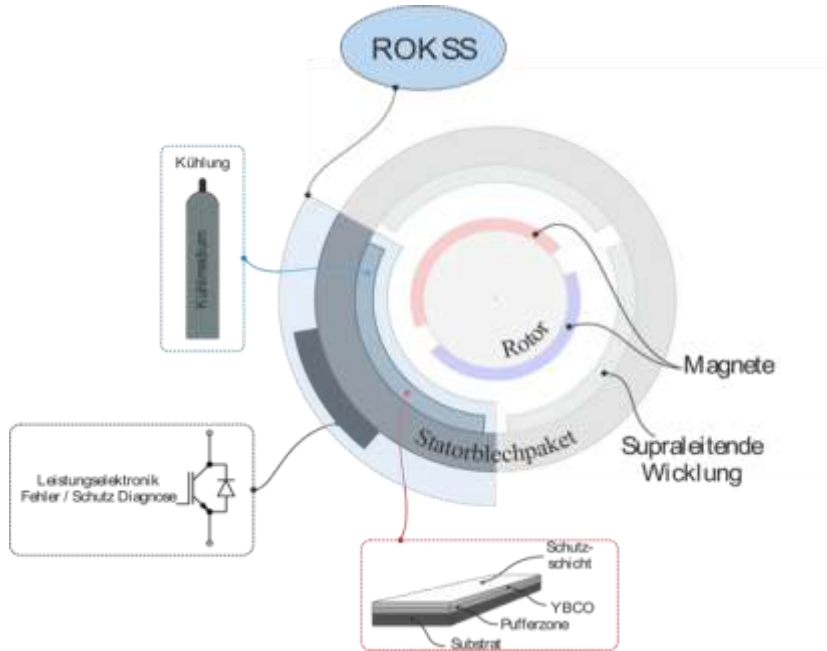
Thomas Reis

**A.T.A.M. deWaele, Johannes Oswald, Bernhard Oswald, Eva Berberich
Oswald Elektromotoren GmbH**

www.oswald.de

**Johannes Teigelkötter, Alexander Stock, Johannes Büdel
Labor für elektrische Maschinen, Leistungselektronik und Antriebe
Hochschule Aschaffenburg**

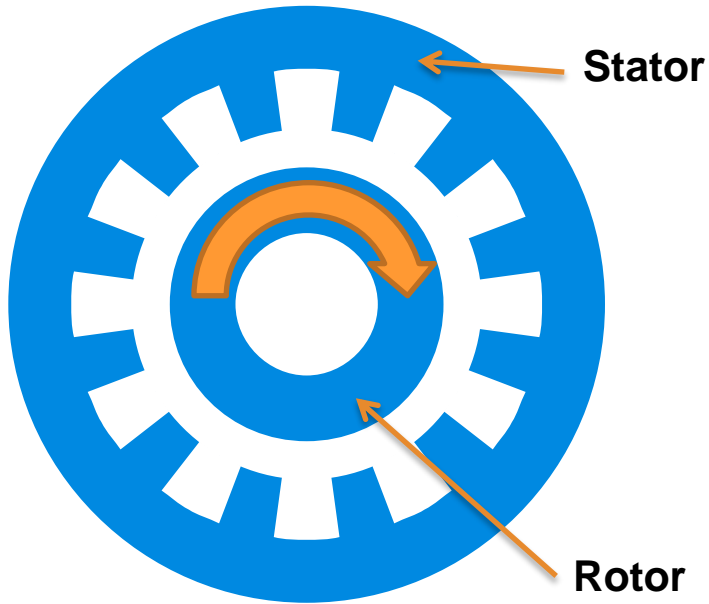
www.ema-ab.de



- **Supraleiter im Motor**
- **Anforderungen an die Kryotechnik**
- **Sicherheitsdiagnostik**

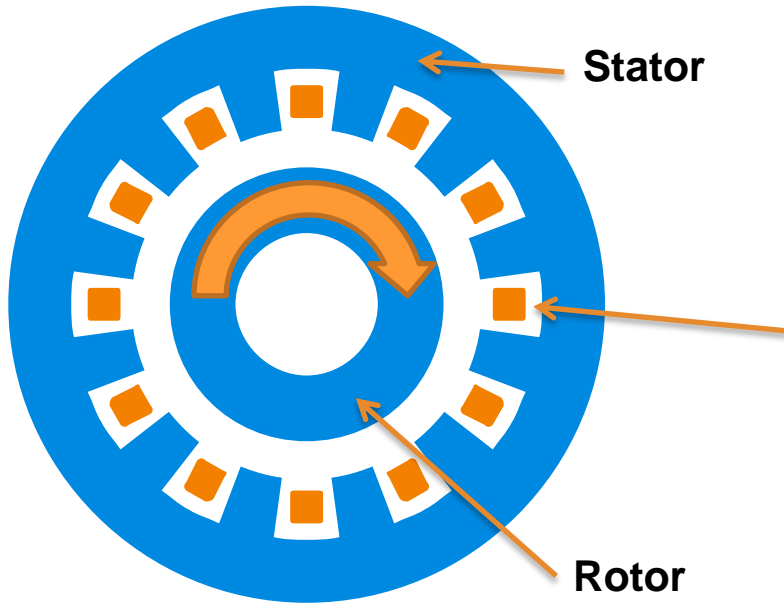
ROKSS-Projekt: Robuste Kühlung und Sicherheitsdiagnostik für supraleitende Motoren

Förderprogramm: KMU-innovativ des Bundesministerium für Bildung und Forschung



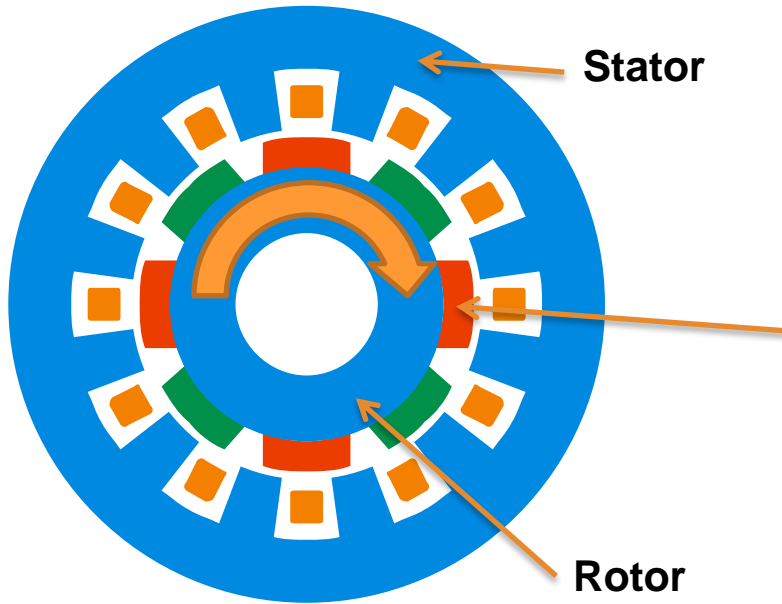
- **Rotor und Stator bestehen aus Eisen um den magnetischen Fluss effizient zu führen und nach außen abzuschirmen.**

Funktionsweise Motor

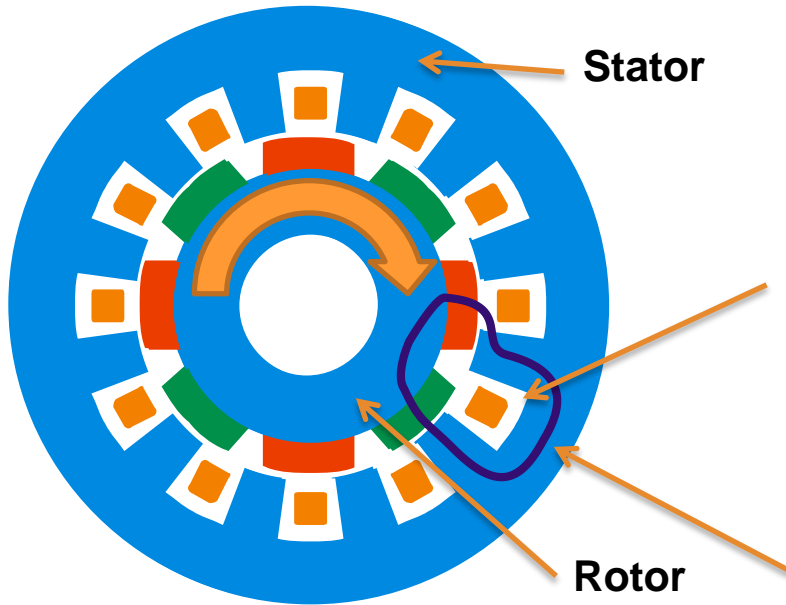


- Im Stator ist ein System aus Spulen untergebracht.
- Diese Spulen erzeugen ein Magnetfeld in Abhängigkeit von der Stromstärke und -richtung

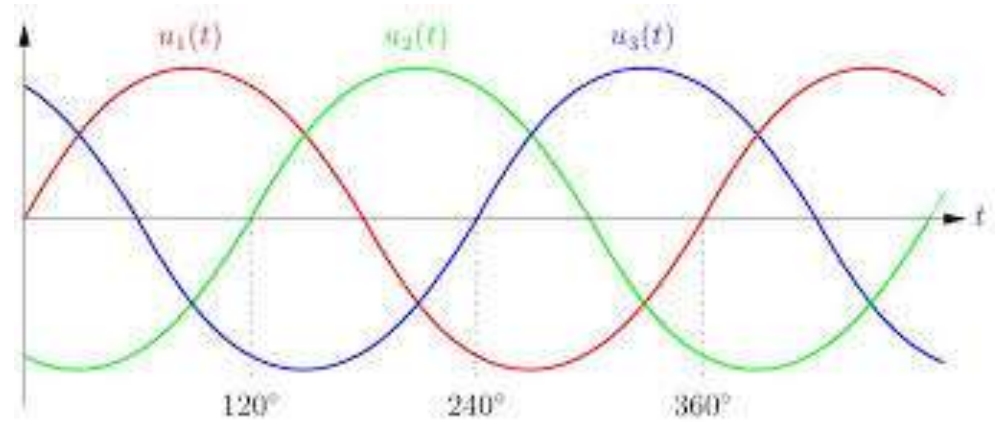
Funktionsweise Motor



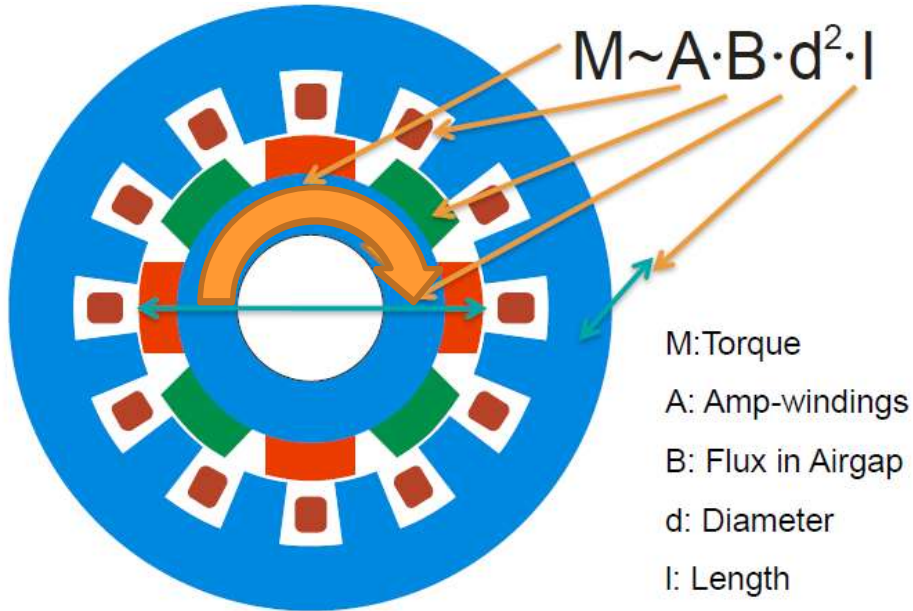
- **Der Rotor hat an seiner Oberfläche ein statisches Magnetfeld**
- **Dieses wird z.B. durch Permanentmagnete oder Wicklungssysteme mit Gleichstrom erregt**



