

Verbundprojekt:

Hochstromanwendungen mit Hochtemperatursupraleitern

Technische Leiterentwicklung und Bau von Funktionsmodellen

Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie

Fördervorhaben BMBF IV (13N6481 A/6)

**2223 BPSCCO-Bandleiterherstellung für Anwendungen
in der Energietechnik**

Abschlussbericht

Zeitraum: 01.07.97 – 30.09.01

Projektleiter:

Dr. H.-W. Neumüller

Siemens AG

Zentralabteilung Technik Erlangen/München/Berlin
Energieübertragung und -verteilung Erlangen/Berlin

März 2002

Inhaltsverzeichnis:

Inhaltsverzeichnis:	1
Teil I:	2
1 Aufgabenstellung.....	2
2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	6
4.1 Angabe bekannter Konstruktion Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	6
4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	8
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
Teil II:	10
1. Erzielte Ergebnisse: 2223 Bi-Bandleiter	10
1.1 2223 BPSCCO-Ag-Bandleiter: Stromsteigerung und Stromdichteerhöhung	10
1.1.2 Umformung	26
1.1.3 Thermomechanische Behandlung	31
1.1.4 Optimierung des Phasenbestandes / Blasenbildung	36
1.1.5 Supraleitende Eigenschaften und Mikrostrukturanalyse	44
1.2 Prozess- und Prüftechnik für große Bandleiterlängen.....	52
1.2.1 Draht /Bandherstellung	52
1.2.2 Qualitätskontrolle	62
1.3 2223 BPSCCO Bandleiter optimiert für technische Anwendungen.....	65
1.3.1 Bänder / Drähte mit verbesserten mechanischen Eigenschaften.....	65
1.3.2 Bänder / Drähte optimiert für 50 Hz- Anwendungen	71
1.3.3 Hochstrom-Leiterentwicklung.....	90
2. Voraussichtlicher Nutzen	92
3. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens an anderen Stellen.	92
4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	94
Fachpublikationen.....	94

Teil I:

1 Aufgabenstellung

Das Ziel der Arbeiten zum Thema „BiPbSrCaCuO-2223-Bandleiter (2223 BPSCCO)“ war zum Zeitpunkt der Antragstellung, supraleitende Drähte mit technischen Stromdichten und mechanischer Festigkeit in ausreichender Menge reproduzierbar herzustellen. Als erster Einsatzfall war im Rahmen des Gesamtprojektes die Fertigung eines 100 m langen HTSL- Kabels geplant, wofür zunächst 40km Bandleiter geplant waren. Die Aufgaben sind in vier wesentliche Arbeitspakete aufgliedert:

- **Prozeßoptimierung Standardleiter:** Ziel der Arbeiten in diesem Arbeitspaket ist die Steigerung der Gesamtstromdichte der Bandleiter sowie die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Legierungsleiter (AgMg-Bandleiter). Zum Ende der Projektlaufzeit sollte ein blasenfreier Standardleiter mit hoher Gesamtstromdichte von $j_e = 12\text{kA/cm}^2$ in einer Länge von 1km zur Verfügung stehen.
- **Ic/jc Steigerung:** Bis zum Ende der Projektlaufzeit sollte die Stromdichte im HTSL bis auf 80kA/cm^2 in kurzen Längen erhöht und der Gesamtprozeß hinsichtlich der Umformung und der thermo-mechanischen Behandlung optimiert sein. Die enge Kooperation mit den Pulverherstellern (Merck, Aventis) berücksichtigte den erheblichen Einfluß des Prekursormaterials.
- **AC-Leiter:** Für die Anwendung von 2223 BPSCCO Bandleitern bei Netzfrequenzen (50-60Hz) sind spezielle Leiter zur AC-Verlustminimierung notwendig. Erste Ansätze hatten gezeigt, dass durch Verdrillen (Twisten) von „Standardleitern“ eine Verringerung der Verluste von 1 mW/Am auf etwa $0,6\text{ mW/Am}$ möglich ist. Für langfristig aussichtsreiche Werte unterhalb $0,4\text{ mW/Am}$ war die Entwicklung von Leitern mit erhöhtem Querwiderstand vorgesehen. Neben den bisher untersuchten Legierungsmatrixleitern wurden neue Verfahren wie z.B. oxidische Barrieren und Diffusionstechniken untersucht. Die zweite wichtige Voraussetzung von HTSL Drähten in der Energietechnik ist die hohe Stromtragfähigkeit, die durch verlustarme Verbundleiter mit einer Stromtragfähigkeit $I_c > 500\text{A}$ in Längen von 50m zu demonstrieren war.
- **Meßtechnik und Grundlagen:** Dieses zu Beginn der Projektlaufzeit forciertes Aufgabenpaket war auf das Verständnis des Zusammenhangs zwischen Stromtragfähigkeit und Mikrostruktur sowie deren Beeinflussung durch Prekursor, Umformung und thermomechanische Behandlung ausgerichtet. Neben der Mikrostrukturanalyse mit REM und TEM müssen physikalische Meßverfahren zur orts aufgelösten j_c -Messung und zur Bewertung des intergranularen Kontaktes

aufgebaut werden. Zur laufenden Qualitätskontrolle der Drähte wurde der Einsatz einer zerstörungsfreien, kontinuierlichen I_c -Meßapparatur vorgesehen.

