



Klimatisieren und Kälte speichern mit Salzlösungen

Abb. 1



- ▶ **Verlustfreie Speicherung von Energie für die Klimatisierung**
- ▶ **Low-Flow Technologie verbessert die Speicherdichte**
- ▶ **Demonstrationsanlage nutzt Fernwärme zur Kühlung**

Heiße Musik in cooler Atmosphäre – klimatisierter Jazzklub in München

In großen Gebäuden wie Büros, Warenhäusern, Kongresszentren, Theatern lässt sich ein behagliches Raumklima meist nur mit raumlufttechnischen Anlagen zuverlässig gewährleisten. Oft übersteigt der Primärenergiebedarf für die Klimatisierung den für die Heizung, denn nach wie vor beherrschen elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen den Markt. Sie belasten das Stromnetz gerade zu Spitzenlastzeiten durch ihren hohen Leistungsbedarf.

Wärmegetriebene Verfahren zur Klimatisierung stellen eine energieeffiziente Alternative dar. Sie nutzen die Abwärme von Blockheizkraftwerken, Überschusswärme aus Fernwärmenetzen oder aber die Sonnenenergie. Vielfach ist das Temperaturniveau der verfügbaren Wärmequelle relativ niedrig. Zu den Systemen, die dann eingesetzt werden können, gehören die offenen Sorptionsanlagen.

Offene Sorptionsanlagen klimatisieren Gebäude über die Lüftungsanlage. Mit festen oder flüssigen Sorbentien entfeuchten sie zunächst die angesaugte Außenluft. Die dabei frei werdende Wärme wird abgeführt. Eine gezielte Wiederbefeuchtung der Luft vor Eintritt in die Lüftungsanlage des Gebäudes senkt die Temperatur durch Verdunstungskühlung. Vorteil offener Sorptionssysteme ist, dass nicht nur die Temperatur, sondern auch die Luftfeuchte den Behaglichkeitsanforderungen angepasst werden kann. Nieder-

temperaturwärme trocknet die bei dem Prozess mit Feuchte beladenen Sorbentien wieder. Dies geschieht überwiegend kontinuierlich während der Klimatisierung.

Die Entkopplung von Wärmebedarf und Klimatisierung durch einen Speicher würde in vielen Fällen die Nutzbarkeit der Wärmequellen deutlich verbessern: Ein Speicher ermöglicht Versorgungssicherheit auch mit diskontinuierlich anfallender Abwärme, erlaubt den Einsatz von Sonnenenergie für den Nachtbetrieb oder an trüben Tagen. Sie kann durch den Transport des Speichermediums auch verbraucherfern anfallende Wärme für die Kälteversorgung erschließen.

Das ZAE Bayern hat ein speicherfähiges offenes Sorptionssystem zur Luftentfeuchtung und -kühlung entwickelt. In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützten Forschungsprojekt verwenden die Wissenschaftler eine konzentrierte Salzlösung als flüssiges Sorbens. Dies ermöglicht die verlustfreie Speicherung von Klimatisierungsenergie mit hoher Dichte. Das Verfahren eignet sich für zahlreiche Niedertemperatur-Wärmequellen.

Wie sich das System in der Praxis bewährt, zeigt eine Demonstrationsanlage in einem Münchner Jazzklub. Die bauliche Situation erforderte ein ungewöhnliches Anlagenkonzept.

► Offene Klimatisierungsverfahren

Bei offenen Verfahren steht das Kältemittel – Wasser – in direktem Kontakt mit der Atmosphäre. Im Unterschied zu geschlossenen Kältemaschinen stellen sie nicht nur Kälte bereit, sie konditionieren sowohl die Temperatur als auch die Feuchte.

Feste Sorbentien

Das am weitesten verbreitete Verfahren verwendet feste Sorbentien in Sorptionsrotoren (Abb. 2). Die Sektoren des Rotors durchlaufen mit einer langsamen Drehung abwechselnd die Zuluftseite, auf der die angesaugte Außenluft entfeuchtet wird und die Abluftseite, auf der das angelagerte Wasser unter Zufuhr von warmer Luft wieder desorbiert wird.

