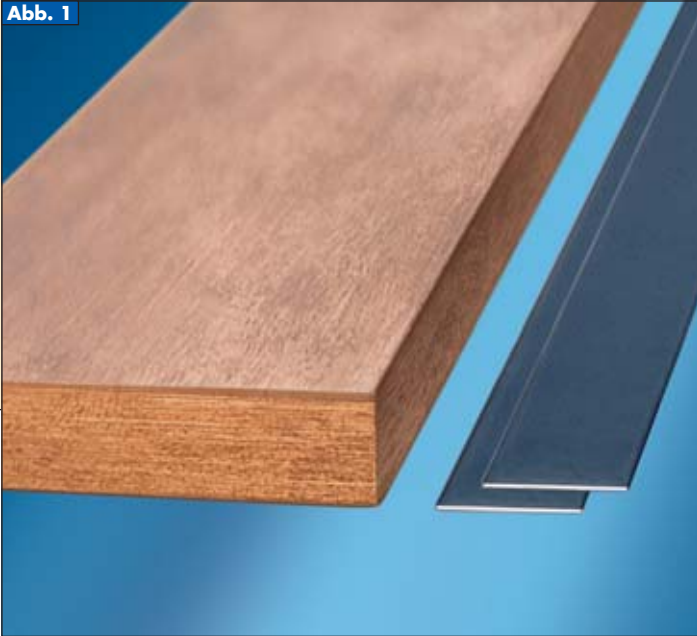


Hochtemperatur-Supraleiter

Abb. 1



- ▶ **Leiter der zweiten Generation stehen vor der industriellen Umsetzung**
- ▶ **Höhere Netzsicherheit durch Strombegrenzer**
- ▶ **Konzepte für künftige Stromnetze mit supraleitenden Kabeln**
- ▶ **Industrielle Wärmeverfahren erreichen 40% Energieeinsparung bei gleichzeitig verbessertem Produktionsablauf**

Der Hochtemperatur-Supraleiter zweiter Generation (rechts) leitet verlustfrei die gleiche Stromstärke von 200A wie das abgebildete Kupferkabel (links).

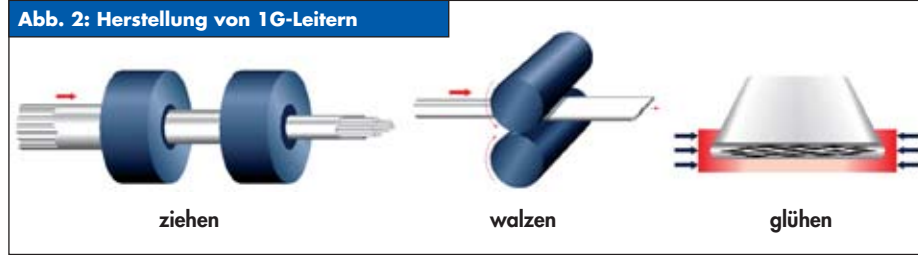
Bereits vor etwa 100 Jahren entdeckte der Physiker H. K. Onnes, dass Quecksilber unterhalb einer Temperatur von 4,2 Kelvin sprunghaft seinen elektrischen Widerstand verliert. In der Folgezeit wurden supraleitende Metalllegierungen mit Sprungtemperaturen bis zu 23 K entwickelt. Diese ermöglichten in den letzten 30 Jahren bahnbrechende Entwicklungen vor allem in der Medizintechnik aber auch in der physikalischen Forschung. Gemessen an den vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten blieb die Supraleitung dennoch lange Zeit eine Nischentechnologie. Hauptgrund ist der Aufwand, den die Aufrechterhaltung solcher niedriger Temperaturen erfordert. Da unterhalb von 23 K nur Helium noch flüssig ist, kommt nur dieses als Kühlmittel in Frage. Es ist jedoch teuer und schwer zu handhaben. Auch der Energiebedarf zur Verflüssigung ist beträchtlich. Entsprechend groß war die Euphorie im Jahr 1986, als die Physiker J. G. Bednorz und K. A. Müller Materialien entwickelten, die bereits bei 35 K supraleitend werden: Im Unterschied zu den bisher bekannten Metallen und Legierungen handelt es sich hier überraschenderweise um keramische Substanzen. Schon ein Jahr später erreichten neue Materialien Sprungtemperaturen oberhalb von 77 K. Jetzt war es möglich, mit flüssigem Stickstoff zu kühlen, der als Industrieprodukt kostengünstig zur Verfügung steht. Die möglichen Einsatzfelder er-

weitern sich dadurch schlagartig. Auch energietechnische Anwendungen und insbesondere Effizienztechnologien rücken in den Bereich des Möglichen. Es bleibt aber bis heute noch weiterer Entwicklungsbedarf, um aus den spröden keramischen Materialien supraleitende Drähte oder Bänder in der erforderlichen Qualität und Menge zu akzeptablen Kosten herzustellen.