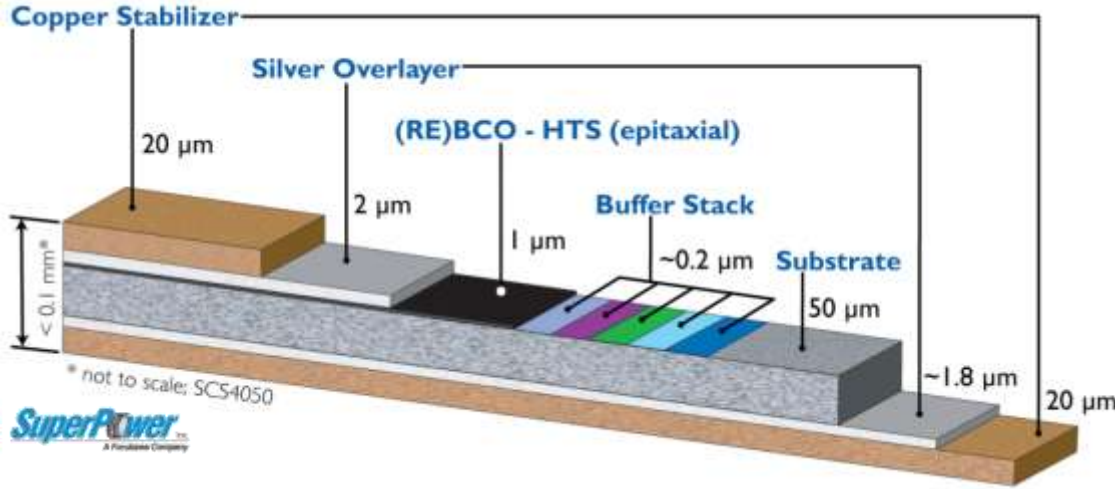
- Durch Drehstrom im Wicklungssystem entsteht ein rotierendes Magnetfeld



- An diesem rotierenden Feld hält sich das Gleichfeld des Rotor fest
- Die Kraftkopplung zw. Rotor und Stator erfolgt durch Magnetfelder



- Alle stromführenden Teile im Motor haben Potential durch den Einsatz von Supraleitern (SL) eine Kraft- und Leistungssteigerung zu bewirken.
- Das Drehmoment ist direkt proportional zum Strombelag des Stator oder der Felderregung im Rotor.



Anwendung von HTSL in Motoren:

- ermöglichen deutlich höhere Stromdichten
- ... und damit erhöhte Kraft- und Leistungsdichte
- ... und kleineres Trägheitsmoment für höhere Dynamik

Stromdichte	300K A/mm ²	77K A/mm ²	35K A/mm ²
Kupfer	20	55	110
YBCO	-	25000	150000
YBCOcc	-	250	1500
... incl. Kryostat	-	200	1000

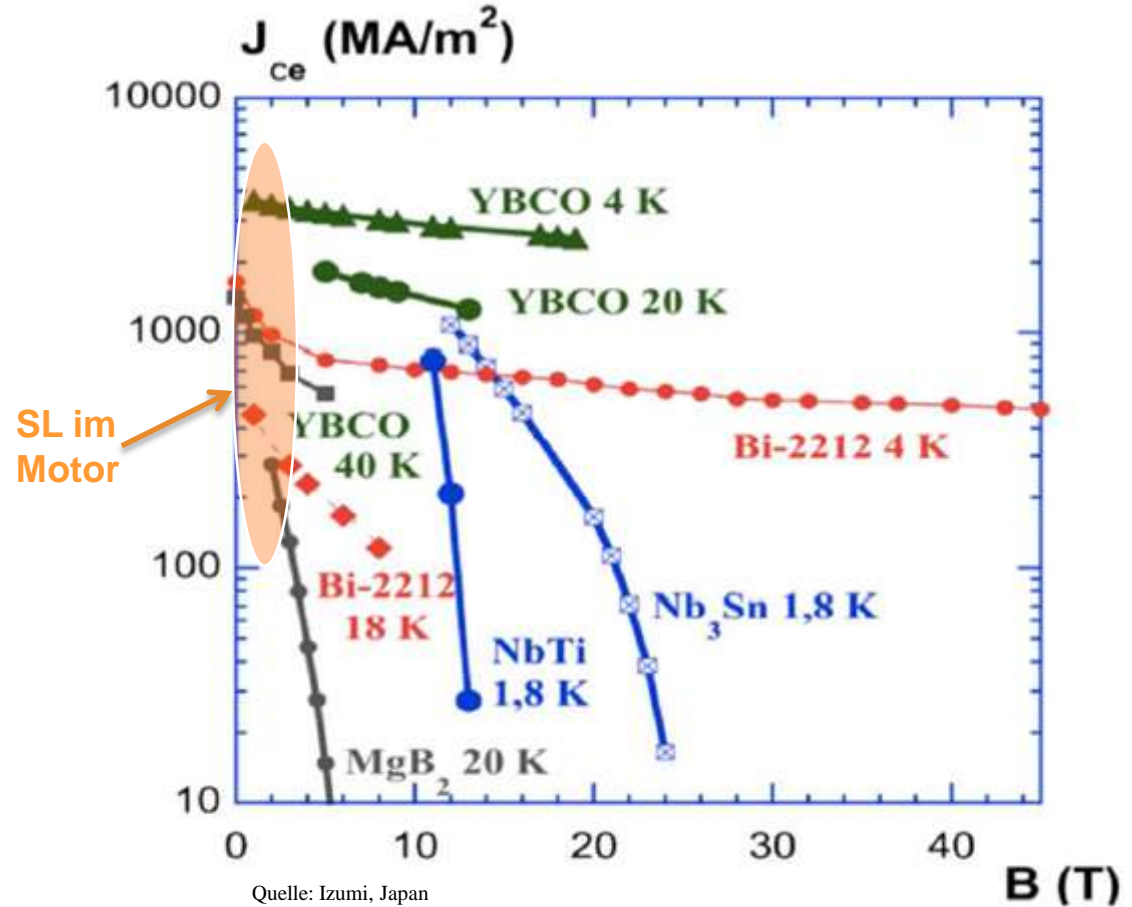
Rahmenbedingungen für SL:

- Integration eines kryogenen Systems in den Motor notwendig
- Keramische Eigenschaften der SL erschweren mech. Aufbau

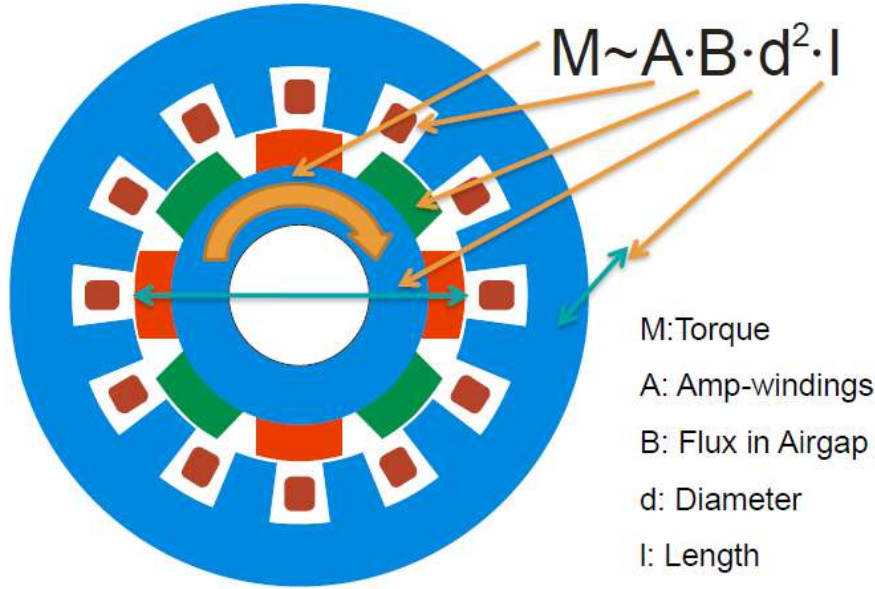
Welche SL im Motor?

Kompromiss zwischen:

- krit. Stromdichte
- Betriebstemperatur
- Kryosystem
- Verfügbarkeit
- Kosten
- Abmessungen
- Verluste
- ...

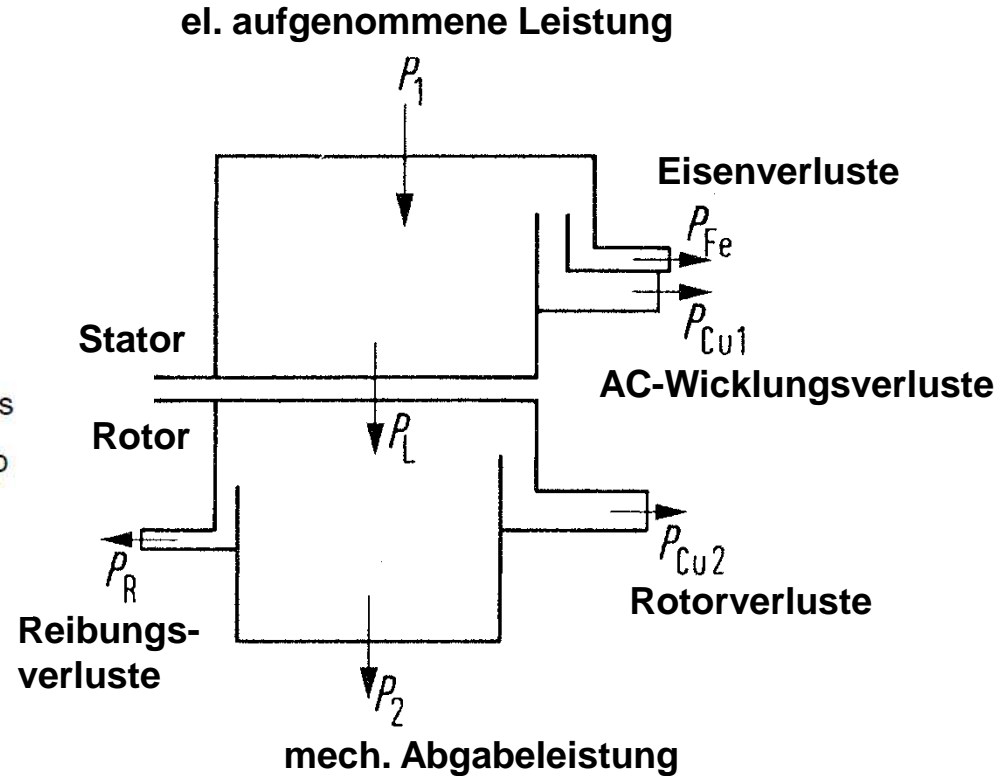


SL im Motor – aber wo?