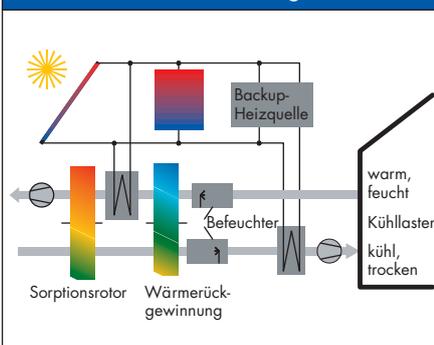
Das Sorptionsrad koppelt Entfeuchtung und Regeneration unmittelbar aneinander. Deshalb muss auch gleichzeitig regeneriert werden, wenn entfeuchtete Luft zur Klimatisierung benötigt wird. Eine Speicherung ist nicht möglich. Ein prinzipbedingter Nachteil ist die mögliche Übertragung von Gerüchen aus der Fortluft in die Zuluft. Verunreinigungen können sich an den großen Oberflächen der Sorbentien anlagern und gelangen nach einer halben Drehung wieder in den Zuluftstrom, wo sie desorbiert und ins Gebäude zurückgelangen können.

- und flüssige Sorbentien

Verfahren mit flüssigen Sorptionsmitteln vermeiden diesen Nachteile, da Zuluft und Abluft voneinander getrennt sind. Sie arbeiten aber nach dem gleichen Prinzip: Außenluft wird sorptiv entfeuchtet und durch Verdunsten von Wasser gekühlt. Die zentrale Einheit ist der Absorber. Hier wird ein flüssiges Sorbens auf gekühlten Kontaktflächen verrieselt, an denen die Luft vorbeigeführt wird (Abb. 3). Das Sorbens – üblicherweise eine konzentrierte wässrige Lithiumchloridlösung – nimmt die Luftfeuchte auf, wodurch die Salzkonzentration sinkt. Ein indirekter Verdunstungskühler führt die freiwerdende Sorptionswärme an die Abluft ab, sodass die Zuluft gleichzeitig entfeuchtet und gekühlt wird.

Das jetzt verdünnte Sorbens wird in einem Tank gesammelt und anschließend wieder aufkonzentriert, indem es in einem luftdurchströmten Regenerator auf 60 bis 80 °C erwärmt wird. Wärmerückgewinnung aus der Luft und dem Sorbens erhöht dabei den Wirkungsgrad. Durch getrennte Lagerung von verdünntem und konzentriertem Sorbens wird Energie gespeichert.

Abb. 2: Ein Sorptionsrotor erlaubt die solare Klimatisierung.



Effizienz und Speicherefähigkeit

Weltweit sind die Erfahrungen mit flüssigen Sorbentien bei der Gebäudeklimatisierung noch gering. Ein Forschungsprojekt des ZAE Bayern sollte das Potenzial der Technik für dieses Einsatzgebiet weiter ausloten und verbesserte Systemlösungen anbieten. In einem ersten Schritt optimierten die Forscher die Effizienz zentraler Komponenten wie Absorber und Regenerator, die sie in früheren Arbeiten, gemeinsam mit der L-DCS Technology GmbH, entwickelt hatten. Ein besonderes Augenmerk galt dabei der Speicherefähigkeit des Gesamtsystems. Mehrere Leistungstests am Absorber und am Verdunstungskühler unter kontrollierten Versuchsbedingungen erzielten eine Energiespeicherdichte zwischen 120 bis 150 kWh/m³. Dies ist deutlich größer als die eines Eisspeichers, der 50 bis 70 kWh/m³ erreicht. Die spezifische Leistung war für einen Prototyp akzeptabel, kann aber noch deutlich verbessert werden. Analysen deuteten darauf hin, dass nur ca. 30% der Bruttoaustauschfläche tatsächlich wirksam sind. Im Labor

Kombinierte Verfahren

Eine Begrenzung des Volumenstroms der Lüftungsanlage auf den hygienischen Luftwechsel und die notwendige Feuchteabfuhr ist energetisch sinnvoll. Wenn die Kühlleistung nicht ausreicht, können darüber hinaus gehende Wärmelasten über Flächenkühlssysteme abgeführt werden. Insbesondere bei kleinen Anlagen scheidet eine solche Lösung allerdings häufig an den höheren Investitionskosten, da zwei Systeme – Lüftungsanlage und System mit Kaltwasser – benötigt werden.