Pilotprojekte in Stromnetzen sowie für Motoren und Generatoren und bei Anwendungen in industriellen Prozessen zeigen, dass gegenüber der konventionellen Technik erhebliche Energieeinsparungen realisiert werden. Oftmals tritt noch ein Sekundärnutzen hinzu, der die Supraleitung besonders attraktiv gegenüber konventioneller Technik macht. So sind Supraleiter kleiner, leichter und effizienter als konventionelle Leiter, z. T. können auch Verbesserungen der Verfahren erreicht werden.

Das Potenzial der Technologie ist rund um den Globus erkannt worden. Länder wie die USA, Japan, Korea, China und Indien haben die Forschung verstärkt. Deutschland liegt seit einer intensiven Förderung in den neunziger Jahren gut im Rennen. Speziell mittelständische Unternehmen können hoch entwickelte Produkte und Systemlösungen anbieten. Um diese gute Position zu halten und auszubauen, fördert das Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) in zahlreichen Projekten die Entwicklung der Technologie und deren Anwendungen.

► HTS-Drähte und Bänder



Bisher sind zwei Verbindungen bekannt, die das technische und kommerzielle Potenzial für die Herstellung von HTS-Drähten haben. Beide sind keramische oxidische Materialien mit Kuper-Oxid-Ebenen als gemeinsamer Basis: Diese sind Wismut-(Blei-)Strontium-Calcium-Kupfer-Oxid ((Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+x} kurz BSCCO) mit einer Sprungtemperatur von T_c=110 K sowie Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid (YBa₂Cu₃O_{7-x}) mit T_c=92 K (YBCO). Die Produktion flexibler und langer HTS-Leiter mit diesen beiden Materialien stellt die Forschung vor eine Vielzahl von Herausforderungen: so sind die Werkstoffe spröde und brüchig. Erst bei ausreichend kleinen Dimensionen und in Verbindung mit einer metallischen Matrix oder einem Metallsubstrat erreichen sie die notwendige Flexibilität. Zudem beeinflusst die Orientierung der Kristallstruktur (Textur) die Stromtragfähigkeit über mehrere Größenordnungen und auch Korngrenzen der kristallinen Struktur limitieren die erreichbaren Stromstärken. Nicht zuletzt bestimmt die Mikrostruktur darüber, bis zu welcher Magnetfeldstärke das HTS-Material supraleitend bleibt. Gerade in energietechnischen Anwendungen ist dieses kritische Magnetfeld oftmals die entscheidende Größe. Während für die erste Generation, bei der dünne Langfasern in Silber als Metall eingebettet werden, industrielle Fertigungsverfahren verfügbar sind, konzentriert sich die Entwicklung zunehmend auf unterschiedliche Dünnschichttechnologien für die Bandleiter der zweiten Generation.

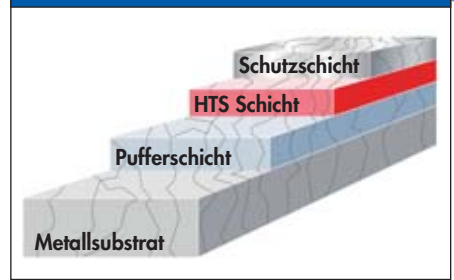
Die erste Generation – Drähte

HTS-Drähte der ersten Generation (1G) werden nach der Pulver-im-Rohr Methode mit BSCCO hergestellt:

Das Ausgangsmaterial wird als feines Pulver in ein leicht verformbares Hüllrohr aus Silber gefüllt, welches zu einem dünnen Draht gezogen wird. Der Durchmesser reduziert sich von etwa 35 auf 2 mm. Die Pulverpartikel passen sich dabei dem geringeren Drahtquerschnitt an. Mehrere dieser Einzeldrähte werden wiederum in einem Silberrohr gebündelt und zu einem Multi-Filament-Draht gezogen. In einem anschließenden mehrstufigen Glühverfahren unter Sauerstoffatmosphäre und bei Temperaturen von etwa 900 °C bildet sich die supraleitende Phase in Form feinsten Kristallite in den parallelen Filamenten aus, die jeweils durch das metallische Hüllmaterial getrennt sind. Mehrere Walzschritte zwischen den Wärmebehandlungen sorgen für die parallele Ausrichtung der Kristallite und der stromtragenden CuO-Ebenen.