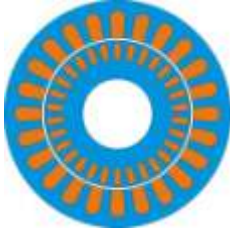
A: SL AC-Wicklung, ...

B: SL DC-Wicklung, Bulk, Stack, ...

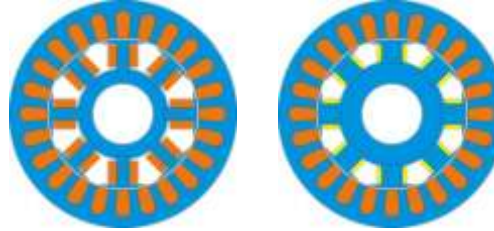


SL im Motor – aber wo?

NL Asynchronmotor



NL – Rotor fremderregt – SL



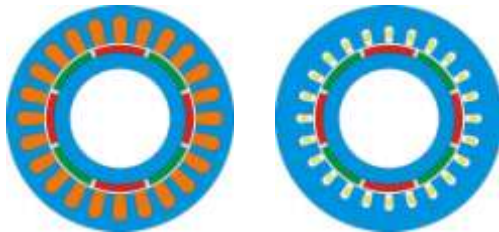
200%

vollst. SL-Motor



> 300%

NL – PM-Rotor – SL



250%

NL – Reluktanzrotor – SL



130%



Referenz: 100% Leistungsdichte

und zahlreiche weitere:

- Homopolar
- Axialfluss
- Transversalfluss

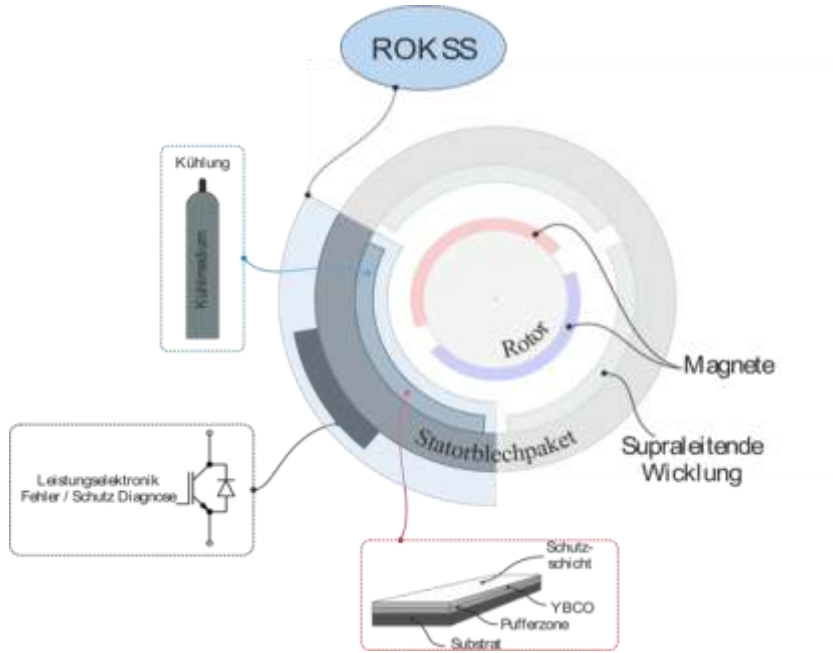
...

blau: Eisen

orange: Normalleiter (NL)

gelb: Supraleiter (SL)

rot/grün: Magnete



ROKSS-Projekt: Robuste Kühlung und Sicherheitsdiagnostik für supraleitende Motoren

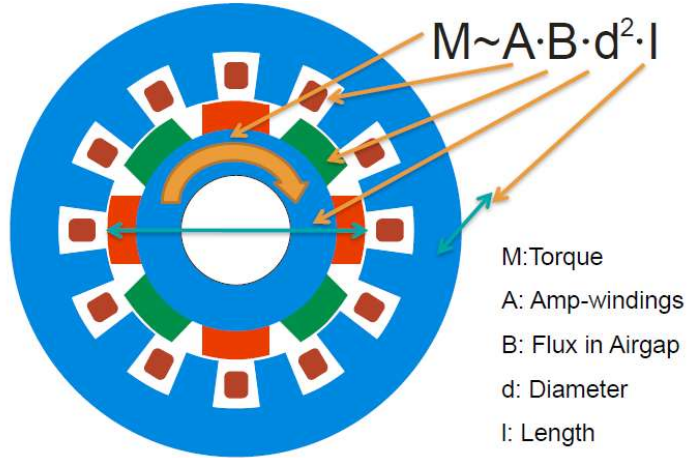
Förderprogramm: KMU-innovativ des Bundesministerium für Bildung und Forschung

- **Vorteile der SL im Motor bekannt**
- **Aber weshalb sind SL-Motoren kommerziell nicht verfügbar?**
- **Bewährte Rotorkühlung**
- **Aufgaben in der Stator Kühlung**
- **Motorwirkungsgrad von 99,7% wird durch Kryotechnik schnell zu 95%**

SL im Rotor

Erhöhung des „B“:

kryogene Kühlung von SL Rotorkomponenten



pro's:

- niedrige therm. Verluste
(SL in DC-Anwendung)

con's:

- Durchführung für Kühlmittel in rotierendes System
- Teile des Kryostat rotieren
- Kombination von Kryogenen Medien, Dichtungen und Lagerung

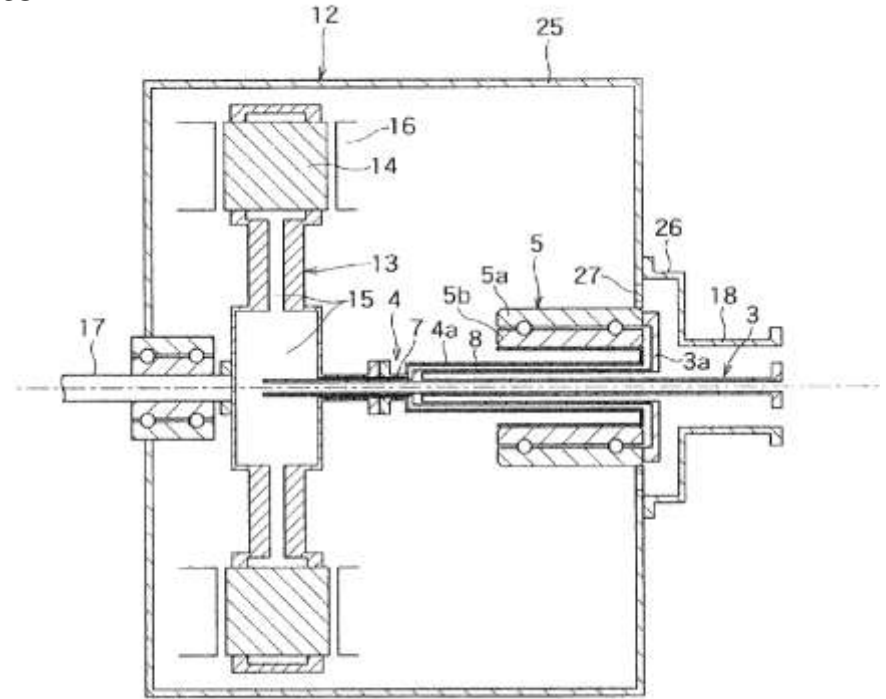
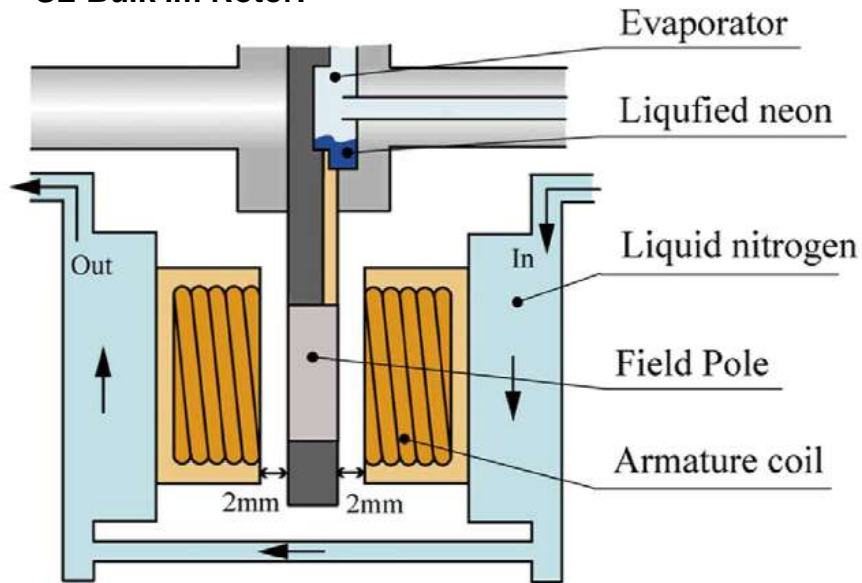
- Bisher fast alle SL Motoren/Generatoren mit kaltem Rotor
- Viele Kryostat-Topologien wurden erprobt:
-> zwei vielversprechende Lösungen...

