SUPRALEITENDE MAGNETSPULEN FÜR WELTRAUMANWENDUNGEN

D. Pridöhl*, T. Schalm†, D. Fehr*, C. von Byern*, T. Siedenburg*, D. Louis*, M. Wlochal*, K.-U. Schröder† und S. Schael*

* RWTH Aachen University, 1. Physikalisches Institut B, 52074 Aachen, Deutschland
† RWTH Aachen University, Institut für Strukturmechanik und Leichtbau, 52062 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

REBCO-Hochtemperatursupraleiter ermöglichen den verlustfreien Stromtransport bei Temperaturen unterhalb von 80 K. Ihre mechanische Robustheit und hoher technischer Reifegrad eröffnen neue Anwendungsfelder im Weltraum, bei denen starke Magnetfelder benötigt werden. Mögliche Anwendungen erstrecken sich von der Abschirmung bemannter Habitate vor kosmischer Strahlung über elektrische Antriebssysteme bis hin zu Magnetspulen für wissenschaftliche Experimente. Im Rahmen des AMS-100-Projekts wird ein Teilchendetektor entwickelt, der mithilfe von supraleitenden Magnetspulen die kosmische Strahlung in nie dagewesener Präzision vermessen wird. Das Experiment dient als Nachfolger des AMS-02-Magnetspektrometers, das seit 2011 an Bord der Internationalen Raumstation betrieben wird.

Wir berichten von den Herausforderungen bei der Entwicklung solcher supraleitenden Spulen für Weltraumanwendungen. Neben strengen Anforderungen an die Masse und Steifigkeit der Struktur müssen die Spulen zahlreiche Rahmenbedingungen erfüllen, die aus ihrem Betrieb in der Weltraumumgebung resultieren. Wir präsentieren die Ergebnisse experimenteller und numerischer Studien, in denen unter anderem das Thermalmanagement und die Startlasten untersucht werden.

Produkt des interdisziplinären Entwicklungsprozesses ist ein robustes supraleitendes Kabel mit einem Gewicht von $\sim$ 100 g/m, das bei kryogenen Temperaturen ohne Verlustleistung Ströme von mehreren Kiloampere leiten kann. Ein Konzept für die modulare Kabelfertigung ermöglicht das Realisieren von Magnetspulen beliebiger Dimensionen. Der Einsatzbereich der Technologie ist dabei nicht auf den Weltraum beschränkt, sondern richtet sich auch an terrestrische Anwendungen.

Keywords

Hochtemperatur-Supraleiter, Magnetspule, Teilchendetektor, Magnetspektrometer, Satellit, Lagrange-Punkt 2

1. EINLEITUNG

Seit ihrer Entdeckung im Jahre 1911 durch Heike Kamerlingh Onnes haben Supraleiter Einzug in zahlreiche technische Anwendungen gefunden. Die Fähigkeit, Strom ohne elektrischen Widerstand und damit ohne Verlustleistung zu transportieren, wird vor allem zur Erzeugung starker Magnetfelder genutzt. Das supraleitende Verhalten eines Materials tritt dabei immer nur unter einer bestimmten Temperatur auf, der sogenannten kritischen Temperatur T_c.

Seit der ersten Entdeckung vor über 100 Jahren wurden immer wieder Materialien mit höheren kritischen Temperaturen entdeckt. Während frühere Generationen von Supraleitern bei Temperaturen im einstelligen Kelvin-Bereich betrieben werden müssen, sind heutzutage sogenannte Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) kommerziell erhältlich, die bei Temperaturen von bis zu 80 K supraleitende Eigenschaften haben. Dies ermöglicht das Erschließen völlig neuer Anwendungsfelder, in denen der Einsatz von Tieftemperatur-Supraleitern aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist.

Eins dieser Anwendungsfelder mit enormem Potential ist der Einsatz von HTS-Spulen in der Raumfahrt. In diesem Beitrag beschreiben wir die Potentiale und Herausforderungen des Betriebs von HTS-Spulen im Weltraum. Anhand des Beispiels der Magnetspulen für den AMS-100-Satelliten zeigen wir, dass ein interdisziplinärer Entwicklungsansatz nötig ist, um HTS ins All zu transportieren und dort zu betreiben. Durch eine geeignete Umhüllung des Supraleiters kann dieser zu einem Supraleiterkabel verarbeitet werden und somit vor externen Einflüssen geschützt werden. Ein Konzept für die modulare und skalierbare Fertigung des Kabels ermöglicht den Bau von HTS-Spulen fast beliebiger Dimension.

1.1. Anwendungsfelder supraleitender Magnetspulen im All

In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl von Konzepten vorgestellt (und teilweise demonstriert), in denen HTS-Magnetspulen für Anwendungen im All genutzt werden.

CC BY 4.0

doi: 10.25967/680071

1.1.1. Antriebssysteme / Lageregelung

Magnetoplasmadynamische Antriebssysteme nutzen Magnetfelder, um ein Plasma auf hohe Geschwindigkeiten zu beschleunigen. Die Verfügbarkeit von HTS ermöglicht damit, kompakte und effiziente Antriebssysteme für Raumfahrzeuge zu bauen. [1, 2] Ein solches Antriebssystem vom Paihau—Robinson Research Institute, basierend auf REBCO-Spulen, wurde 2025 an Bord der Internationalen Raumstation erfolgreich im Orbit demonstriert [3].
Magnetspulen werden häufig als Magnetorquer für die Lageregelung von Satelliten im Erdorbit eingesetzt. Das Wirkprinzip basiert auf der Ausrichtung des Magnetorquers an den Feldlinien des Erdmagnetfelds. Dabei skaliert die Stärke des resultierenden Drehmoments mit der Stärke des Magnetfelds und lässt sich somit durch den Einsatz von Supraleitern effizient vergrößern. Die neuseeländische Firma Zenno Astronautics verkauft einen Magnetorquer aus HTS-Spulen, dessen Funktionalität 2023 im Orbit demonstriert wurde. [4]

1.1.2. Schutz vor kosmischer Strahlung

Die Abschirmung von kosmischer Strahlung in Raumfahrzeugen ist essenziell für die bemannte Raumfahrt zu weit entfernten Himmelskörpern. Ein viel diskutiertes Konzept ist die aktive Abschirmung mithilfe von Magnetfeldern. Analog zum Magnetfeld der Erde lenkt ein Magnetfeld um das Habitat geladene Teilchen ab und reduziert somit die Strahlenbelastung der Astronauten. In der Literatur existieren Konzepte mit verschiedenen Topologien und Anordnungen von Magnetspulen. Eine Gemeinsamkeit sind die großen Dimensionen der Magnetspulen und die damit einhergehend geforderte Leichtbauweise. [5, 6]

1.1.3. Plasmaschild für Wiedereintrittskörper

Das Ablenken geladener Teilchen in einem Plasma kann genutzt werden, um die Temperaturbelastung auf Wiedereintrittskörpern zu reduzieren. In einem Forschungsprojekt wurde simulativ und experimentell demonstriert, wie HTS-Spulen an der Spitze eines Wiedereintrittskörpers die Temperaturen auf der Oberfläche reduzieren, und somit die Anforderungen an das Hitzeschild reduzieren können. [7]