1G-Leiter auf der Basis von BSCCO sind zuverlässig und haltbar. Der etablierte Herstellungsprozess garantiert heute eine ausreichende Verfügbarkeit. Allerdings sind die Materialkosten bei einem Silberanteil der Drähte von 60% oder mehr hoch. Auch eine nicht absolut perfekte Ausrichtung aller Kristallachsen sowie dadurch bedingt eine stark reduzierte Stromtragfähigkeit, insbesondere in Magnetfeldern oberhalb einer Temperatur von 50 K, schränken die Einsatzmöglichkeiten ein.

Abb. 4: Schichtarchitektur von 2G-Leitern



Die zweite Generation – Bänder

HTS-Bandleiter der zweiten Generation (2G) erreichen höhere Stromdichten, eignen sich wegen der anderen Materialklasse (YBCO statt BSCCO) besser für Magnetfeldanwendungen und bieten die Chance für eine kostengünstige Massenproduktion. Nennenswerte Mengen werden bislang allerdings nur von zwei amerikanischen Firmen angeboten, aber europäische und insbesondere deutsche Firmen planen den Aufbau von Produktionslinien. Die sogenannten „Beschichteten Leiter“ (Coated Conductor – CC) basieren auf einer Schichtarchitektur: auf ein metallisches Trägerband werden zunächst keramische Pufferschichten, dann die eigentliche Supraleiterschicht abgeschieden.

Das BMWi fördert in drei großen Verbundvorhaben unterschiedliche Verfahren für die industrielle Produktion. Physikalische Methoden wie Sputtern, Laserablation oder Elektronenstrahlverdampfung erzielen Schichten mit höchster Performance. Mit der Elektronenstrahlbeschichtung gelang es der THEVA GmbH bereits, die Stromdichte von 1000 A/mm² zu überschreiten. Da die physikalischen Verfahren im Hochvakuum ablaufen, werden aber geringere Beschichtungsraten erreicht als bei chemischen Prozessen wie der chemischen Lösungsbeschichtung (Chemical Solution Deposition – CSD). Eine Mittelstellung nimmt die chemische Vakuumbeschichtung (Metal Organic Chemical Vapour Deposition – MOCVD) ein, die nur ein moderates Vakuum erfordert.

Abb. 3: Stromtragfähigkeit in Magnetfeldern

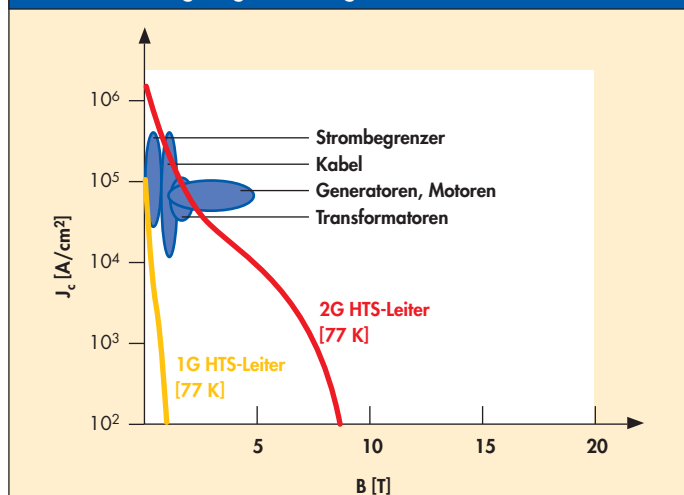
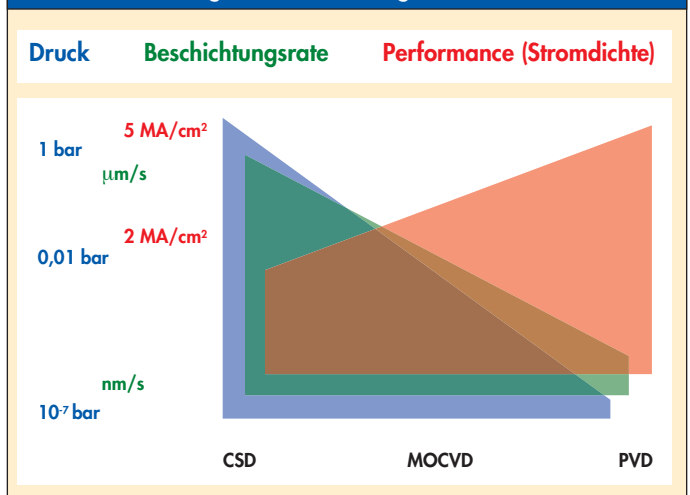