...für 100W Kühlleistung bei 1MW Motorleistung

SL im Rotor Thermosyphon

- Wesentliche Aufgaben sind gelöst (Dichtung, Lagerung, ...)
- Anwendbar für alle Motortopologien mit SL im Rotor
- zahlreiche Veröffentlichungen und Patente...

z.B. Axialflussmotor mit
SL-Bulk im Rotor:



Quelle: Tokyo University of Marine Science and Technology, Patent US8616587B2

SL im Rotor Thermosyphon

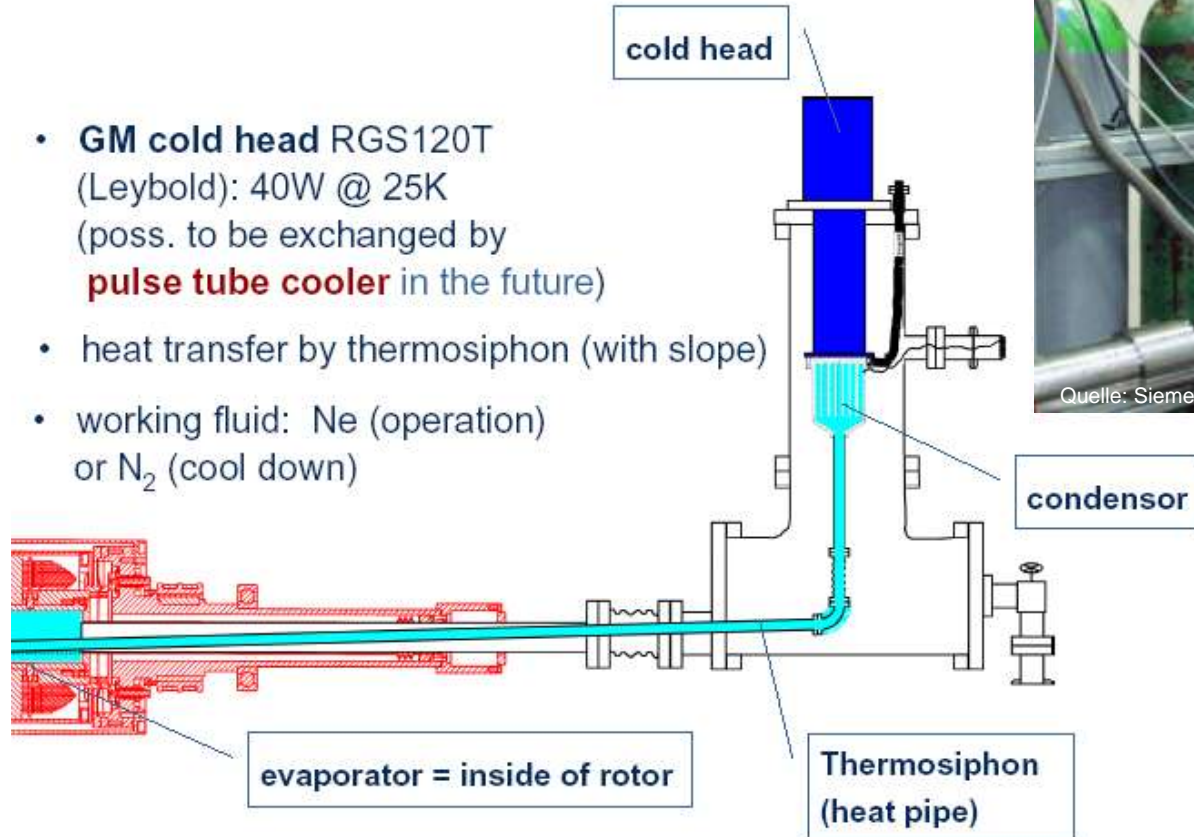
z.B. Fremderregter Motor mit
SL Spulen im Rotor:

Siemens
HTS I:

1999 - 2002
400 kW
1500 rpm

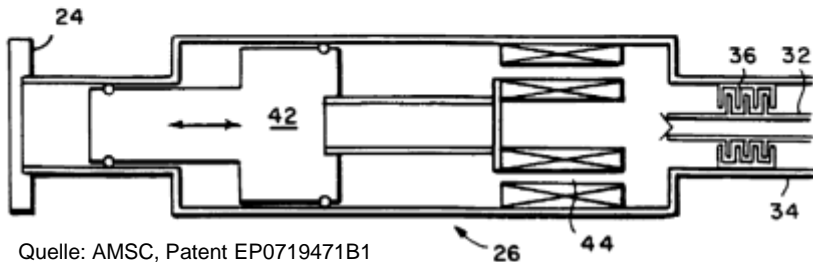
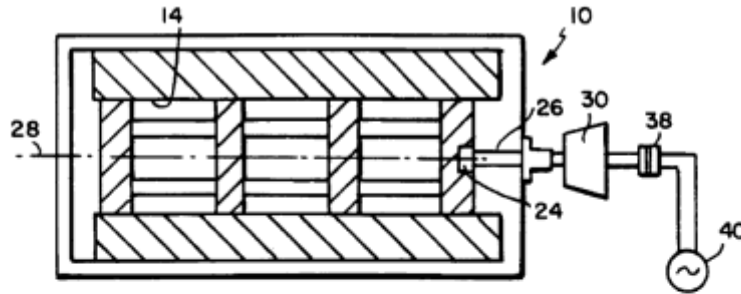
technology
demonstrator

- **GM cold head** RGS120T (Leybold): 40W @ 25K (poss. to be exchanged by **pulse tube cooler** in the future)
- heat transfer by thermosiphon (with slope)
- working fluid: Ne (operation) or N₂ (cool down)



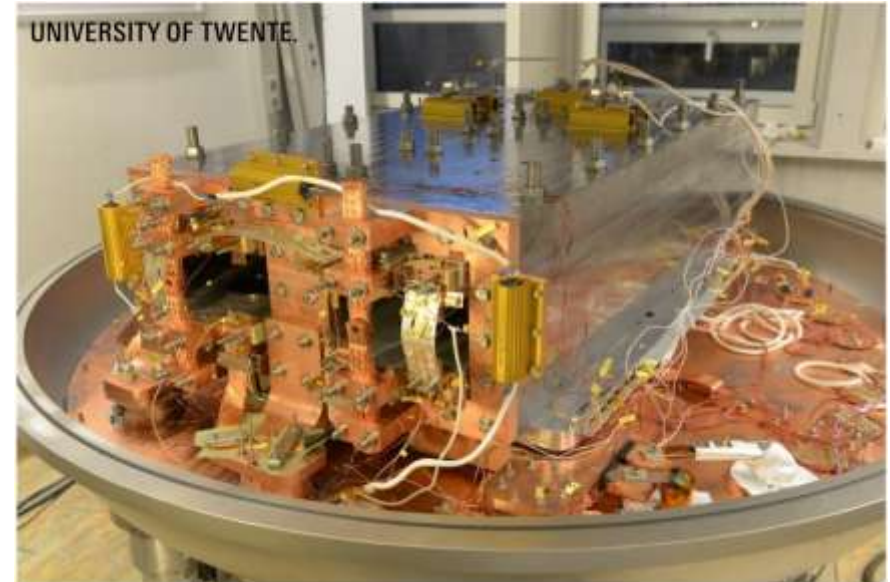
SL im Rotor aktiver Kaltkopf

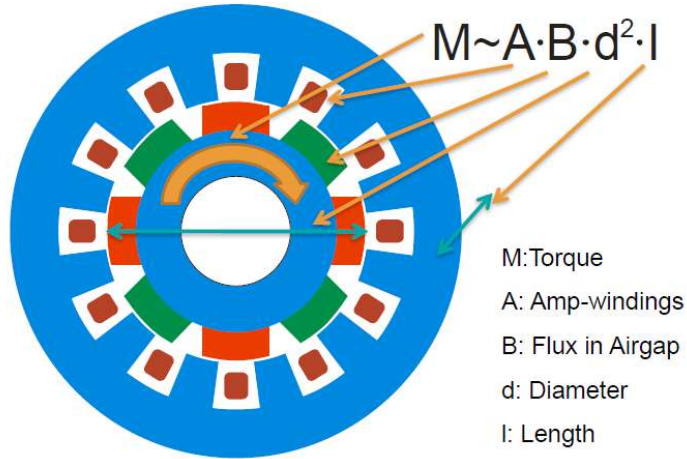
- Kaltkopf integriert im Rotor
- Kompressor dreht nicht mit
- Lösungen für Arbeitsgas – Durchführungen bekannt seit den 90'ern



Quelle: AMSC, Patent EP0719471B1

Wird umgesetzt im ecoswing project:
Spulen wurden getestet an der University
of twente: Mit „Cu coldbus“
(Details morgen um 9:15: Envision)





Erhöhung des „A“:

kryogene Kühlung von SL Stator Komponenten

pro's:

- stehender Kryostat
- stehende Versorgung

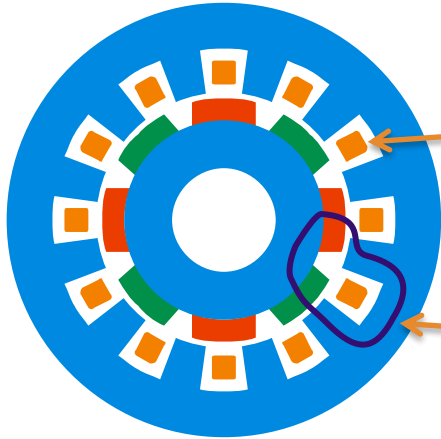
con's:

- Nennenswerte AC Verluste im SL (bis zu 1% der Gesamtleistung)
-> Kühlkapazität!
- Falls Kryostat zw. Stator und Rotor liegt: Wände werden voll durchsetzt von drehendem magnetischem Hauptfluss
-> Wirbelströme!

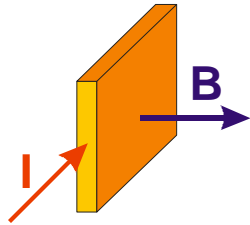
- Nur wenige Systeme wurden bislang realisiert
- Betrieb oft in offenem IN2-Becken
- Geschlossene und robuste Systeme für notwendig

...für 1kW Kühlleistung bei 1MW Motorleistung

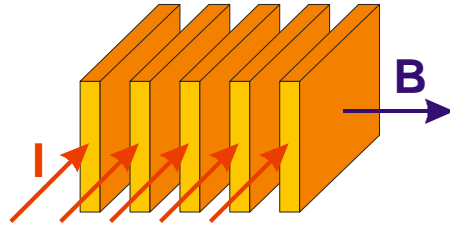
SL Verluste bei AC-Anwendung



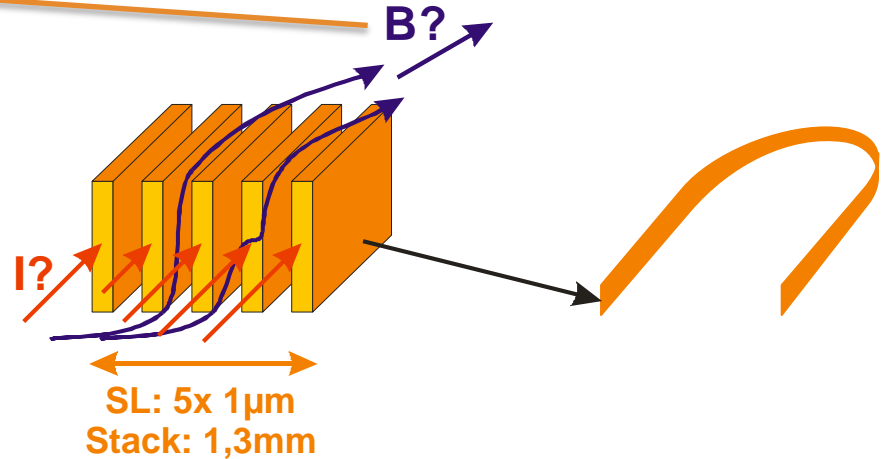
Verluste in der Spule mit Wechselstrom,
externen Feldern, ... ?