1.1.4. Teilchenphysik

Magnetspulen werden in vielen Teilchenphysik-Experimenten genutzt, um aus der Krümmung der Bahn der geladenen Teilchen im Magnetfeld Rückschlüsse auf Eigenschaften des Teilchens zu schließen. Solche sogenannten “Magnetspektrometer” sind vor allem zur Unterscheidung von Materie und Antimaterie nötig.
Seit 2011 vermisst das Alpha-Magnetspektrometer AMS-02 als größtes Experiment der Grundlagenforschung auf der Internationalen Raumstation die kosmische Strahlung. Der ursprünglich geplante supraleitende Magnet wurde vor dem Start gegen einen Permamentmagnet ausgetauscht, um die Lebensdauer des Experiments zu verlängern [8]. Für die Nachfolge von AMS-02 nach der Außerbetriebnahme der Raumstation wurden mehrere Konzepte für Magnetspektrometer im All vorgestellt [9–11].
Alle sind als eigenständige Satelliten konzipiert, die jenseits des Magnetfelds der Erde die kosmische Strahlung vermessen. Für die Vermessung hochenergetischer geladener Teilchen muss ein starkes Magnetfeld in einem großen Volumen aufrecht erhalten werden. Die dafür zuständigen Magnetspulen sind aus HTS konzipiert und erzeugen daher das Magnetfeld ohne nennenswerte Verlustleistung bei minimalem Strukturgewicht und maximaler Teilchendurchlässigkeit.
In dieser Arbeit beschreiben wir die Herausforderungen der Entwicklung supraleitender Magnetspulen für den Einsatz im All anhand der Spulen für das AMS-100-Experiment, das für 10 Jahre am Sonne-Erde-Lagrange-Punkt 2 die kosmische Strahlung vermessen wird (s. Abschnitt 2.2). Dafür ist zunächst ein Grundverständnis der Rahmenbedingungen hilfreich, die für den Betrieb von HTS nötig sind.

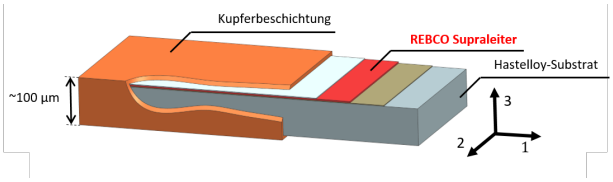


BILD 1. Schematischer Lagenaufbau eines REBCO-Leiterbandes.

2. GRUNDLAGEN

2.1. Hochtemperatur-Supraleiter

Als HTS werden Materialien bezeichnet, die eine kritische Temperatur von > 77 K aufweisen, also bei Normaldruck in flüssigem Stickstoff supraleitendes Verhalten zeigen. Von den verschiedenen Typen von HTS sind sogenannte REBCO-Supraleiter (“Rare-Earth Barium Copper Oxide”) am weitesten verbreitet. Um die fragile Keramik technisch nutzbar zu machen, werden diese Supraleiter zusammen mit dünnen Schichten von anderen Materialien auf ein metallisches Trägermaterial aufgebracht. Ergebnis des Prozesses ist ein sogenanntes “Beschichtetes Leiterband” (engl. “coated conductor”), das heutzutage in Längen von mehreren Hundert Meter kommerziell erhältlich ist. Die Gesamtdicke des Bandes variiert mit dem genauen Schichtaufbau, liegt aber meistens unter 100 µm. BILD 1 zeigt schematisch den Lagenaufbau eines solchen REBCO-Leiterbandes.

2.1.1. Elektro-magneto-thermale Limits

REBCO haben nur unter gewissen Bedingungen supraleitende Eigenschaften. Konkret liegt supraleitendes Verhalten nur vor, wenn Temperatur, Stromdichte und Magnetfeld jeweils unter einem gewissen Grenzwert liegen. Diese Grenzwerte bezeichnet man als kritische

CC BY 4.0

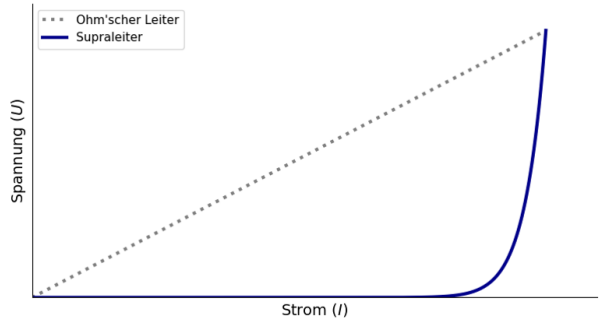


BILD 2. Nicht-lineares Verhältnis zwischen Strom und Spannung in einem Supraleiter (s. Gleichung (1)) im Vergleich zu einem konventionellen Ohm'schen Leiter.

Temperatur T_c, kritische Stromdichte J_c und kritisches Magnetfeld B_c. Die drei Eigenschaften sind voneinander abhängig. So sinkt die kritische Stromdichte zum Beispiel mit steigender der Temperatur und stärker werdendem Magnetfeld. Aufgrund der Anisotropie des REBCO-Kristallgitters ist die Richtung und der Betrag des wirkenden Magnetfelds relevant.
Bei gegebener Temperatur und gegebenem Magnetfeld folgt der Spannungsabfall (elektrisches Feld E ist Spannung geteilt durch Länge) im REBCO einem exponentiellen Verlauf über der Stromstärke:

$$E = 1\frac{\mu V}{cm}\left(\frac{I}{I_c}\right)^n \tag{1}$$

Der sogenannte kritische Strom I_c ist dabei per Konvention definiert als der Strom, bei dem ein elektrisches Feld von 1 μV/cm gemessen wird.
Bei Strömen im Supraleiter unterhalb des kritischen Stroms ist durch den exponentiellen Anstieg mit dem Exponenten n also ein Betrieb ohne messbaren Spannungsabfall, d.h. ohne elektrische Verlustleistung $P = UI$ möglich. BILD 2 zeigt dieses Verhalten schematisch im Vergleich zu einem konventionellen, Ohm'schen Leiter mit linearem Verhalten $U = RI$ zwischen Strom und Spannung.
Wenn der HTS Strom leitet und dabei plötzlich vom supraleitenden zum normalleitenden Zustand übergeht, sorgt die entstehende Verlustleistung für eine schlagartige Erwärmung und damit ein Überschreiten der kritischen Temperatur. Dieser Vorgang wird als "Quench" bezeichnet und kann zum "Durchbrennen" des Supraleiters, also dessen irreversibler Schädigung, führen. In der Auslegung von supraleitenden Spulen ist es daher wichtig, dass die Leiterbänder durch geeignete Umhüllung mit elektrisch und thermisch leitfähigem Material vor dem Durchbrennen geschützt werden.