Abb. 5: Beschichtungsverfahren im Vergleich



► Anwendungsforschung

Eine Vielzahl von, zum Teil vom BMWi geförderten Forschungsprojekten, Demonstrationsvorhaben und Studien untersucht das breite Einsatzspektrum von HTS-Supraleitern, beispielsweise:

- Ein 4 MW-Schiffsantriebsmotor mit hohem Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen steht derzeit bei der Firma Siemens auf dem Teststand.
- Bei der Modernisierung eines Wasserkraftwerks in Hirschaid ersetzt ein HTS-Generator mit höherer Ausgangsleistung einen konventionellen Generator gleicher Baugröße. Dies erspart den Umbau im denkmalgeschützten Gebäude.
- Die Firmen Converteam und Zenergy entwickeln in mehreren Projekten Generatoren für Wind- und Wasserkraftwerke, darunter eine getriebelose 8 MW-Windturbine, die gegenüber konventioneller Technik 75% Gewicht einspart.
- Die Firma Oswald entwickelt Motoren im mittleren Leistungsbereich für Fahrzeuge, Generatoren und Werkzeugmaschinen.
- Deutsche Firmen (Nexans und NKT) sind maßgeblich an Kabelprojekten auf der internationaler Ebene beteiligt.

Exemplarisch sollen zwei Entwicklungen vorgestellt werden, die dem Anwender neben einer höheren Energieeffizienz weitere entscheidende Vorteile bieten, eine wirtschaftliche Lösung darstellen und für eine große Zahl potenzieller Nutzer interessant sind.

Industrielle Wärmebehandlung

In industrialisierten Ländern entfallen 1-5% des gesamten Stromverbrauchs auf die Materialerwärmung in Strangpresswerken. Ein neu entwickelter supraleitender Magnetheizer verbraucht etwa 40% weniger Energie als ein mit Wechselstrom betriebener Induktionsofen und rund 60% weniger Energie als ein Gasofen mit vergleichbarer Leistung. Die Anlageninvestition für einen Magnetheizer amortisiert sich durch Produktivitätssteigerungen und eingesparte Energiekosten in durchschnittlich weniger als zwei Jahren. Die Entwickler der Anlage, die Zenergy Power GmbH und die Bültmann GmbH, wurden mit dem Innovationspreis „Klima und Umwelt 2010“ ausgezeichnet.

Der Magnetheizer arbeitet nach dem Prinzip einer Wirbelstrombremse. In der Anlage befindet sich eine mit Gleichstrom betriebene supraleitende Magnetspule, in deren Feld der Pressbolzen von zwei Elektromotoren gedreht wird. Dabei muss die Bremswirkung des Magnetfelds überwunden werden, was zur Aufheizung des rotierenden Materials führt.

Kurzschlussicherheit von Stromnetzen

Supraleitende Strombegrenzer erhöhen die Kurzschlussicherheit und Zuverlässigkeit von Stromnetzen und können gleichzeitig die Investitionskosten senken. Bei einem Kurzschluss treten in elektrischen Netzen Stromstärken auf, die die Nennbelastung um ein Vielfaches übersteigen können. Damit keine größeren Schäden auftreten, muss das Netz auf diese Beanspruchungen ausgelegt werden, das heißt kurzschlussfest sein. Gemessen am Normalbetrieb führt dies zu einer Überdimensionierung, die sich nicht zuletzt auch in den Investitionskosten niederschlägt. In der Vergangenheit kam es immer wieder zu Netzausfällen, an deren Anfang ein Kurzschluss im Netz stand. Strombegrenzer, welche die Höhe des Kurzschlussstromes begrenzen, können wesentlich zur Erhöhung der Sicherheit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Netzen beitragen.