Verluste im Einzel-
leiter können analy-
tisch berechnet
werden

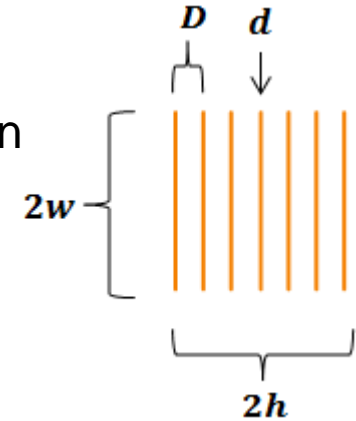


Gute analytische
Näherungslösung
für Stack im Feld



SL Verluste bei AC-Anwendung

Verluste im Einzelband im Eigenfeld können berechnet werden



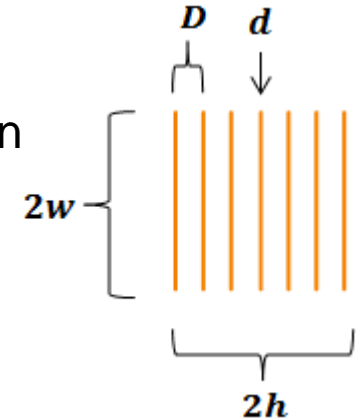
Verluste im Einzelband im Eigenfeld können berechnet werden

Näherung für Stack (Teil der Spule in der Nut):

- Verluste durch Stromtransport im Eigenfeld:

$$P_{Trans} = \frac{16\mu_0 J_c^2 w^2 h^2}{\pi} \left[\left(1 - \frac{I}{I_c}\right) \ln \left(1 - \frac{I}{I_c}\right) + \left(1 + \frac{I}{I_c}\right) \ln \left(1 + \frac{I}{I_c}\right) - \frac{I^2}{I_c^2} \right]$$

nach Clem et al.



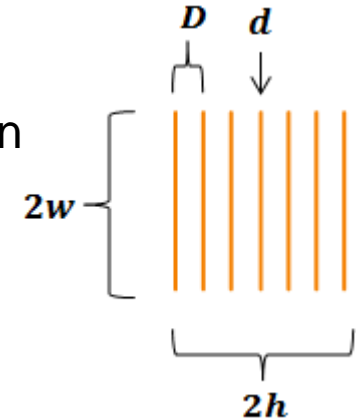
Verluste im Einzelband im Eigenfeld können berechnet werden

Näherung für Stack (Teil der Spule in der Nut):

- Verluste durch Stromtransport im Eigenfeld:

$$P_{Trans} = \frac{16\mu_0 J_c^2 w^2 h^2}{\pi} \left[\left(1 - \frac{I}{I_c}\right) \ln \left(1 - \frac{I}{I_c}\right) + \left(1 + \frac{I}{I_c}\right) \ln \left(1 + \frac{I}{I_c}\right) - \frac{I^2}{I_c^2} \right]$$

nach Clem et al.



- Verluste durch äußeres Magnetfeld:

$$P_{Hyst} = \frac{2\mu_0 D^2}{\pi w d} \int_0^{H_m} dH_a (H_m - 2H_a) \times \ln \left[1 + \frac{\sinh^2(\pi w/D)}{\cosh^2(H_a/H_0)} \right]$$

nach Mawatari et al.

Verluste im Einzelband im Eigenfeld können berechnet werden

Näherung für Stack (Teil der Spule in der Nut):

- Verluste durch Stromtransport im Eigenfeld:

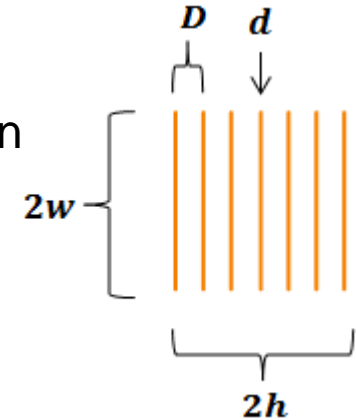
$$P_{Trans} = \frac{16\mu_0 J_c^2 w^2 h^2}{\pi} \left[\left(1 - \frac{I}{I_c}\right) \ln \left(1 - \frac{I}{I_c}\right) + \left(1 + \frac{I}{I_c}\right) \ln \left(1 + \frac{I}{I_c}\right) - \frac{I^2}{I_c} \right]$$

nach Clem et al.

- Verluste durch äußeres Magnetfeld:

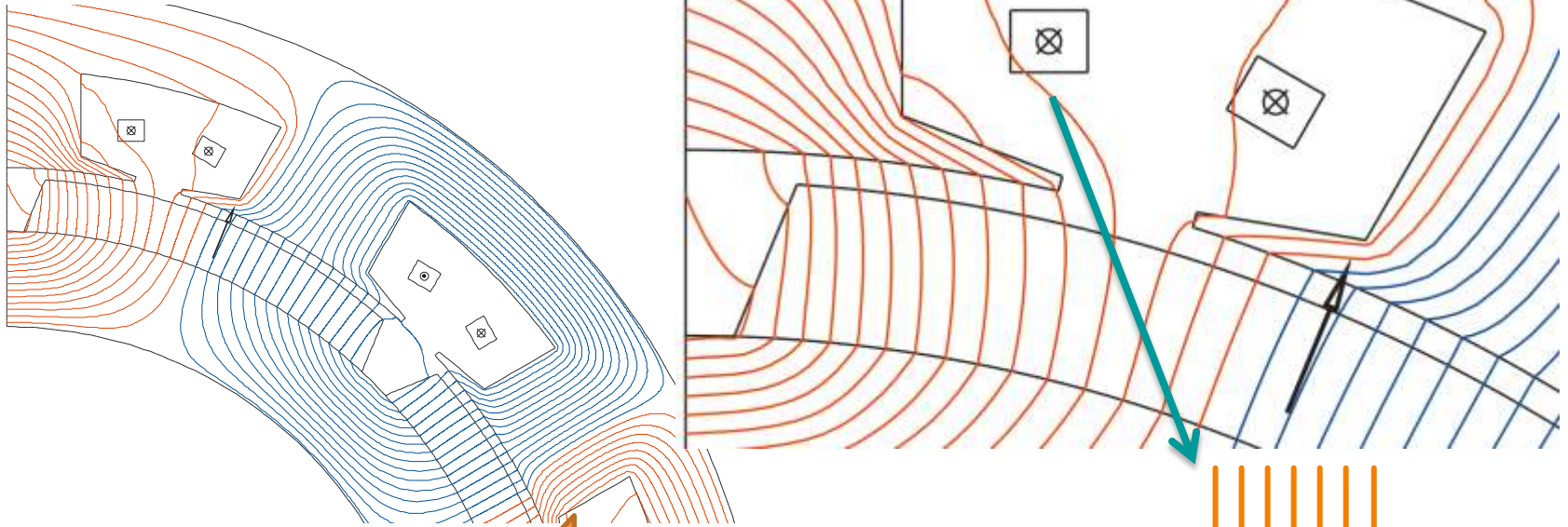
$$P_{Hyst} = \frac{2\mu_0 D^2}{\pi w d} \int_0^{H_m} dH_a (H_m - 2H_a) \times \ln \left[1 + \frac{\sinh^2(\pi w / D)}{\cosh^2(H_a / H_0)} \right]$$

nach Mawatari et al.

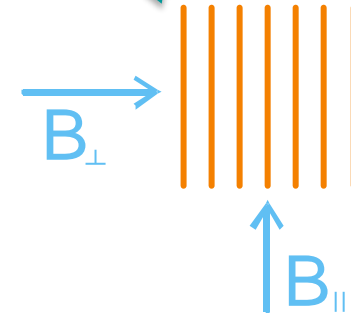


Einfluss auf
krit. Strom

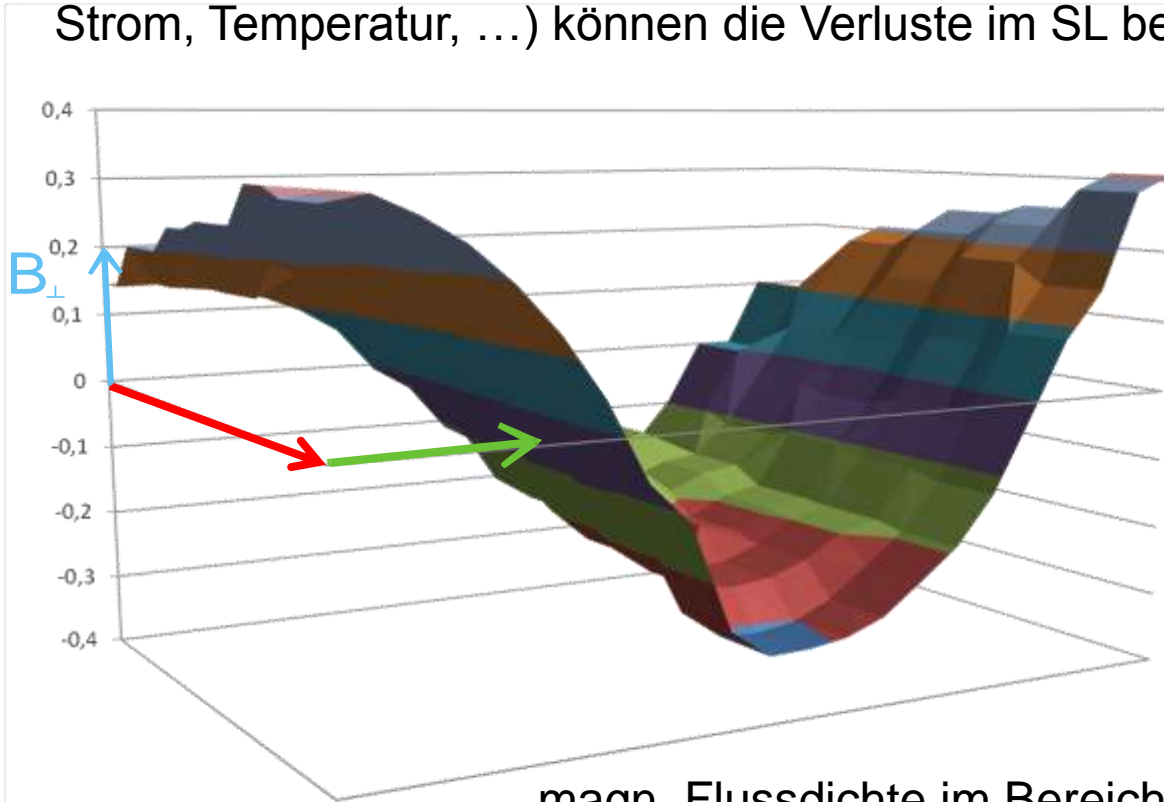
Einfluss des Kryostaten auf Verluste
in SL-Spule:



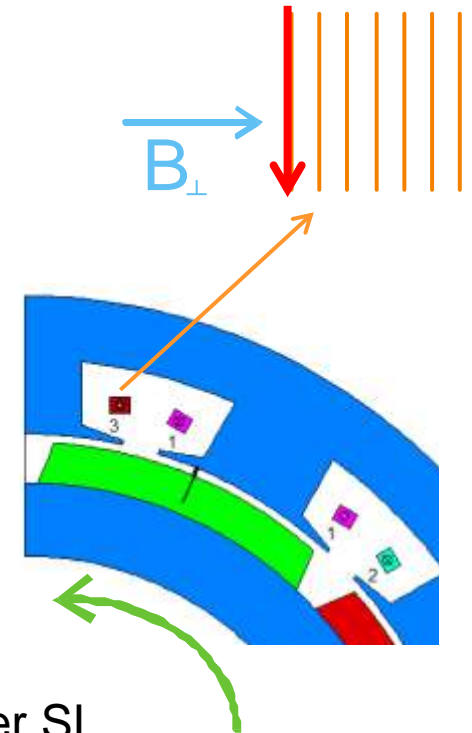
- Kryostat braucht Platz
- Größere Nut erhöht den Streufluss
- Höherer Fluss durch SL steigert die Verluste
- Kryostat mit größerer Kühlkapazität wird benötigt



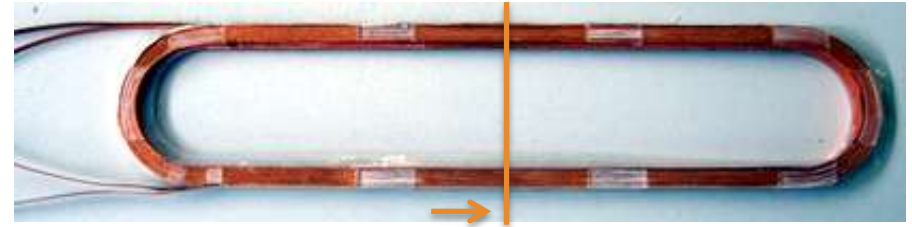
Mit den Materialdaten des SL und den Randbedingungen (ext. Magnetfeld, Strom, Temperatur, ...) können die Verluste im SL bestimmt werden.



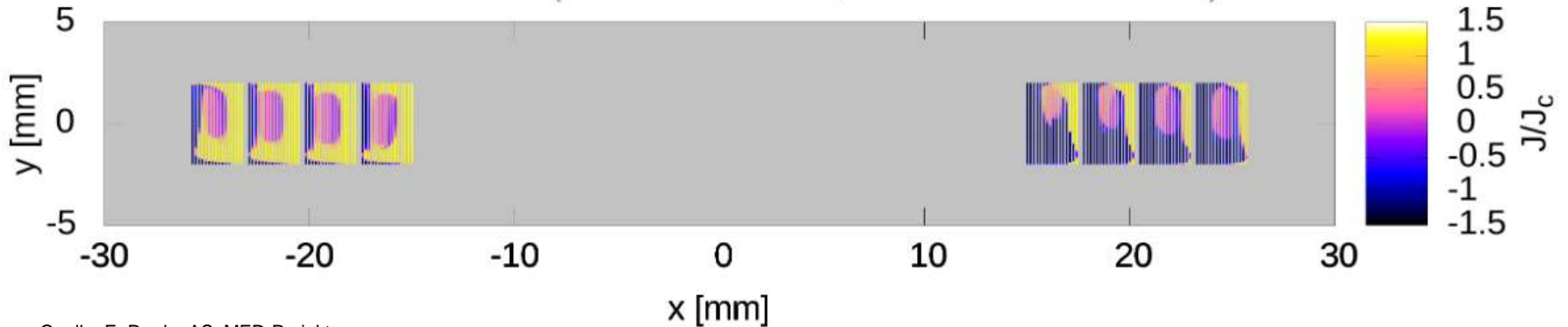
magn. Flussdichte im Bereich der SL



Mit den Materialdaten des SL und den Randbedingungen (ext. Magnetfeld, **Strom** Temperatur, ...) können die Verluste im SL bestimmt werden.

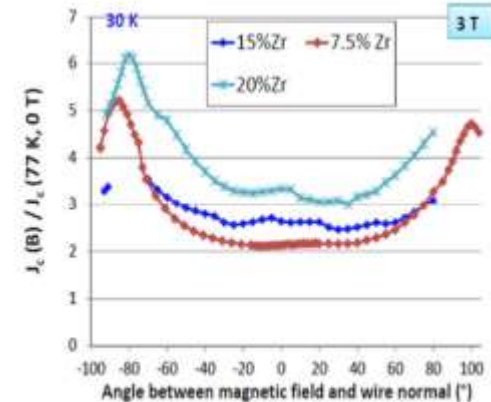
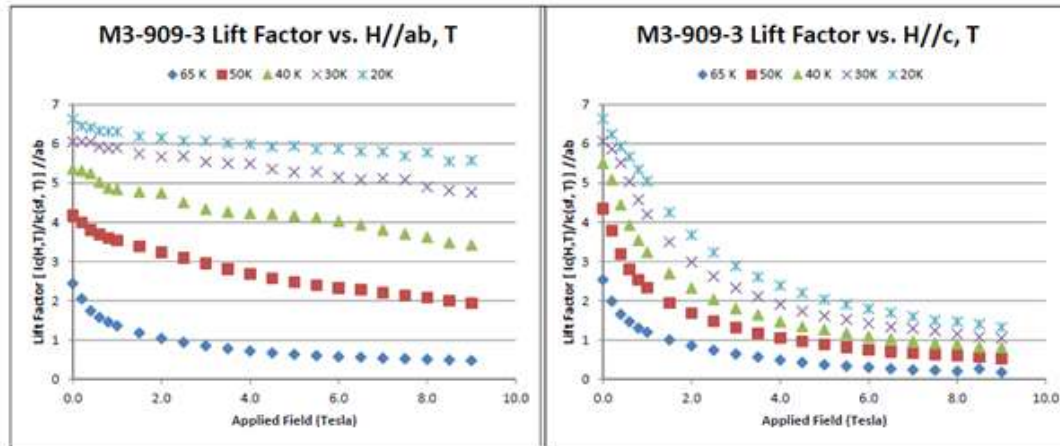


full motor with iron and rotor (situation with load; same current as above)

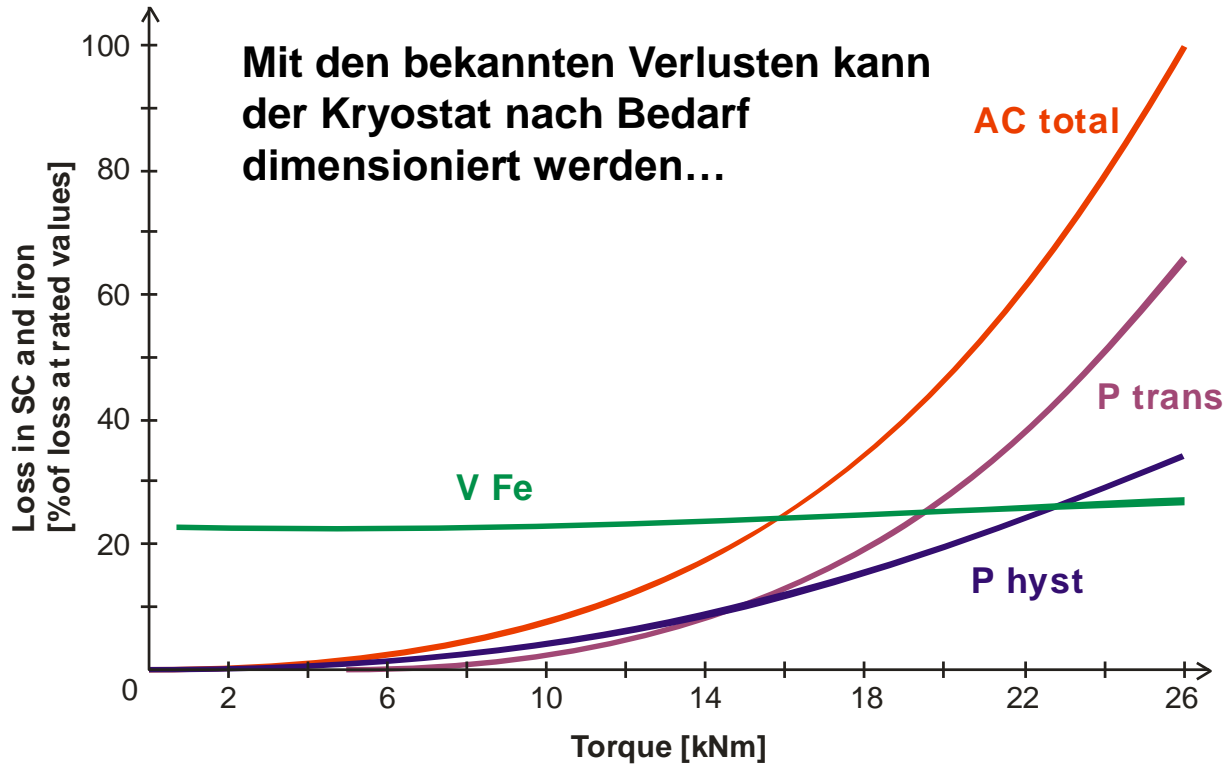


Quelle: E. Pardo, ASuMED-Projekt

Mit den **Materialdaten** des SL und den Randbedingungen (ext. Magnetfeld, Strom, **Temperatur, ...**) können die Verluste im SL bestimmt werden.



Mit den Materialdaten des SL und den Randbedingungen (ext. Magnetfeld, Strom, Temperatur, ...) können die Verluste im SL bestimmt werden.





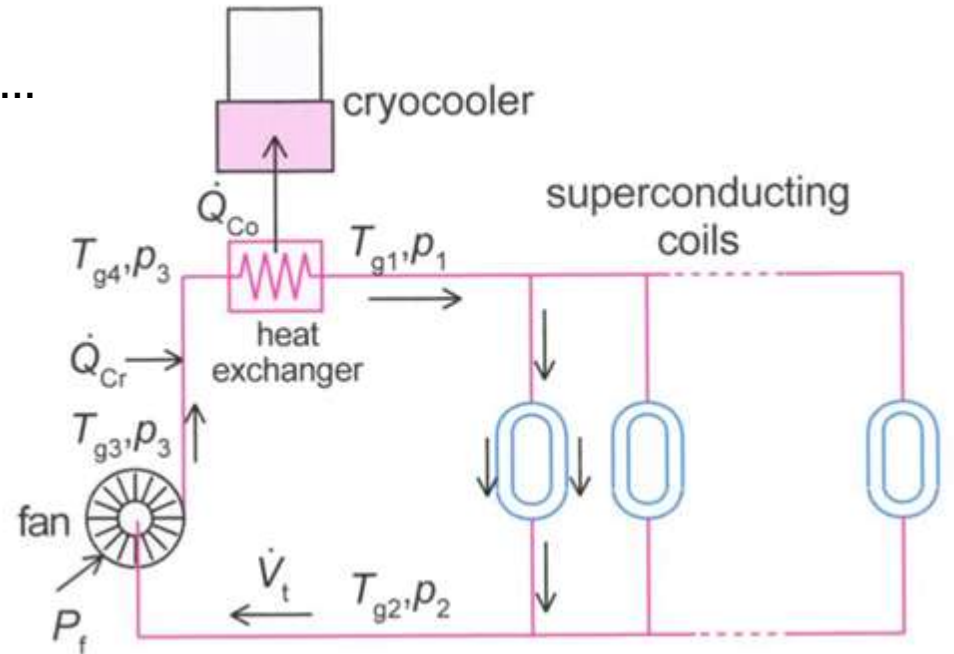
Möglichkeiten der Kühlung:

- direkter Kontakt / Wärmeleitung
- Kühlung mit **Gas** Flüssigkeit, ...
- **Wärmekapazität** Verdunstungsenthalpie, ...
- **geschlossener**, offener Kreis, ...