2.1.2. Mechanische Limits

Für die Auslegung von HTS-Spulen für den Einsatz im Weltall sind deren mechanische Grenzwerte von großer Bedeutung. Aufgrund des Lagenaufbaus und des spröden Materialverhaltens der supraleitenden Keramik-Schicht weisen REBCO-Leiterbänder ein komplexes Versagensverhalten auf. Dies macht die simulative Auslegung von Spulen und Kabeln mit HTS sehr anspruchsvoll. Für Details zu den mechanischen Versagensmodi und weiteren Besonderheiten der strukturellen Auslegung supraleitender Spulen empfehlen wir die Review-Paper von Maeda et al. sowie Zhou et al. [12, 13].
Hier soll nur grundlegend auf die wichtigsten Eigenschaften eingegangen werden. Als Kriterium für die mechanische Auslegung wird stets die irreversible Schädigung der dünnen, supraleitenden REBCO-Schicht herangezogen. Bei Überschreiten von mechanischen Grenzwerten wird das Kristallgitter des Supraleiters geschädigt und dessen kritische Stromdichte J_c reduziert. Daher sind konventionelle Versagensmodelle aus dem Ingenieurswesen für die Auslegung von REBCO-Supraleitern nicht ohne Weiteres anwendbar.
Die Grenzwerte für jeden Versagensmodus müssen jeweils erhoben werden, in dem vor und nach der mechanischen Belastung der kritische Strom gemessen wird. Als Kriterium für das mechanische Versagen des Supraleiters wird dabei meistens das Unterschreiten von 95% des ursprünglichen kritischen Stroms angenommen. Tabelle 1 gibt eine grobe Übersicht von typischen Versagenslasten des Leiterbandes in verschiedenen Belastungsrichtungen. Wie man sieht, sind die REBCO-Leiterbänder robust gegenüber Zug- und Druckspannungen in Längsrichtung. Kritisch sind vor allem Zuglasten in Dickenrichtung, weil dabei die REBCO-Schicht die Kraft überträgt und damit leicht eine Delamination des Leiterbandes eintritt. Ähnliches gilt für Schubbelastungen in 23-Richtung.

TAB 1. Grobe mechanische Grenzwerte von REBCO-Leiterbändern (Koordinatensystem siehe BILD 1). Sofern verfügbar, wird der Wert für die reversible I_c-Degradation von 95% angegeben [14]:

Spannungskomponente	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
Längsrichtung (σ_{11})	<-700	700
Querrichtung (σ_{22})	-200	n.a.
Dickenrichtung (σ_{33})	-500	<20
Schub (σ_{23})	-5	5

2.2. Das AMS-100-Experiment

Das AMS-100-Experiment ist ein Magnetspektrometer, das über 10 Jahre die kosmische Strahlung am Sonne-Erde-Lagrange-Punkt 2 vermessen wird. AMS-100 wird auf einem eigens dafür vorgesehenen Satelliten am Sonne-Erde-Lagrange-Punkt 2 installiert und wird eine um drei Größenordnungen höhere Empfindlichkeit aufweisen als sein Vorgänger AMS-02. Ermöglicht wird dies durch den Einsatz von zwei Magnetspulen, die ein Magnetfeld erzeugen, um das Ladungsvorzeichen und die Rigidität der das Instrument durchquerenden Teilchen der kosmischen Strahlung zu messen. [9]

CC BY 4.0

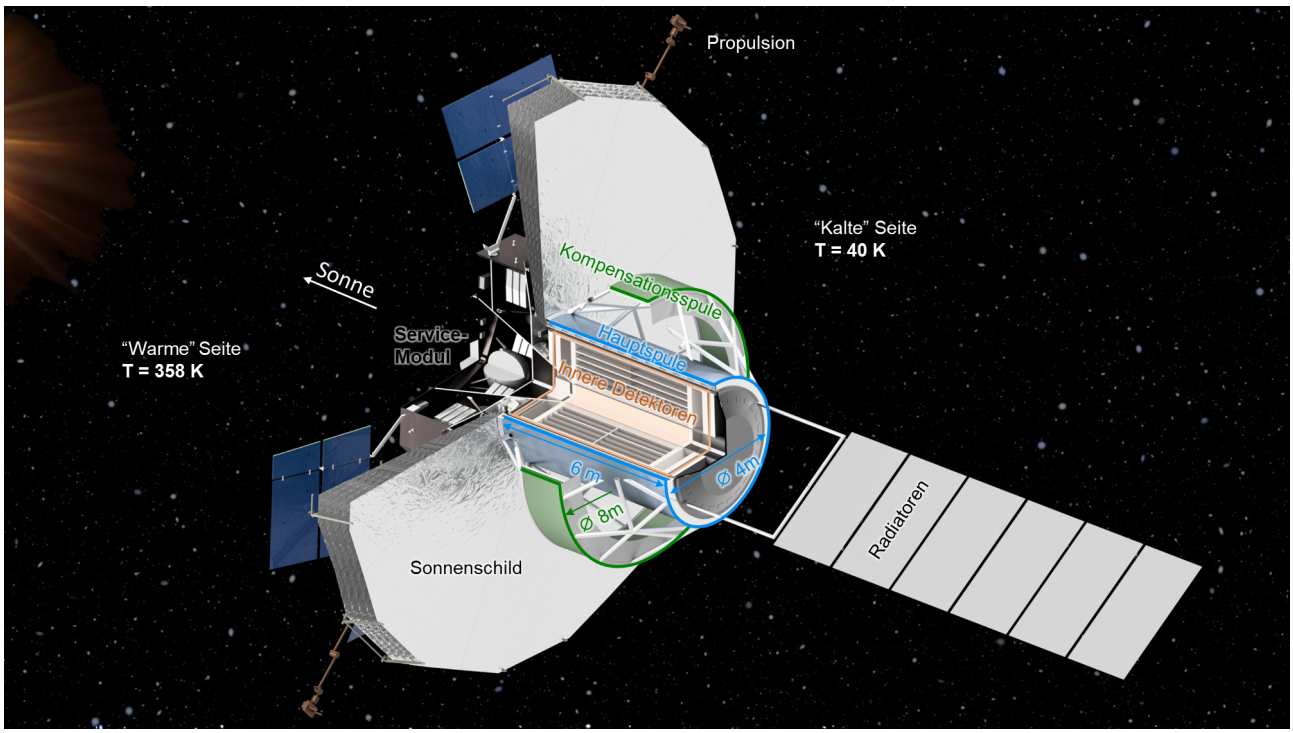


BILD 3. Schnittansicht des AMS-100-Satelliten am Sonne-Erde Lagrange-Punkt 2 mit Benennung der wichtigsten Komponenten.

2.2.1. Der Satellit

BILD 3 zeigt eine schematische Darstellung des AMS-100-Satelliten. Der Satellit wird stets mit dem Sonnenschild in Richtung Sonne/Erde ausgerichtet, um in der dahinterliegenden Nutzlast durch passive Kühlung kryogene Temperaturen für den Betrieb der supraleitenden Magnetspulen zu erreichen.
Das Servicemodul vor dem Sonnenschild enthält die für den Satellitenbetrieb erforderlichen Lageregelungs-, Spannungsversorgungs-, Datenverarbeitungs- und Kommunikationssysteme. Die thermale und strukturelle Auslegung des Satelliten wird im Wesentlichen durch die Anforderungen der Nutzlast bestimmt. Für weitere Details wird hier auf vorherige Konferenzbeiträge verwiesen [14–16].
Ein grobes Massenbudget für den beschriebenen Entwurf ist in Tab. 2 aufgeführt. Etwa 60% der Satellitenmasse entfallen auf den Teilchendetektor als Nutzlast. Die beiden supraleitenden Spulen sind inkl. ihrer Befestigungsstrukturen vergleichsweise leicht und machen etwa ein Achtel der Gesamtmasse aus. Die Gesamtmasse von 40 t erfordert eine Trägerrakete der nächsten Generation wie das *SpaceX Starship*, das in der Lage sein wird, Satelliten mit einer Masse von bis zu 100 t über den LEO hinaus zu befördern. Die Gesamtabmessungen des Satelliten sind auf die Kompatibilität mit der Nutzlastbucht des *Starship* ausgelegt. BILD 4 zeigt den Satelliten in Startkonfiguration mit eingefalteten Komponenten in der Nutzlastbucht der Trägerrakete.