Verfügbare Systeme

Anlagen mit flüssigen Sorptionsmitteln werden seit Jahrzehnten zur industriellen Prozesslufttrocknung vertrieben. Aktuelle Produkte können Luftvolumenströme von 4.000 bis 120.000 m³/h behandeln. Eine Energiespeicherung im System ist nicht vorgesehen.

Gebäude werden bisher nur in Einzelfällen mit flüssigen Sorbentien klimatisiert. Das BINE-Projektinfo 8/2002 dokumentiert ein System, das mit einem hohen spezifischen Solestrom arbeitet. Die Salzlösung wird im Umlauf verwendet und wird nur phasenweise durch konzentrierte Sole ersetzt. Dadurch wird eine deutliche Konzentrationsdifferenz zwischen konzentrierter und verdünnter Lösung erreicht, was die nutzbare Speicherdichte erhöht. Die Lösung verliert zwar mit der Zeit an Entfeuchtungspotenzial, dies ist in gemäßigten Klimazonen vertretbar. In feuchten Klimaten muss die Sole jedoch so schnell erneuert werden, dass dort nur geringe Energiespeicherdichten erreicht werden.

wurden in früheren Versuchen an Einzelflächen bis zu 90% erreicht. Verbesserungen in der Konstruktion und der Fertigung sollen künftig die aktive Fläche auf 70% erhöhen.

Low-flow – die Kunst der Langsamkeit

Je stärker die Salzlösung bei der Absorption verdünnt werden kann um so größer ist die nutzbare Energiedichte des Speichers. Eine möglichst starke Verdünnung erreichten die Forscher mit der so genannten „low-flow“ Sorptionstechnik. Dabei verteilt sich in dem Absorber (Abb. 4) ein sehr kleiner Salzlösungsstrom gleichmäßig über eine große Austauschfläche. Lediglich 0,2 Liter (der Inhalt eines Weinglases) werden pro Stunde für die Benetzung eines Quadratmeters der Absorberfläche benötigt. Dadurch konnte ein Massenverhältnis von Salzlösungsstrom und Luftstrom zwischen 0,025 und 0,012 erreichen werden. Dies ist ca. 50 Mal kleiner als in kommerziellen Anlagen üblich.