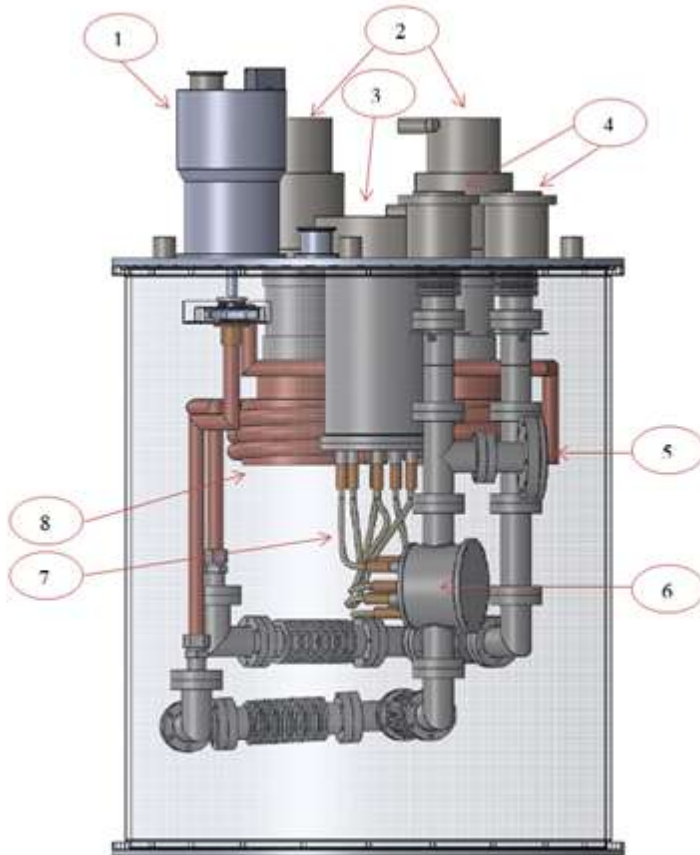


Quelle: CryoZone

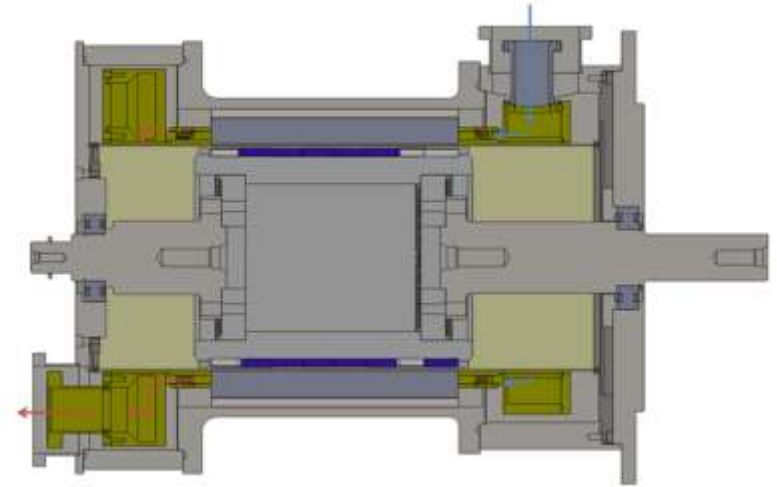
Ventilator



SL Kühlsystem im Stator

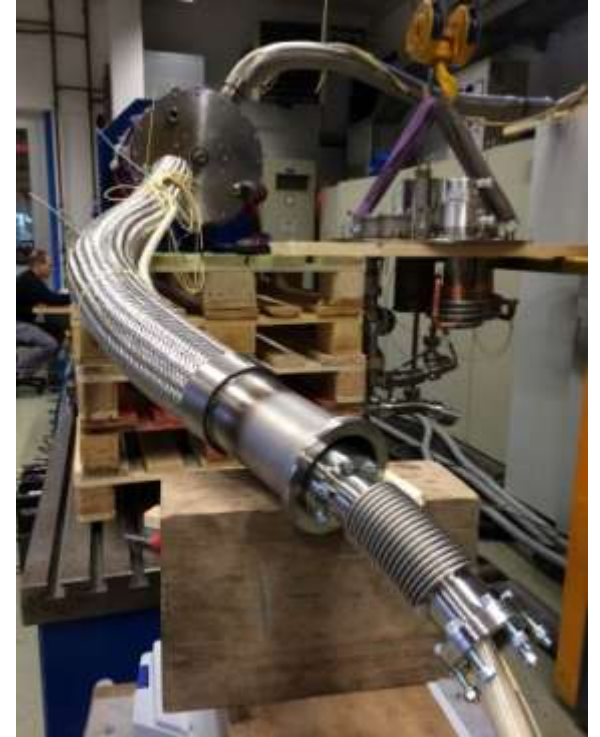
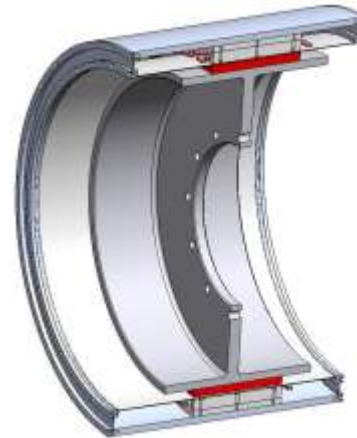
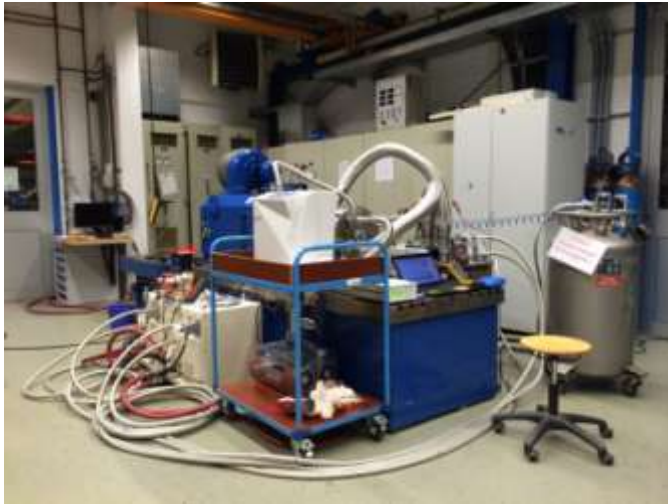


1. Umwälzung
2. Kaltkopf
3. Power terminal (warm)
4. Transfer lines zum Motor
5. Sensorik terminal (kalt)
6. Power terminal (kalt)
7. Power transmission (kalt-warm)
8. Wärmetauscher



SL Kühlsystem im Stator

Leistung:	40	kW
Geschwindigkeit:	665	rpm
Drehmoment:	575	Nm
Wirkungsgrad:	99,6	%
Beschleunigung:	>10.000	rpm/s
YBCOoc-tape:	400	m

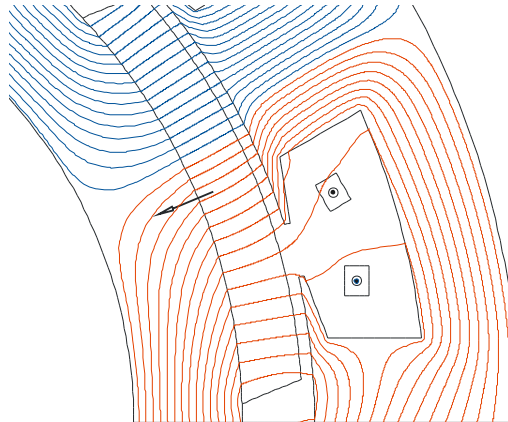


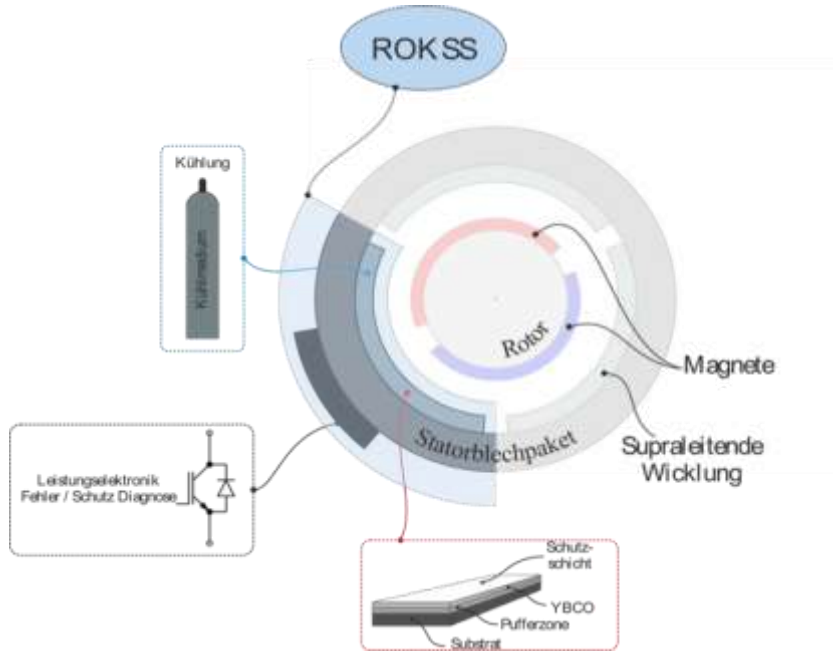
Zielvorgaben für Kryosystem:

- Verwendbar für He, H₂, N₂, Ne, ...
- Verwendbar für flüssige und gasförmige Kryogene
- Betriebstemperatur <77K
- Zuverlässige Abfuhr der Verluste bei kryogener Temperatur (0,1% der Motorleistung)
- Nur SL und Kryosystem auf kalter Temperatur

Kompakte Integration im Stator:

- Kryosystem im aktiven Teil
< 2% des Volumen
- Isolierung im aktiven Teil
< 10% des Volumen