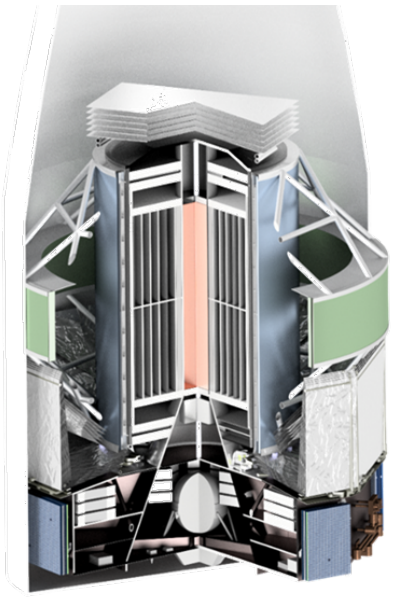


BILD 4. Schnittansicht des AMS-100-Satelliten in Startkonfiguration in der Nutzlastbucht des *SpaceX Starship*.

CC BY 4.0

TAB 2. Massenbudget des AMS-100-Satelliten mit Aufteilung auf die Subsysteme:

Subsystem	Mass [t]
Thermalsystem	3.8
Primärstruktur	1.3
Service-Modul	10.3
Hauptspule	2.6
Kompensationsspule	2.7
Teilchendetektoren	19.5
Gesamtmasse	40.1

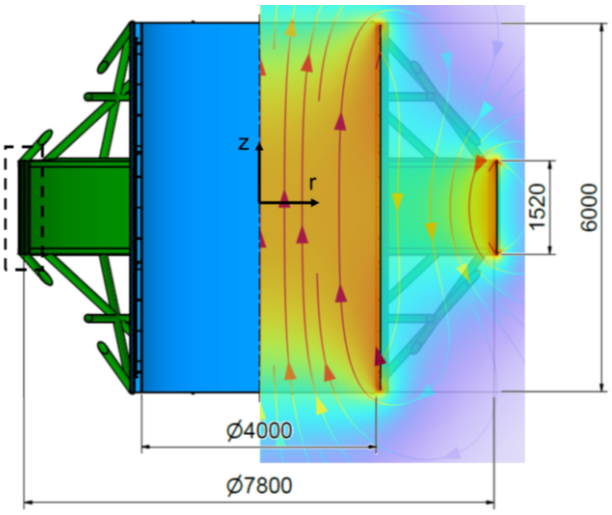


BILD 5. Schnittansicht durch das supraleitende Magnetsystem des AMS-100-Experiments. Die Hauptspule (blau) und die Kompensationsspule (grün) erzeugen gemeinsam ein inneres Magnetfeld von 0.5 T ohne externes Dipolmoment.

2.2.2. Das Magnetsystem

Das supraleitende Magnetsystem ist eine Schlüsselkomponente der Teilchendetektornutzlast und ist in BILD 5 und TAB 3 näher beschrieben. Das System ist so ausgelegt, dass es ein homogenes Magnetfeld von B = 0,5 T über ein inneres Detektorvolumen von $\sim$ 75 m^3 erzeugt. Die Hauptspule (blau) weist einen Durchmesser von 4 m und eine Länge von 6 m auf.
Aufgrund von Wechselwirkungen des Dipolmoments der Hauptspule mit dem Magnetfeld der Sonne müsste die Lageregelung des Satelliten große magnetische Drehmomente kompensieren. Daher ist eine zweite, konzentrische Spule vorgesehen, in der der Strom in entgegengesetzter Richtung fließt. Diese sogenannte Kompensationsspule (grün) hebt das magnetische Dipolmoment der Hauptspule auf, sodass das Gesamtdipolmoment null beträgt. Die Kompensationsspule besitzt einen Außendurchmesser von 7,8 m sowie eine Länge von 1,5 m. Sie ist mit einer Aluminium-Fachwerkstruktur verbunden, die an den Aluminium-Endflanschen der Hauptspule befestigt ist.

TAB 3. Parameter der supraleitenden Spulen des AMS-100 Teilchendetektors

	Hauptspule	Kompensationsspule
Durchmesser	4 m	7,8 m
Länge	5,8 m	1,5 m
Gewicht	1,7 t	0,9 t
Betriebsstrom	4,5 kA	4,5 kA
Magnetfeld	0,64 T	-0,14 T
Gesp. Energie	13,6 MJ	5,5 MJ
Kabellänge	10 km	5 km

3. INTERDISZIPLINÄRE ANFORDERUNGEN AN DIE AUSLEGUNG VON HTS-SPULEN FÜR RAUMFAHRTANWENDUNGEN

In Abschnitt 2.1 wurden die Randbedingungen beschrieben, die generell bei der Auslegung von Spulen aus REBCO-HTS berücksichtigt werden müssen. Die Anwendung der Spulen im All bringt weitere komplexe Anforderungen mit sich, denen HTS-Spulen für terrestrische Anwendungen nicht gerecht werden müssen. Dieser Abschnitt beschreibt anhand des Beispiels der AMS-100-Spulen, welchen vielseitigen Herausforderungen ein Entwurf für HTS-Spulen gerecht werden muss, um diese im All zu betreiben. Konkretes Ziel der Auslegung ist ein System, das den Transport der Supraleiter-Spulen an den Lagrange-Punkt 2 und deren Betrieb dort über 10 Jahre ermöglicht. Aus jeder Domäne werden hierbei Anforderungen abgeleitet, zu denen dann im folgenden Kapitel der resultierende Spulenentwurf gezeigt wird.

Anforderungen der Teilchenphysik

Die supraleitenden Spulen dienen im Teilchendetektor für die Ablenkung der geladenen Teilchen. Daraus leiten sich grundlegende Anforderungen an das Magnetsystem ab:

1) *Stärke des Magnetfelds* Die Stärke des Magnetfelds bestimmt die Ablenkung der geladenen Teilchen und legt somit fest, bis zu welcher Energie die Krümmung der Bahn eines geladenen Teilchens noch aufgelöst werden kann.
2) *Abmaße des Magnetfelds* Der räumliche Umfang des Magnetfelds, also die Länge des Bereichs, in dem das Magnetfeld wirkt, hat ebenfalls Auswirkungen auf die Auflösung bei hochenergetischen Teilchen. Bei der Bauweise von AMS-100 steigt mit dem Radius der Magnetspule die Energie, bis zu der die Krümmung eines Teilchendurchgangs aufgelöst werden kann.
3) *Teilchendurchlässigkeit* Es ist für die Vermessung der geladenen Teilchen im Innern der Spulen vorteilhaft, wenn diese möglichst wenig mit dem Material der Spule interagieren. Das bedeutet, dass in den Spulen möglichst wenig Material mit hoher Dichte verbaut sein sollte. Typischerweise wird daher in Magnetspulen für Teilchendetektoren Aluminium als Strukturmaterial verwendet.