Ideale Strombegrenzer zeichnen sich durch einen niedrigen Wechselstromwiderstand (Impedanz) im Normalbetrieb, schnelle und wirksame Strombegrenzung im Fehlerfall und automatische Wiedereinsatzbereitschaft aus. Bisherige Maßnahmen zur Kurzschlussstrombegrenzung werden in der Mittelspannung eingesetzt und bedingen entweder eine dauerhafte Impedanzhöhung auch im Normalbetrieb oder ihr Einsatz muss nach jeder Auslösung ausgewechselt werden (beispielsweise Sicherungen oder Is-Begrenzer, die den Strompfad durch eine Sprengladung auftrennen). Für das Hochspannungsnetz gibt es bisher überhaupt keine Strombegrenzer, auch die konventionellen Lösungen aus der Mittelspannung sind hier nicht anwendbar.

Im Unterschied dazu erfüllen Supraleitende Strombegrenzer sämtliche Anforderungen an einen idealen Strombegrenzer. Dabei nutzt man den Umstand, dass der supraleitende Zustand oberhalb einer maximalen Stromdichte in den normal leitenden Zustand übergeht. Dadurch baut der Supraleiter schlagartig einen hohen Widerstand auf, der den Stromfluss wirksam auf einen designten Wert begrenzt, unabhängig davon, wie hoch der erwartete Kurzschlussstrom ausfällt.

Der Strombegrenzer funktioniert somit ohne äußere Signale und ist eigensicher. Er geht ohne weitere Wartung nach einer kurzen Abkühlphase automatisch wieder in Betrieb. Das Interesse an der Technologie ist groß. In Deutschland entwickeln vier Unternehmen supraleitende Strombegrenzer mit z. T. unterschiedlichen Prinzipien. Nexans SuperConductors hat die ersten kommerziellen Geräte im Einsatz in öffent-

Abb. 6: Magnetheizer



Abb. 7: Strombegrenzer im Kraftwerk Boxberg



lichen Stromnetzen in England und Deutschland. Einer davon schützt seit Ende 2009 die Stromversorgung von Kohlemühlen und -brechern im sächsischen Braunkohlekraftwerk Boxberg vor Kurzschlüssen. Der Betreiber verspricht sich von der Technologie einen erheblichen Gewinn an Personen- und Anlagensicherheit. Bewährt sich das Prinzip, könnten solche Strombegrenzer die komplette Kraftwerkseigenversorgung vor Kurzschlussströmen bewahren. Geeignet sind supraleitende Strombegrenzer für Kraftwerksneubauten, aber auch für Erweiterungen wie die Nachrüstung von Anlagen zur CO₂-Abscheidung. Das Projekt wurde mit dem Energy Masters Award 2010 ausgezeichnet.

Supraleitende Strombegrenzer für die Hochspannungsebene sind in der Entwicklung, aber noch nicht im Praxiseinsatz. Auch sie sollen den Aufbau einer effizienteren Netzstruktur ermöglichen: So ließen sich beispielsweise 110-kV Teilnetze, die jeweils mit einem 400-kV-Transformator verbunden sind, über Strombegrenzer kuppeln. Durch diese Kupplung könnte einer der beiden Trafos wegfallen (n-1 Prinzip) und damit nicht nur die Investitionskosten vermieden werden, sondern auch die Verluste eingespart und dadurch Betriebskosten reduziert werden.

► Perspektiven

Eine neue Generation von Hochtemperatur-Supraleitern steht in den Startlöchern, die der Technologie breite Anwendungsmöglichkeiten eröffnet. Während die erste Generation der HTS-Drähte zu 60% aus Silber besteht und damit entsprechend kostspielig ist, kommen die neuen HTS-Bandleiter nahezu ohne teure Rohstoffe aus. Verschiedene Herstellungsverfahren werden mit Unterstützung des BMWi verbessert bzw. weiterentwickelt und aus der Laborphase in Richtung industrielle Pilotproduktion geführt. Bisher sind die Produktionskapazitäten jedoch noch gering. Eine zwei Kilometer lange Pilotstrecke für ein Supraleiterkabel auf der Mittelspannungsebene, die der Energiekonzern RWE derzeit in Erwägung zieht, würde heute die gesamte Weltjahresproduktion an HTS-Bandleitern benötigen.

Fachleute schätzen den künftigen Bedarf an HTS-Draht je nach Marktdurchdringung der HTS-Komponenten zwischen 10.000 km pro Jahr in den nächsten Jahren bis auf 500.000 km in fünf bis zehn Jahren. Wenn die erwartete deutliche Kostendegression durch Massenfertigung erreicht wird, können Hochtemperatur-Supraleiter eine zunehmend wichtige Rolle bei Energieversorgung und Effizienztechnologien spielen. Sie ermöglicht beispielsweise verlustfreie Stromkabel, kompaktere Motoren und Generatoren mit höheren Wirkungsgraden sowie für die Industrie effiziente Wärmeverfahren und reibungsfreie, supraleitende Lager.