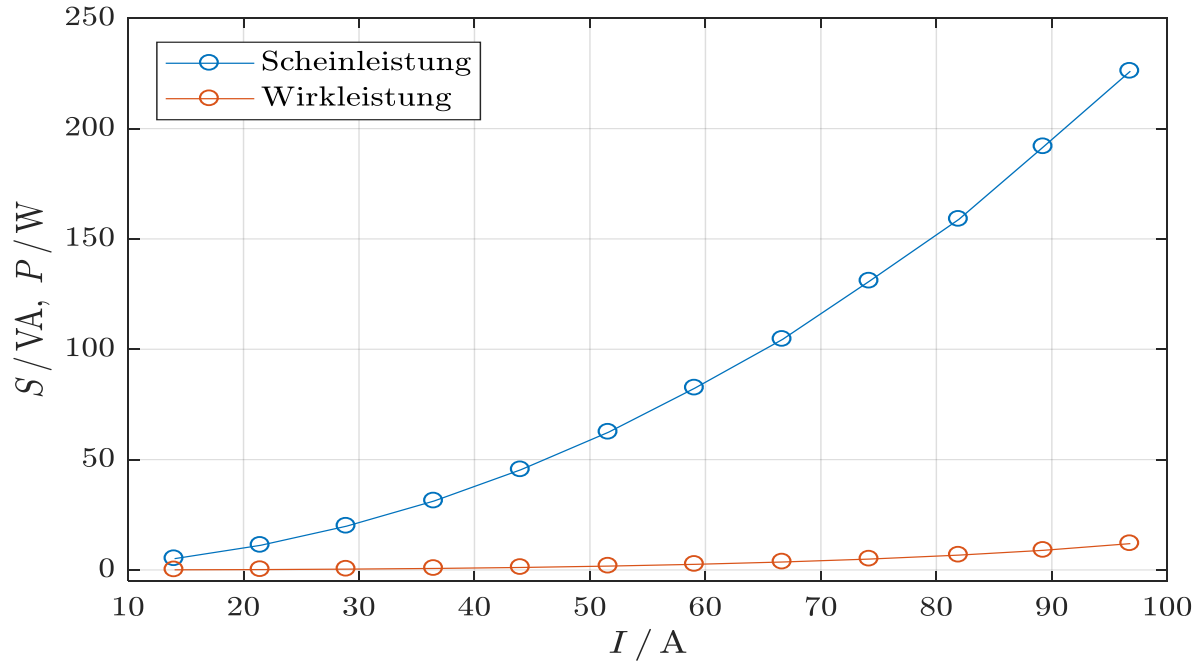


- **Kühlung für Normalbetrieb (und evtl. Überlast) ausgelegt**
- **Im Störfall ist Stromdichte für nicht-SL extrem hoch**
- **SL AC-Wicklungssystem muss aktiv überwacht und geschützt werden**

ROKSS-Projekt: Robuste Kühlung und Sicherheitsdiagnostik für supraleitende Motoren

Förderprogramm: KMU-innovativ des Bundesministerium für Bildung und Forschung

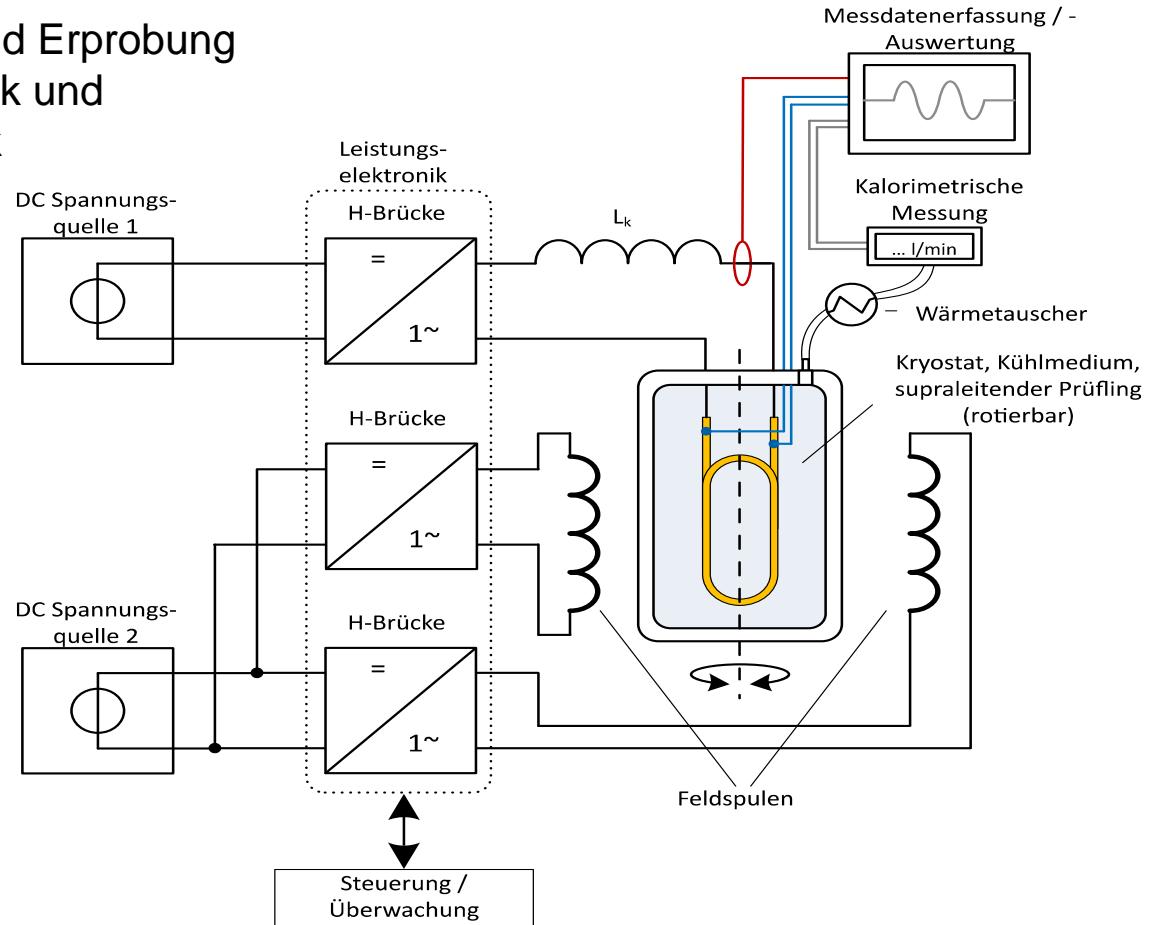
- Überwachung muss in ms Fehlerströme erkennen und abschalten
- Fehlerströme mit 1% des Nutzstroms gefährden bereits die SL



z.B. Diagnostik über
Verlustleistung:

- Hohe Scheinleistung bei geringen Verlusten
- Messung muss sehr genau und dynamisch erfolgen

Prüfstand zur Verifizierung und Erprobung geeigneter Leistungselektronik und zugehöriger Schutzdiagnostik





Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



SuTor:

**Erstes geschlossenes kryogene
Kühlsystem in einem SL-Stator**



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



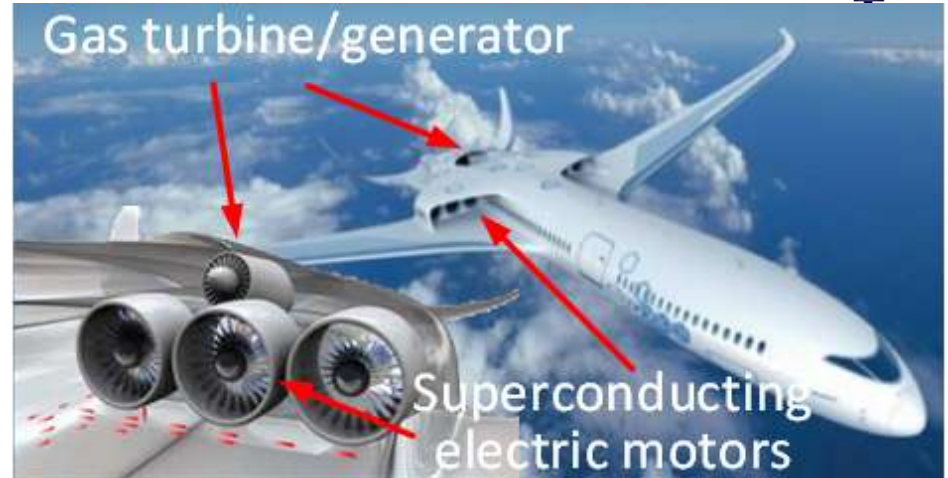
DLR Projektträger

ROKSS:

**Erweiterung des Kühlsystems
für verschiedene Kühlmedien
und Sicherheitsdiagnostik**

Danke für:

**„kleine“ KMU-Projekte
entwickeln Schlüsseltechnologie
für zukünftige Aufgaben**



This project is funded by the European Commission

Grant No. 723119



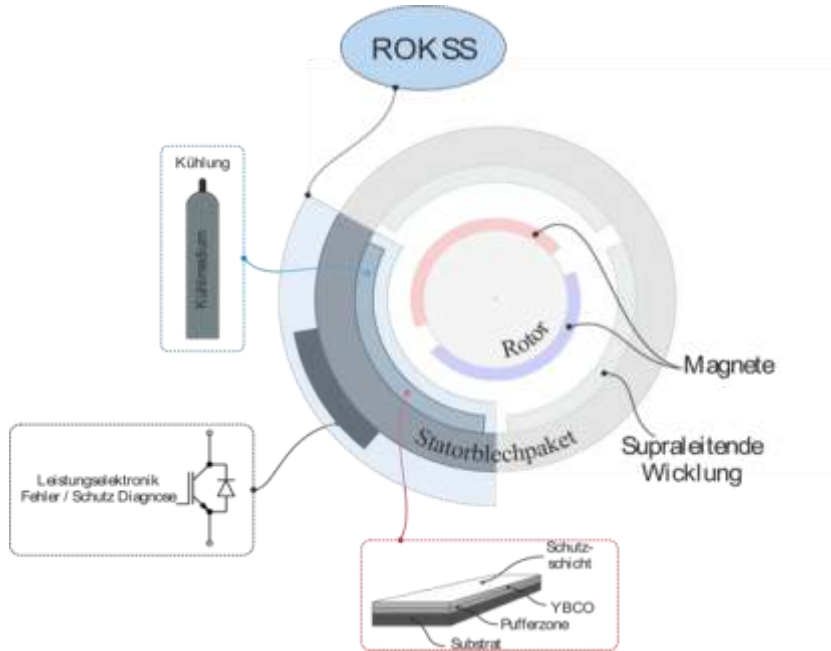
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



**Acknowledgements to our team
Johannes Oswald, Bernhard Oswald, A.T.A.M. deWaele, Eva Berberich,
Christian Schneider, Simon Wolfstädter, Sara Pinho, Felix Zipp
and all colleagues of Oswald Elektromotoren GmbH**

www.oswald.de

Fazit



ROKSS-Projekt: Robuste Kühlung und Sicherheitsdiagnostik für supraleitende Motoren

Förderprogramm: KMU-innovativ des Bundesministerium für Bildung und Forschung

- **Robustes und zuverlässiges Kühlsystem ist für industriellen Einsatz unbedingt notwendig**
- **SL im Rotor weit entwickelt
SL im Stator noch optimierbar**
- **Verluste im Rotor durch Kryostat,
Verluste im Stator durch SL dominiert**
- **Anwendungsfeld der SL ganz unterschiedlich bei Rotor und Stator**
- **Im aktiven Stator ist Sicherheitsdiagnostik unbedingt nötig**