CC BY 4.0

3.1. Elektrische Anforderungen

Der Supraleiter muss stets mit einem ausreichenden Sicherheitsfaktor unterhalb des kritischen Stroms betrieben werden, den er bei der gegebenen Temperatur und dem herrschenden Magnetfeld hat. Da das Magnetfeld auf dem Leiter in einer Magnetspule jeweils vom Strom abhängt, muss dieser Betriebspunkt in einer nichtlinearen iterativen Simulation ermittelt werden.
In den Randbereichen einer Zylinderspule hat das Magnetfeld auf dem Leiter die höchste radiale Komponente hat und reduziert somit den kritischen Strom dort am stärksten. Daher werden in diesen Randbereichen oft mehr Leiterbänder vorgesehen als in der Mitte der Spule, um die reduzierte kritische Stromdichte zu kompensieren.
Der Betrieb der supraleitenden Spulen mit passiver Kühlung im Vakuum des Weltraums bedeutet, dass kein kryogenes Kühlmittel (z.B. flüssiger Stickstoff) mit hoher Kühlleistung für die Kühlung der Spule zur Verfügung steht. Um in dieser Umgebung das “Durchbrennen” des Supraleiters zu vermeiden, ist eine Umhüllung der Supraleiterbänder nötig, die im Falle eines Quenchs (s. Abschnitt 2.1.1) einen leitfähigen Alternativpfad für den Strom bietet. Als Material für diese Umhüllung bietet sich aufgrund seiner geringen Dichte und der guten Leitfähigkeit Aluminium an. Diese Umhüllung wird auch als “Stabilisator” bezeichnet und muss gut elektrisch leitend an die HTS-Leiterbänder angebunden werden.
Um im Falle eines Quenchs in der Spule das Durchbrennen des umhüllten Supraleiters zu verhindern, müssen in der elektrischen Auslegung zusätzlich leitfähige Verbindungen zwischen den Windungen geschaffen werden. Dieses sogenannte Konzept einer “nicht-isolierten” Spule ist für REBCO-Spulen üblich, wirkt sich jedoch auf das Auf- und Entladeverhalten der Spule aus.

3.2. Thermale Anforderungen

Die thermale Auslegung des Magnetsystems legt den Arbeitspunkt fest, an dem der Supraleiter betrieben werden kann. Da der kritische Strom mit sinkender Temperatur steigt, bestimmt die Temperatur der Spule bei gegebenem Strom den Sicherheitsfaktor zum kritischen Strom.
Für die Ermittlung der Spulentemperatur muss der Gesamtsatellit mit alle externen und internen Wärmequellen modelliert werden. Dies betrifft sowohl Wärmestrahlung von außen, als auch eine Abschätzung der Verlustleistung aller im Satelliten arbeitenden elektrischen Geräte. Für die Verlustleistung in den HTS-Spulen wird im Betrieb eine Leistung von 5 W angenommen. Im Supraleiter selber entsteht zwar keine Wärme, aber in gelöteten Verbindungen zwischen den Leiterbändern, die einen Widerstand im $n\Omega$-Bereich haben. [15]
Die supraleitenden Spulen müssen für den Betrieb bei kryogenen Temperaturen möglichst gut thermisch von den “warmen” Bereichen des Systems entkoppelt werden. Dies steht im Widerspruch zu den mechanischen Lasten beim Start, die eine gewisse Steifigkeit der Spulenhalterung fordern.

3.3. Mechanische Anforderungen

Die mechanische Auslegung muss in verschiedenen Phasen sicherstellen, dass der Supraleiter nicht irreversibel geschädigt wird. Konkret betrifft das die Lasten während der Fertigung der Spulen, die Lasten beim Raumtransport, sowie thermomechanische Lasten und Lorentz-Kräfte, die beim Betrieb der Spulen wirken. Für alle diese Lastfälle müssen die Spannungen in den Leiterbändern unter den in TAB 1 aufgelisteten Grenzwerten bleiben.

3.3.1. Lasten in der Fertigung

Die aus der elektrischen Auslegung geforderte Umhüllung des Supraleiters muss leitfähig mit den REBCO-Leiterbändern verbunden werden. Dies erfordert einen Fertigungsprozess, dessen Produkt ein aus den REBCO-Leiterbändern und dem Stabilisator bestehendes “Supraleiter-Kabel” ist. Während aller Prozessschritte in dieser Fertigung muss sichergestellt werden, dass der Supraleiter nicht irreversibel geschädigt wird. Vor allem für fügende Verfahren wie Löten und Schweißen resultieren aus der Erwärmung und Abkühlung der verschiedenen Materialien (Aluminium und HTS-Band) Thermalspannungen. In der Fertigung muss außerdem sichergestellt werden, dass der Supraleiter nicht über 200 °C erwärmt wird, weil dieser dann irreversibel degradiert.
Wenn aus dem Supraleiter-Kabel eine Spule gewickelt wird, muss sichergestellt sein, dass dieser Wickelprozess nicht die mechanischen Limits der REBCO-Leiterbänder überschreitet. Die Spannungen aus dem Biegen des Supraleiter-Kabels überlagern sich dabei mit den Thermalspannungen aus dem Fügeprozess.

3.3.2. Startlasten

Der Transport des Satelliten an den Lagrange-Punkt 2 stellt den zweiten wichtigen Lastfall in der Auslegung der Magnetspulen dar. Die dynamischen sowie quasi-statischen Beschleunigungen, die auf den Satelliten als Nutzlast der *Starship*-Rakete wirken, dürfen dabei nicht den Supraleiter schädigen. Weiterhin müssen die Steifigkeit und Masse der Spulen mit den Anforderungen an die Eigenfrequenzen der Nutzlast kompatibel sein. Vor allem die Aufhängung der Kompensationsspule ist hierbei herausfordernd, da diese einen möglichst großen Abstand von der Hauptspule haben soll und somit eine lange Haltestruktur benötigt. [16]
Der Strukturentwurf der HTS-Spulen muss verhindern, dass die Mikrometer-dicken REBCO-Schichten während des Starts beschädigt werden. Die dynamischen Lasten können aber nur auf globaler Ebene unter Einbezug des gesamten Satelliten auf der Skala mehrerer Meter berechnet werden. Die Abbildung beider Domänen in einem Strukturmodell wäre enorm rechenaufwändig und erfordert somit die Anwendung von Multiskalen-Ansätzen zur Berechnung der Spannungen im Supraleiter. [14] Die Ausbildung der Spulen als dünnwandige Zylinderschalen erfordert die zusätzliche Versteifung, um Schalenbeulen beim Start zu verhindern.

CC BY 4.0

Eine weitere Belastung der Spulen beim Start der Trägerrakete sind die Schocklasten bei der Stufentrennung. Die Umhüllung der Leiterbänder muss sicherstellen, dass die fragilen REBCO-Schichten in den supraleitenden Spulen nicht durch die hohen resultierenden Beschleunigungen irreversibel geschädigt werden.