Eine besondere Bedeutung wird der Technologie auch bei der Anpassung des Stromnetzes an die sich verändernde, zunehmend dezentralen Erzeugungsstrukturen zugemessen. Eine aktuelle Studie belegt signifikante Vorteile insbesondere in Ballungsräumen. Transformatoren und Kabel können kompakter und leichter werden, ihre geringere Impedanz erhöht die Netzstabilität und nicht zuletzt lassen sie sich aktiv Kurzschlussstrom begrenzend ausführen. Supraleitende Magnetenergiespeicher können Leistungs- und Spannungsschwankungen im Netz kompensieren. Die hohe Stromtragfähigkeit ermöglicht neue Netztopologien, in denen einzelne Netzebenen entfallen können. In der Summe führt der Einsatz der verschiedenen HTS-Betriebsmittel zu einer deutlichen Energieeinsparung in städtischen Netzen – am Beispiel von Köln errechnet die Studie etwa 60.000 Tonnen vermiedenes CO₂ jährlich durch geringere Netzverluste. Erste großtechnische Netzanwendungen stehen vor der Realisierung. In den USA ist z. B. geplant, zwei große und ein kleines Stromnetz über 5 GW supraleitende Hochspannungs-Gleichstromkabel zusammenzuschließen. Das „Tres Amigas“-Projekt soll die Integration von Erneuerbaren Energien in die Stromversorgung erleichtern und gleichzeitig die Netzstabilität in den USA verbessern.

Die Vielzahl der in dem Bereich forschenden Institutionen und kommerziellen Unternehmen in Deutschland ist europaweit einzigartig und lässt sich mit den führenden Technologienationen wie USA und Japan vergleichen. Deutschland hat damit gute Chancen, in der supraleitenden Energietechnik eine Führungsrolle einzunehmen, ähnlich wie dies mit vielen Umwelttechnologien und mit Erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne gelungen ist.

► PROJEKTADRESSEN

- Adelwitz Technologiezentrum GmbH (ATZ), Arzberg
- Bruker HTS GmbH, Hanau
- GTT Gesellschaft für Technische Thermochemie und-physik mbH, Herzogenrath
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen
- Nexans SuperConductors GmbH, Hürth
- Oswald Elektromotoren GmbH, Miltenberg
- Theva Dünnschichttechnik GmbH, Ismaning
- Zenergy Power GmbH, Rheinbach

► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

Internet

- www.ivsupra.de

Abbildungsnachweis

- Hintergrundbild S.1, Abb. 1 – 6: Zenergy Power GmbH, Rheinbach
- Abb. 7: Nexans SuperConductors GmbH, Hürth
- Hintergrundbild S. 2: Theva Dünnschichttechnik GmbH, Ismaning

Service

- Dieses Projektinfo gibt es auch als online-Dokument unter www.bine.info im Bereich Publikationen/Projektinfos. In der Rubrik „Service“ finden Sie ergänzende Informationen wie weitere Projektadressen und Links.

PROJEKTORGANISATION

■ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW_i)
11019 Berlin

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Claus Börner
52425 Jülich

■ Förderkennzeichen

327433A, B
037456A, B
0327489A, B, C
0327866A, C
03KP102 A, B

IMPRESSUM

■ ISSN

0937 – 8367

■ Version in Englisch

Das Dokument finden Sie unter www.bine.info.

■ Herausgeber

FIZ Karlsruhe
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

■ Urheberrecht

Eine Verwendung von Text und Abbildungen aus dieser Publikation ist nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion gestattet. Sprechen Sie uns an.

■ Autor

Dr. Franz Meyer

BINE Informationsdienst Energieforschung für die Praxis

BINE Informationsdienst berichtet zu Energieeffizienztechnologien und Erneuerbaren Energien.

In kostenfreien Broschüren, unter www.bine.info und per Newsletter zeigt die BINE-Redaktion, wie sich gute Forschungsideen in der Praxis bewähren.

BINE Informationsdienst wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW_i) gefördert.

Kontakt

Haben Sie Fragen zu diesem **projektinfo**?
Wir helfen Ihnen weiter:

Tel. 0228 92379-44



FIZ Karlsruhe, Büro Bonn
Kaiserstraße 185 – 197
53113 Bonn

kontakt@bine.info
www.bine.info