Abb. 3: Klimatisieren mit Salzlösung

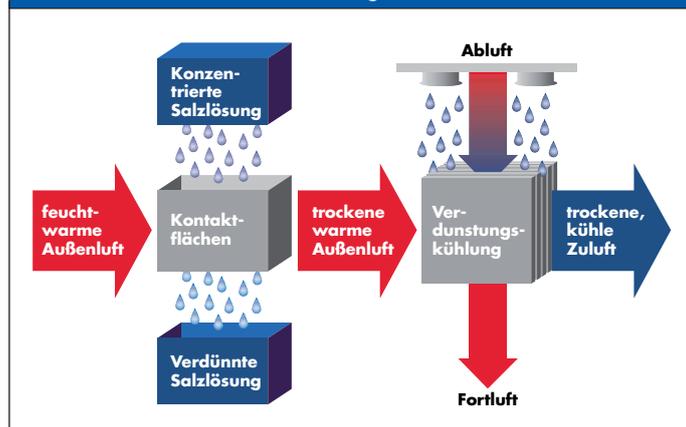


Abb. 4: Austauschflächen im geöffneten Absorber



► Demonstrationsanlage – Jazz cool genießen

Abb. 5: Die Anlage im Kühlbetrieb

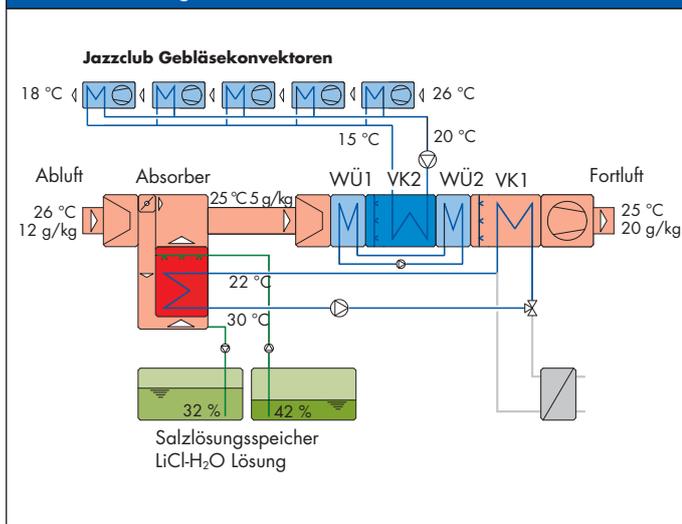
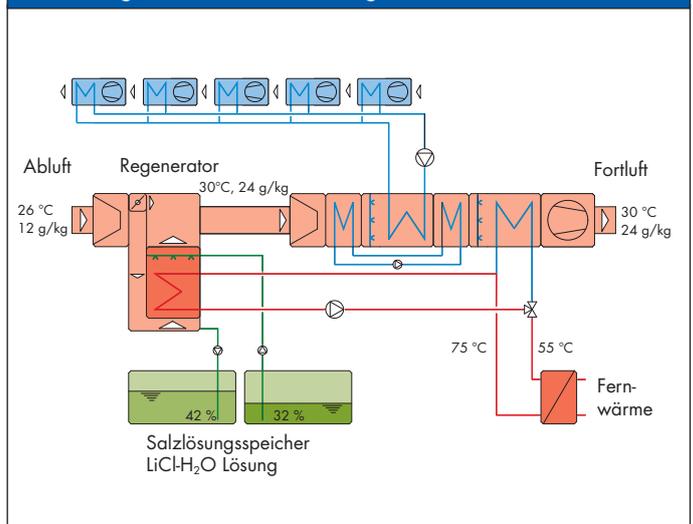


Abb. 6: Regeneration der Salzlösung



Mit einer Demonstrationsanlage zur Kühlung eines Münchner Jazzklubs wollten die Wissenschaftler Betriebserfahrungen unter realen Bedingungen sammeln und gleichzeitig die Praxistauglichkeit der Technologie aufzeigen. Sie installierten daher nicht nur eine umfangreiche Mess- und Steuertechnik, sondern legten auch Wert auf eine automatische Funktionsweise, um den Betrieb ohne Fachpersonal zu ermöglichen.

Kaltwasser statt Luft

Der Jazzklub verfügte bereits über eine Lüftungsanlage. Deren Luftkanäle reichen zwar aus, um den hygienisch nötigen Luftwechsel zu liefern, sie sind jedoch zu klein, um die erforderliche Kühlleistung abzuführen. Hierfür müsste die umgewälzte Luftmenge etwa viermal größer sein. Ein offenes Sorptionsystem im üblichen Sinn ließ sich deshalb nicht einsetzen.

Um den Aufwand gering zu halten, wurde ein spezieller Anlagenaufbau realisiert, der statt konditionierter Luft kaltes Wasser liefert. Dieses lässt sich über vergleichsweise kleine Leitungen transportieren, die problemlos nachträglich installiert werden konnten. Aus architektonischen Gründen und um die Umbaukosten gering zu halten, kühlt das System nicht über Kühlflächen, sondern über insgesamt acht Umluftkühler. Sechs befinden sich im Jazzklub, zwei in einer angrenzenden Küche.

Funktionsweise

Den Aufbau des Sorptionsystems zeigt **Abb. 5**: Ein Teil der Gebäudeabluft wird in einem Absorber mit konzentrierter wässriger Lithiumchloridlösung ($\text{LiCl-H}_2\text{O}$) entfeuchtet. Der Absorber wird dabei gekühlt, um eine Aufheizung durch die Absorptionswärme zu vermeiden. Das Kühlwasser liefert ein indirekter Verdunstungskühler (VK1). Die trockene Luft kühlt anschließend in einem Kreislaufverbundsystem ab, das aus zwei Wärmeübertragern (WÜ1 und WÜ2)

besteht. In einem indirekten Verdunstungskühler (VK2) wird Leitungswasser in die trockene Luft und über einen Wärmeübertrager versprüht. Das Wasser verdunstet, kühlt dabei die Luft und diese wiederum das Kühlwasser im Wärmeübertrager (VK2). Das Kühlwasser wird den Umluftkühlern im Jazzklub zugeleitet und nimmt dort Wärme aus dem Raum auf.