3.3.3. Thermo-mechanische Lasten

Das Abkühlen der HTS-Spulen von Raumtemperatur auf die Betriebstemperatur von unter 60 K stellt hohe Anforderungen an die Strukturauslegung. Wenn Materialien mit verschiedenen Wärmeausdehungskoeffizienten (CTE) verbaut werden, entstehen durch die Abkühlung um 200 K enorme Thermalspannungen. Dies betrifft vor allem die Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialien, also Fügestellen, die zum Beispiel gelötet oder geklebt sind.
Die Haltestruktur der HTS-Spulen muss deren starke Schrumpfung ausgleichen können. So schrumpft die Hauptspule beim Abkühlen um mehr als 10 mm in der Länge. Da die Primärstruktur des Satelliten aus CFK mit einem geringen CTE vorgesehen ist, muss die Haltestruktur der Spulen große relative Verschiebungen zulassen.

3.3.4. Betriebslasten

Beim Einschalten der Spulen entstehen zusätzlich mechanische Lasten durch die Interaktion des Stroms im Supraleiter mit dem Magnetfeld der Spule. Diese sogenannten Lorentz-Kräfte in Zylinderspulen sorgen dafür, dass die Spule radial unter Innendruck steht und axial gestaucht wird. In HTS-Spulen mit starkem Magnetfeld sind diese Lorentz-Kräfte relevant für die mechanische Auslegung, da sie die Lasten der anderen Lastfälle um ein Vielfaches übertreffen können. Für die Berechnung der Lorentz-Kräfte wurde vom Autor ein Berechnungsansatz entwickelt, der die nicht-lineare Kopplung zwischen Verformung und Magnetfeld in dünnwandigen Zylinderspulen abbildet [17].
Weitere Kräfte im Betrieb des Magnetsystems können aus der Interaktion der Magnetfelder von Haupt- und Kompensationsspule entstehen. Wenn beide Spulen nicht präzise zueinander ausgerichtet sind, entstehen enorme Kräfte, die zu einer axialen Abstoßung und Verdrehung der Spulen zueinander führen. Die Haltestruktur der Kompensationsspule muss dementsprechend dimensioniert werden.

3.4. Anforderungen der Weltraumumgebung

Der Betrieb im Weltraum bringt Besonderheiten mit sich, für die HTS-Spulen für terrestrische Anwendungen nicht ausgelegt werden müssen. Durch ihre exponierte Lage außen am Satelliten sind die HTS-Spulen dem Risiko des Einschlags von Mikrometeoroiden ausgesetzt. Aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeit zwischen Mikrometeoroid und dem Satellit können schon kleinste Partikel eine dauerhafte Schädigung des Supraleiters hervorrufen. Um dieses Risiko über die Missionsdauer zu minimieren, muss der integrierte Schutz vor Mikrometeoroiden schon bei der Strukturauslegung berücksichtigt werden. Eine dedizierte Prallplatte ist aus Leichtbausicht und zur Gewährleistung einer hinreichend hohen Teilchendurchlässigkeit nicht zielführend. Da für die Struktur der AMS-100-Spulen keine passenden ballistischen Limitgleichungen existieren und partikelbasierte numerische Simulationen weiterhin mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind, muss die Validierung des integrierten Mikrometeoroidenschutzes experimentell erfolgen. [18]
Eine weitere Besonderheit der Weltraumumgebung ist das Vakuum, dem die Supraleiterspulen ausgesetzt sind. Untersuchungen mit REBCO-Leiterbändern haben gezeigt, dass in einer Vakuum-Umgebung Sauerstoff aus dem REBCO-Kristallgitter herausdiffundiert und diese somit ihre supraleitenden Eigenschaften verlieren. Der HTS-Leiterbänder müssen also “vakuumdicht” umhüllt werden, um den schleichenden Verlust der Supraleitfähigkeit zu verhindern.

Die Auflistung von Anforderungen zeigt, wie die Auslegung von HTS-Spulen für Weltraumanwendungen nur in einem iterativen Prozess unter Nutzung von Simulationsmodellen der verschiedenen Domänen erfolgen kann. Die Komplexität der Auslegung erhöht sich weiter dadurch, dass die Anforderungen aus den verschiedenen Domänen stark untereinander gekoppelt sind. So hat zum Beispiel die Temperatur der Spule eine große Auswirkung auf den Betriebspunkt des Supraleiters in der elektrische Auslegung, sowie auf die mechanischen Lasten, die durch die Abkühlung der Spule entstehen. Dies erhöht die Komplexität des Auslegungsprozesses, da in dem sowieso schon komplexen Parameterraum zusätzlich Abhängigkeiten zwischen den Parametern bestehen.

4. TECHNISCHE LÖSUNGEN

In diesem Abschnitt werden die aus dem Auslegungsprozess resultierenden Entwürfe für die HTS-Spulen und das HTS-Kabel präsentiert. Anschließend wird gezeigt, wie diese durch die stringente Verfolgung von Auslegungsprinzipien und der gleichzeitigen Ausnutzung vorhandener technischer Lösungen entwickelt wurden. Während des Entwicklungsprozesses wurde nicht nur die technische Machbarkeit beachtet, sondern auch die Skalierbarkeit der beteiligten Fertigungsverfahren. Dies ist nötig, da für die Spulen mehrere Kilometer des HTS-Kabels benötigt werden.

4.1. Das AMS-100-HTS-Kabel

Der Querschnitt des AMS-100-HTS-Kabels ist in BILD 6 dargestellt. Die aus der elektrischen Auslegung geforderte Anzahl von REBCO-Leiterbändern wird als Stapel mit der Umhüllung verlötet, welche aus zwei stranggepressten Aluminium-Profilen besteht: einem U-Profil und einem rechteckigen Deckel. Beide Profile haben die gleiche Dicke und gewährleisten so eine gleichmäßige Materialstärke des Aluminiums um den Supraleiter. Die Verlötung sorgt für eine gut elektrisch und thermisch leit-

CC BY 4.0

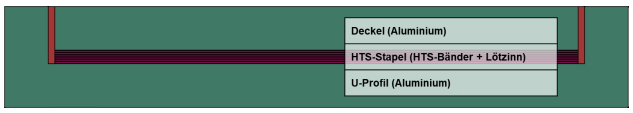


BILD 6. Querschnitt des AMS-100 Supraleiter-Kabels. Die Umhüllung des Supraleiters aus Aluminium (grün) besteht aus einem U-Profil und einem Deckel, in die ein Stapel aus HTS-Lagen eingelötet wird.