2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde als Verbundvorhaben mit Partnern aus Universitäten und Forschungseinrichtungen durchgeführt, welche den Projektfortschritt direkt bei der Bandleiteroptimierung (IFW Dresden) oder in Teilaufgaben wirksam unterstützt haben (Uni. Tübingen – Precursorparameter, FZ Karlsruhe - HTSL-Optimierung, Verbundleiter, MPI Stuttgart – HTSL-Phasenbildung, Phys. Inst. Universität Erlangen – Elektromagnetische Eigenschaften, Mineralogie Universität Erlangen – Prekursor Phasenanalyse).

Ab 10/99 wurden die gesamten Bandleitertaufgaben zur Vacuumschmelze verlagert, da man mit der Konzentration von Entwicklung und Produktion an einem Standort der gestiegenen Konkurrenz, z.B. in Europa durch NST (Nordic Superconductor Technologies) und in USA durch (AmericanSuperConductor) begegnen musste. Im September 2000 wurde die VAC Hanau von Siemens an Morgan Crucibles verkauft.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Nach planmäßigem Projektstart konnten die für den Bau des HTSL-Kabels benötigten 2223 BPSCCO Bandleiterlängen zeitgerecht fertiggestellt werden. Die erfolgreichen Arbeiten zur Realisierung des ersten 50m Teilstückes konnten nicht mehr weitergeführt werden, da Siemens 10/98 das gesamte Kabel-Geschäftsgebiet an Pirelli verkauft hatte. Zu diesem Zeitpunkt waren gerade 18 km 55 Filament Bi-Bandleiter mit AgMg-Hülle von der VAC für das 50m Kabelmodell gefertigt worden. Die Stromwerte entsprachen dem geforderten Wert von 45A, wenn auch noch mit großen Schwankungen.

Die aus diesem Anlass zunächst für das gesamte Projekt 13N6481A/6 verfügte Sperrung durch das BMBF wurde durch einen Änderungsbescheid aufgehoben; das Projekt unter dem modifizierten Titel „2223 BPSCCO Bandleiterherstellung für Anwendungen in der Energietechnik“ zunächst bis 30.6.2001 weitergeführt und nach einem weiteren bewilligtem Aufstockungsantrag inklusive einer kostenneutralen Verlängerung am 30.09.2001 beendet. Der Wegfall der Kabelaktivitäten bedingte eine Neuausrichtung der Entwicklungsziele. Neben der Prozessoptimierung standen nunmehr die Entwicklung von AC-optimierten Bandleitern und hochstromtragenden Verbundleitern, wie z.B. transponierte Seilleiter im Vordergrund. Künftige HTSL-Betriebsmittel, wie Transformatoren, Motoren, SMES benötigen technische Leiter mit hohem Stromtragvermögen und niedrigen Verlusten bei Netzfrequenz und Pulsbelastungen. In Japan und USA bestanden bereits zahlreiche Entwicklungsprojekte zu AC-optimierten Bandleitern und Verbundleitern. Die

im Projektzeitraum erfolgten Fortschritte insbesondere bei der Prozessstabilität haben sich auch auf Beiträge und Beteiligung der Kooperationspartner ausgewirkt. Das Thema Pulver/Prekursoruntersuchungen verlagerte sich zunehmend zu den Pulverherstellern Merck und Aventis. Der Partner Uni Tübingen wurde daher 8/2000 in ein neues, der 2223 BPSCCO-Bandleiterherstellung zugeordnetes Förderprojekt „Entwicklung von Bi-Prekursor“ mit Merck Darmstadt und Aventis eingegliedert. Die Arbeiten des physikalischen Instituts Erlangen wurden 6/2000 zur Untersuchungen der Granularität in HTSL-Bändern eingestellt.

Zu den wesentlichen Problemstellungen gehörten die Blasenbildung in 2223 BPSCCO-Bandleitern, die erst Anfang 2000 durch ein Bündel von Maßnahmen nachhaltig deutlich unter den Zielwert von 1 Blase/100m gedrückt werden konnte. Planbarkeit und Flexibilität brachte die ab Mitte 2000 eingeführte statistische Versuchsplanung (SVP) als wirksames Werkzeug, die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen bei der Walz- und Glühprozessen mit zeitsparender Effizienz festzustellen.

Zusammenfassung: Wichtige Stationen im Projektablauf:

- 7/ 97 Projektstart**
je = 3-5kA/cm² in langen Längen, je = 10-15kA/cm² in Meterlänge
Probleme mit Blasen, Pulverqualität

- 6/98 Programminitiative: Stabilisierung des Produktionsprozesses (Trafoleiter):**
Qualität und Reproduzierbarkeit

- 10/98 Verkauf Kabelgeschäft an Pirelli - Umschichtung des BMBF Projektes –**
VAC übernimmt gesamt 2223 BPSCCO-Entwicklung
Modifizierte Meilensteinplanung
18km Kabelleiter mit je = 3-4,5kA/cm² geliefert

- 1/99 Projektneuorganisation:**
Stand: je = 7,5 kA/cm² in 55 fil AgMg-Bandleitern reproduziert

- 9/99 Verbesserung des Blasenproblems**
(Qualitätssicherung/ Zusammenarbeit m. Pulverherstellern, Calzinierung,
Rietveldanalyse)
Stand: je= 5-6 kA/cm² 400m, nahezu blasenfrei (Konkurrenz AmSC, NST)
Intensivierung des AC-Leiterprogrammes Barrierenkonzepte
VAC von Siemens an Morgan Crucibles verkauft