Nachdem die kühle und noch relativ trockene Luft im Wärmeübertrager WÜ2 und im Verdunstungskühler VK2 genutzt wurde, um den Wärmeübertrager WÜ1 und den Absorber zu kühlen, wird sie warm und sehr feucht wieder der Fortluft zugemischt.

Regeneration

Während der Kühlung wird dem Absorber kontinuierlich Salzlösung aus einem Vorratstank zugeführt. Die beim Kühlprozess stark verdünnte und damit „verbrauchte“ Lösung wird in einem zweiten Tank gespeichert. Damit sie wieder für die Luftentfeuchtung eingesetzt werden kann, muss sie wieder aufkonzentriert werden.

Zur Regeneration der Salzlösung wird wiederum Luft aus der Abluft des Gebäudes durch das Gerät geleitet, das vorher als Absorber arbeitete (**Abb. 6**). Es wird jedoch mit Fernwärme beheizt und wirkt dadurch als Regenerator. Wasser verdunstet dabei aus der Salzlösung und wird an die Fortluft abgegeben.

Komponententest vor Wirtschaftlichkeit

Für den Test der Komponenten ist die Systemkonfiguration zwar vorteilhaft, die Anlagenkomponenten arbeiten aber unter ungünstigeren thermodynamischen Bedingungen. Konventionelle Kompressions- oder Absorptionskältemaschinen stellen kaltes Wasser kostengünstiger bereit. Der Anlagenaufbau kann deshalb unter wirtschaftlichen Aspekten nicht zum Nachbau empfohlen werden.

Auslegung

Die Kühllast des Jazzklubs wurde mit 20 kW abgeschätzt, bei einer Belegung mit 100 Personen und unter Berücksichtigung der Bühnenbeleuchtung. Die Auslegungsdaten der Anlage sind in **Abb. 7** angegeben. Die volle Kühlleistung wird ca. 20 Minuten nach dem Einschalten erreicht. Die Kühlanlage wird über die Gebäudelüftung rückgekühlt und kann nicht ohne diese betrieben werden. Dies ist keine Einschränkung, da der Jazzklub ebenfalls auf die Gebäudelüftung angewiesen ist.

Abb. 7: Auslegung des Kühlsystems

Absorber	
Luftvolumenstrom [m³/h]	4000
Kühlwasservolumenstrom [m³/h]	2,8
Solevolumenstrom [m³/h]	0,1
Luftfeuchte Eintritt / Austritt [g/kg]	12,0 / 5,7
Kühlwassertemperatur Eintritt / Austritt [°C]	21,4 / 28,4
Entfeuchtungsleistung bei 12 g/kg Eintrittsfeuchte [kW]	21
Indirekter Verdunstungskühler VK2	
Luftvolumenstrom [m³/h]	4000
Kühlwasservolumenstrom [m³/h]	2,6
Sprühwasservolumenstrom [m³/h]	0,5
Luftfeuchte Eintritt [g/kg]	5,6
Kühlwassertemperatur Eintritt / Austritt [°C]	19,7 / 14,4
Kühlleistung [kW]	16
acht Umluftkühler in Jazzklub und Küche	
Raumtemperatur [°C]	26
Luftvolumenstrom maximal 8 x 950 [m³/h]	7600
Wasservolumenstrom 8 x 0,325 [m³/h]	2,6
Kühlwassertemperatur am Eintritt / Austritt [°C]	14,4 / 19,7
Kühlleistung [kW]	16
Regenerator	
Luftvolumenstrom [m³/h]	1000
Heizwasservolumenstrom [m³/h]	2,8
Heizwassertemperatur Eintritt / Austritt [°C]	75 / 64
Regenerationsleistung [kW]	40
Speicher	
Speichervolumen verdünnte Lösung [m³]	1,4
Kühldauer bei 100% Kühlleistung [h]	9
Energiespeicherdichte [kWh/m³]	120

► Fazit

Die Klimatisierung mit flüssigen Sorptionsmitteln ist aufwendiger als mit Sorptionsrädern. Sie weist aber entscheidende Vorteile auf, die ihren Einsatz in vielen Fällen attraktiv macht: Sie erreicht höhere Gesamtwirkungsgrade und die benötigten Regenerationstemperaturen liegen niedriger. Weniger als 80 °C genügen für die Regeneration verbrauchter Lösung. Zu- und Abluftstrom sind vollständig entkoppelt, wodurch die Übertragung von Schadstoffen oder Gerüchen ausgeschlossen ist. Nicht zuletzt kann das System effizient und verlustfrei Klimatisierungsenergie speichern.