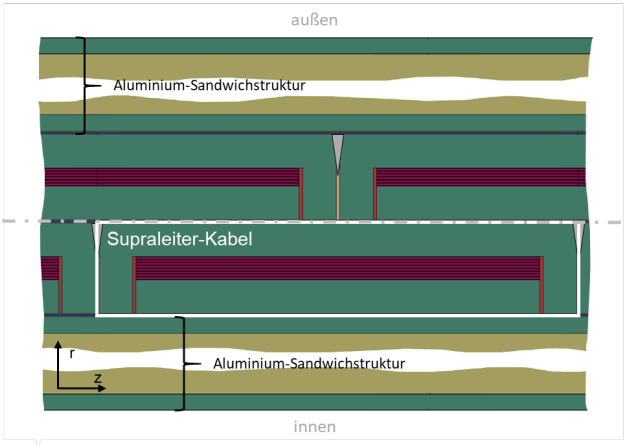


BILD 7. Lagenaufbau der AMS-100 Supraleiter-Spulen. Zwei Lagen des Supraleiterkabels werden auf einen zylindrischen Kern aus symmetrischer Aluminium-Sandwichstruktur gewickelt.

fähige Anbindung der HTS-Bänder an das Aluminium, das den Supraleiter zusätzlich vor externen Einflüssen schützt und mechanische Lasten aufnimmt.

4.2. Der AMS-100-Spulenentwurf

Beide Spulen des AMS-100-Detektors haben den gleichen, in BILD 7 dargestellten, Lagenaufbau. Die Spulen werden aus je zwei Lagen des HTS-Kabels gewickelt. Das Kabel wird dabei mit dem Deckel nach innen zeigend gewickelt, damit die im Betrieb auf die Leiterbänder wirkenden radialen Lorentzkräfte (s. Abschnitt 3.3.4) die Bänder in das U-Profil hineindrücken.
Der zylindrische Kern, auf den gewickelt wird, ist eine Sandwichstruktur aus Aluminium-Decklagen mit einem Aluminium-Honigwabenkern. Nach dem Wickeln und Verkleben der beiden Lagen HTS-Kabel wird außen die gleiche Aluminium Sandwichstruktur aufgebracht. Dies sorgt dafür, dass die HTS-Kabel symmetrisch von der Spulenstruktur umgeben sind. Dies ist vorteilhaft, weil der Supraleiter damit im Falle von Biegelasten auf der Spule (z.B. beim Start der Trägerrakete) nahe der neutralen Faser liegt und somit weniger Biegedehnungen erfährt.
Die Dicke und Dichte des Aluminium-Wabenkerns wird für beide Spulen nach der geforderten Biegesteifigkeit gewählt. Auf der Abbildung nicht dargestellt sind orthotrope Versteifungen (Rippen und Spanten), die auf der Außenseite der Spulen zur Vermeidung globaler Instabilitäten angebracht sind. Die Wahl von Aluminium als Strukturmaterial hilft, die Thermalspannungen beim Abkühlen zu reduzieren.

4.3. Auslegungsprinzipien

Die Komplexität der interdisziplinären Auslegung von HTS-Spulen für den Weltraum macht die Entwicklungsprozesse sehr aufwändig und teuer. Die Anwendung allgemeiner Auslegungsprinzipien ermöglicht es, den Parameterraum zu verkleinern. Bei der Auslegung des HTS-Kabels und der Spulen etablierten sich die folgenden Auslegungsprinzipien:

1) *Symmetrie* Der Supraleiter sollte möglichst symmetrisch mit anderen Materialien umhüllt werden. Dies reduziert Längsdehnungen beim Biegen und verhindert Verbiegung der Struktur beim Abkühlen. Sowohl die Anordnung der HTS-Bänder im Kabel als auch die Anordnung der Kabel in der Spule erfolgt nach diesem Prinzip.
2) *Materialien* Die Anzahl der verwendeten Materialien sollte auf ein Minimum reduziert werden, um Thermalspannungen und -verformungen zu minimieren. Alumininium bietet sich hier an, weil es mit guter Leitfähigkeit für die Umhüllung des Supraleiters, als auch als Strukturmaterial für die Spule genutzt werden kann.
3) *Leichtbau* Die Verwendung etablierter Strukturentwürfe aus dem Leichtbau reduziert die Komplexität in der Auslegung und sichert die Fertigbarkeit der Strukturen. Die supraleitenden Spulen werden als orthotrop versteifte Zylinderschale mit einem Lagenaufbau aus Sandwichstruktur ausgestaltet; beides sind übliche Strukturentwürfe in der Raumfahrt.

4.4. Skalierbarkeit der Fertigungstechnik

Für die beiden Spulen von AMS-100 werden je 10 km und 5 km des Supraleiter-Kabels benötigt. Bei der Auslegung des Fertigungsprozesses für das HTS-Kabel muss daher auf die Skalierbarkeit der beteiligten Fertigungsverfahren geachtet werden. Die Aluminium-Profile für die Umhüllung des Supraleiters werden durch Strangpressen hergestellt. Die anschließende Beschichtung kann durch Bandgalvanik in beliebiger Länge durchgeführt werden. Die REBCO-Leiterbänder sowie das Lötzinn sind als Rollenware mit mehreren Hundert Meter Länge verfügbar.
Die Fertigung von Kilometern des HTS-Kabels stellt enorme Herausforderungen an die Qualitätskontrolle. Eine Fehlstelle im Kabel reicht aus, um die daraus gewickelte Spule unbrauchbar zu machen. Das vorgesehene Fertigungsverfahren basiert daher auf einem modularen Ansatz, in dem Kabelstücke in einer Länge gefertigt werden, die eine Qualitätskontrolle durch Messung des kritischen Stroms ermöglicht. Nachdem die Kabelstücke mit einer geeigneten Verbindungstechnik zu einem langen Kabel verbunden wurden, kann die Fügestelle einzeln auf ihre Funktionsweise getestet werden. Diese abschnittsweise Qualitätskontrolle hilft, die strengen Anforderungen der Raumfahrt an die Qualitätssicherung zu erfüllen und das Risiko von teurem Ausschuss zu reduzieren.

CC BY 4.0

5. EXPERIMENTELLE VALIDIERUNG

Der hier vorgestellte Entwurf für das HTS-Kabel und die Spulen wurde nicht nur simulativ ausgelegt, sondern auch durch das Testen zahlreicher Proben experimentell validiert. Die experimentellen Ergebnisse werden an anderer Stelle veröffentlicht, hier soll nur ein kurzer Überblick über die wichtigsten Ergebnisse gegeben werden:

- Die Spannungs-Strom-Kurven der gefertigten Kabel-Prototypen (vgl. BILD 2) entsprechen reproduzierbar dem erwarteten Verlauf.
- Der minimale Biegeradius des Kabels ist von der Anzahl der verbauten HTS-Lagen abhängig. Für ein dreilagiges Kabel wurde gezeigt, dass das Biegen auf einen Radius von 40 mm nicht die supraleitenden Eigenschaften beeinträchtigt.
- Ein HTS-Kabel, das einer pyrotechnischen Schockbelastung ausgesetzt war, die bei der Stufentrennung im *SpaceX Starship* auftritt, zeigte keine Veränderung der supraleitenden Eigenschaften.
- Bei einem Höchstgeschwindigkeits-Beschussversuch wurde der integrierte Mikrometeoroidenschutz des Lagenaufbaus untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verbesserung der Schutzwirkung nötig ist, um den Supraleiter vor Beschädigungen durch Mikrometeoroiden-Aufprall zu schützen.

6. FAZIT

Die Vielzahl von untereinander gekoppelten Anforderungen macht die Auslegung von supraleitenden Magnetspulen zu einem komplexen, iterativen Prozess. Für supraleitende Spulen für Anwendungen im Weltraum erhöht sich die Komplexität durch die zusätzlichen Anforderungen, die der Transport und Betrieb im All mit sich bringen.

In diesem Beitrag zeigen wir, wie dieser Komplexität durch die Einhaltung von Auslegungsprinzipien und durch die Nutzung etablierter Strukturentwürfe begegnet werden kann. Für den resultierende Entwurf für das Supraleiterkabel und die daraus gewickelten Spulen wurde simulativ die Erfüllung aller Anforderungen in den verschiedenen Phasen der AMS-100-Mission gezeigt.

Die experimentelle Untersuchung von Kabelprototypen demonstriert die Zuverlässigkeit des zugrundeliegenden Fertigungsprozesses. Das Kabel ist robust gegenüber Krafteinwirkungen von außen und kann mit konventionellen Verfahren zu Spulen mit Durchmessern von 10 cm gewickelt werden. Die zuverlässige Probenfertigung erlaubt die Skalierung der Kabelfertigung zu größeren Längen, die dann den Bau größerer Demonstratorspulen erlauben.

Die Entwicklung des AMS-100-HTS-Kabel ist ein Beispiel dafür, wie durch kontinuierlichen Entwicklungsaufwand aus einer Frage der Machbarkeit eine Frage der Skalierbarkeit wird. Es wurden existierende technische Lösungen für alle Aspekte der Auslegung und Fertigung gefunden, was die weitere Entwicklung zunehmend zu einer Ingenieursaufgabe macht. Das AMS-100-Supraleiterkabel zeigt, wie aus Anforderungen der Grundlagenforschung ein Produkt entstehen kann, das Anwendungen weit jenseits der ursprünglichen Einsatzgebiete hat. So ist die entwickelte Technologie nicht nur geeignet für Anwendungen im Weltraum, sondern auch sehr vielversprechend für terrestrische Anwendungen, in denen großskalige supraleitende Magnetspulen benötigt werden.

FÖRDERHINWEIS

Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Agentur für Raumfahrt im DLR (Förderkennzeichen 50OO1803) gefördert.

Kontaktadresse:

dominik.pridoehl@sla.rwth-aachen.de

Literatur

[1] Elias Bögel, Marcus Collier-Wright, Kapish Aggarwal, and Manuel La Rosa Betancourt. State of the art review in superconductor-based applied-field magnetoplasmadynamic thruster technology. In *37th International Electric Propulsion Conference*, number 476. Massachusetts Institute of Technology Cambridge Cambridge, MA, USA, 2022.

[2] Matthew Han and Hannah Rana. Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thrusters for Deep Space Exploration. 10 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2410.17478.

[3] Jamal Olatunji, Nicholas Strickland, Max Goddard-Winchester et al. Hēki: A superconducting magnet for space propulsion on the International Space Station–Pathfinder design and experimental thermal testing. *Superconductivity*, 12:100133, 2024. DOI: 10.1016/j.supcon.2024.100133.

[4] Dallas Kasaboski. A Superconducting Paradigm for the Satellite Industry. Whitepaper, Analysys Mason & Zenno Astronautics, June 2023.

[5] J. Christopher Sussingham, Seth A. Watkins, and F. Hadley Cocks. Forty Years of Development of Active Systems for Radiation Protection of Spacecraft. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 47(3-4):165–175, 1999. DOI: 10.1007/BF03546197.

[6] J. Slough. Spacecraft Scale Magnetospheric Protection from Galactic Cosmic Radiation. In *51st International Conference on Environmental Systems*, 2022.

[7] Andrea Lani, Vatsalya Sharma, Vincent F. Giangaspero et al. A Magnetohydrodynamic enhanced entry system for space transportation: MEESST. *Journal of Space Safety Engineering*, 10(1):27–34, 2023. DOI: 10.1016/j.jsse.2022.11.004.

[8] M. Aguilar, L. Ali Cavasonza, G. Ambrosi et al. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II —Results from

CC BY 4.0

the first seven years. *Physics Reports*, 894:1–116, 2021. DOI: 10.1016/j.physrep.2020.09.003.

[9] S. Schael, A. Atanasyan, J. Berdugo et al. AMS-100: The Next Generation Magnetic Spectrometer in Space - An International Science Platform for Physics and Astrophysics at Lagrange Point 2. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, 944, 2019. DOI: 10.1016/j.nima.2019.162561.

[10] Magnus Dam, William Jerome Burger, Rita Carpentiero et al. Design and modeling of AMaSED-2: A high temperature superconducting demonstrator coil for the space spectrometer ARCOS. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 32(4):1–5, 2022. DOI: 10.1109/TASC.2022.3146221.

[11] Roberto Battiston, B Bertucci, O Adriani et al. High precision particle astrophysics as a new window on the universe with an Antimatter Large Acceptance Detector In Orbit (ALADInO). *Experimental Astronomy*, 51(3):1299–1330, 2021. DOI: 10.1007/s10686-021-09708-w.

[12] Hideaki Maeda and Yoshinori Yanagisawa. Recent Developments in High-Temperature Superconducting Magnet Technology (Review). *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24(3):1–12, 2014. DOI: 10.1109/TASC.2013.2287707.

[13] You-He Zhou, Dongkeun Park, and Yukikazu Iwasa. Review of progress and challenges of key mechanical issues in high-field superconducting magnets. *National Science Review*, 10(3):nwad001, 2023. DOI: 10.1093/nsr/nwad001.

[14] D. Pridöhl, S. Werner, M. Czupalla et al. Engineering Challenges in Structural Design and Analysis of Lightweight Superconducting Magnets for Space Applications. *Proceedings of the 75th International Astronautical Congress (IAC), Milan (Italy)*, pages 1–13, 2024. DOI: 10.52202/078369-0138.

[15] David-Sharif Kohlberger, Markus Czupalla, Stefan Schael, and Leon Spies. Thermal Design of the AMS-100 Cosmic Particle Detector at L2. In *Proceedings of the European Space Thermal Engineering Workshop 2022 (ESTEW 2022)*, Noordwijk, The Netherlands, 2022. European Space Agency (ESA/ESTEC).

[16] David Fehr, Stefan Schael, and Markus Czupalla. Trading Foldable and Rigid HTS Coil Concepts for the Cosmic Particle Detector AMS-100. In *Proceedings of the 17th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing (ECSSMET 2023)*, Toulouse, France, 2023. European Space Agency (ESA).

[17] Dominik Pridöhl, Laurenz Klein, Kai-Uwe Schröder, and Stefan Schael. Magneto-elastic analysis of thin-walled superconducting solenoids. *Thin-Walled Structures*, 223:114619, 2026. DOI: 10.1016/j.tws.2026.114619.

[18] Tobias Schalm, Tim Bender, Dominik Pridöhl et al. A Concept for a Novel Predictive Framework for Hypervelocity Impact Risk Assessment Based on Modular Transfer Functions. In *Proceedings of the 22nd IAA Symposium on Space Debris (Held at the 75th International Astronautical Congress, IAC 2024)*, pages 258–267, Milan, Italy, 2025. International Astronautical Federation (IAF). DOI: 10.52202/078360-0024.

CC BY 4.0