Bei der neu entwickelten Absorber-Regenerator-Einheit setzten die Forscher des ZAE Bayern bewusst auf preisgünstige Ausgangsmaterialien. Sie erreichten durch Low-Flow-Absorber eine deutlich höhere Speicherdichte als zuvor. Der signifikant höhere Verdünnungsgrad der Salzlösung im Anlagenbetrieb führt in der Praxis zu einer Energiedichte zwischen 120 und 150 kWh/m³, sie ist damit etwa doppelt so groß, wie die von Eisspeichern. In Laborversuchen werden sogar bis zu 200 kWh/m³ erreicht. Ein Folgeprojekt zielt darauf ab, die Energiespeicherdichte weiter zu erhöhen und die Herstellungskosten zu senken.

Die neue Technik wird in einem Münchner Jazzklub erprobt und sorgt dort, von Fernwärme angetrieben, für angenehme Raumtemperaturen. Aufgrund der baulichen Ausgangssituation konnten wesentliche Vorteile der sorptiven Klimatisierung nicht genutzt werden. So musste statt einer Klimatisierung über die Lüftung ein geschlossenes Kaltwassersystem mit Konvektionskühlern installiert werden. Daher findet keine Konditionierung der Luftfeuchte statt. Zudem arbeiten die Komponenten nicht mit dem Wirkungsgrad, der mit einem Zuluftsystem zu erreichen wäre. Dass sich die Anlage trotz dieser Erschwernisse bewährt hat, zeigt das Potenzial der Technologie auf. Sie hat sich mittlerweile als verlässlich erwiesen, sodass die Fernbedienung an die Betreiber ausgehändigt werden konnte. Die Anlage wird aber weiterhin vom ZAE Bayern betreut, um Erfahrungen über einen längeren Betriebszeitraum zu sammeln. Sie steht als Versuchsanlage für neue Austauschflächen für Absorber oder Verdunstungskühler zur Verfügung. Darüber hinaus dient sie als Demonstrationsobjekt für Architekten, Planer und potenzielle Anwender sowie als Exkursionsziel von Studenten.

Die von den Forschern entwickelte Low Flow-Technologie eignet sich mit ihrem hohen Entfeuchtungspotenzial insbesondere für tropische Klimazonen. Eine solar betriebene Anlage eines Industriepartners wurde 2006 erfolgreich in Singapur getestet. 2009 soll dort ein weiteres System, das Abwärme nutzt, in Betrieb gehen.

► PROJEKTADRESSEN

- Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.
ZAE Bayern
Eberhard Lävemann
Walther-Meissner-Straße 6
85748 Garching

► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

Literatur

- Hauer, A. (Bearb.); Lävemann, E. (Bearb.); Krönauer, A. (Bearb.) u. a. : Thermochemische Speicherung. Phase 4. Raumklimatisierung und Kältespeicherung mit offenen Sorptionssystemen. Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. ZAE Bayern, Garching, Abt. 1 Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien (Hrsg.) 2007. 57 S., FKZ 0329662C. Ausleihbar bei der TIB Hannover, Signatur F07B174, auch als pdf-download erhältlich unter: <http://edoks01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb07/524751838.pdf>

Internet

- www.zae-bayern.de

Abbildungsnachweis

- Abb. 1: Rainer Plöckl, Unterhaching
- Abb. 2, und 4 – 7: ZAE Bayern
- Hintergrundbild S. 4: Oskar Henn, München

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 (BMWi)
11019 Berlin

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Astrid Wille
52425 Jülich

- Förderkennzeichen
0329662C

IMPRESSUM

- ISSN
0937 – 8367

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

- Nachdruck
Nachdruck des Textes nur zulässig bei vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares; Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung der jeweils Berechtigten.

- 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 ist ein Service von FIZ Karlsruhe und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

Kontakt

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

Tel. 0228 92379-44

 **BINE**
Informationsdienst

FIZ Karlsruhe, Büro Bonn
Kaiserstraße 185 – 197
53113 Bonn

kontakt@bine.info
www.bine.info