

REDOX-FLOW-BATTERIEN

REDOX-FLOW-BATTERIEN

EINE EXPERTISE FÜR DIE SOLARINITIATIVE MÜNCHEN LAND (SIMLA)

Werner Weindorf

ENDBERICHT

15. Oktober 2020



ludwig bolkow
systemtechnik

www.lbst.de

R E P O R T

Haftungsausschluss

Der Mitarbeiterstab der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH hat diesen Bericht erstellt.

Die Sichtweisen und Schlüsse, die in diesem Bericht ausgedrückt werden, sind jene der Mitarbeiter der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Alle Angaben und Daten sind sorgfältig recherchiert. Allerdings gibt weder die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH noch irgendeiner ihrer Mitarbeiter, Vertragspartner oder Unterauftragnehmer irgendeine ausdrückliche oder implizierte Garantie oder übernimmt irgendeine rechtliche oder sonstige Verantwortung für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutzbarkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines enthaltenen Prozesses, oder versichert, dass deren Nutzung private Rechte nicht verletzen würden.

INHALT

ABBILDUNG	II
ABKÜRZUNGEN	III
ZUSAMMENFASSUNG	IV
1 GRUNDPRINZIP VON REDOX-FLOW-BATTERIESYSTEMEN	5
2 VANADIUM-REDOX-BATTERIEN (VRFB)	6
2.1 Technologie	6
2.2 Hersteller	7
3 REDOX-FLOW-BATTERIEN MIT ORGANISCHEM ELEKTROLYTEN	9
3.1 Technologie	9
3.2 Hersteller	9
4 ZINK-BROM-FLOW-BATTERIEN	10
4.1 Technologie	10
4.2 Hersteller	10
5 ANDERE BATTERIESYSTEME/ABGRENZUNG	12
6 LITERATUR	13



ABBILDUNG

Abbildung 1:	Aufbau Redox-Flow-Batterie.....	6
--------------	---------------------------------	---

Redox-Flow-Batterien
Report

ABKÜRZUNGEN

AC	Alternating current (Wechselstrom)
DC	Direct current (Gleichstrom)
VRFB	Vanadium-Redox-Flow-Batterie



ZUSAMMENFASSUNG

Redox-Flow-Batterien sind eine vielversprechende Option zur Speicherung von Strom über mehrere Stunden zur stationären Stromversorgung. Sie weisen eine hohe Lebensdauer auf und zwar sowohl von der Anzahl der Zyklen, als auch der kalendarischen Lebensdauer. Die Energie wird im Elektrolyten gespeichert, die Umwandlung erfolgt in den Batteriezellen. Redox-Flow-Batterien sind damit Speichersystemen auf Basis von Brennstoffzellen ähnlich. Redox-Flow-Batterien können zu 100% entladen werden, aber auch teilweises Be- und Entladen ist kein Problem. Einen Memory-Effekt gibt es nicht.

Ein weiterer Vorteil ist die hohe Sicherheit. Ein „Thermal run-away“ wie er bei Lithium-Ionen-Batterien vorkommen kann, ist ausgeschlossen.

Ein Nachteil ist die im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien niedrigere Energiespeicherdichte, die jedoch im stationären Bereich weniger von Bedeutung als bei Fahrzeugen.

Die meisten heute kommerziell angebotenen Redox-Flow-Batteriesysteme basieren auf Vanadium-Redox-Flow-Batterien (VRFB). Der Preis für den Vanadium basierten Elektrolyten ist jedoch relativ hoch. Daher wird unter anderem an organischen Elektrolyten auf Basis von Lignin gearbeitet. Redox-Flow-Batterien mit organischen Elektrolyten auf Basis von Lignin haben den Vorteil, dass keine kritischen Materialien benötigt werden. Die Rohstoffe sind umweltfreundlich und leicht verfügbar.

Redox-Flow-Batterien werden für den Einsatz im Multi-MW-Bereich angeboten, aber auch als Heimspeicher mit wenigen kW für Einfamilienhäuser. Ein Hersteller bietet Lösungen mit Redox-Flow-Batterien für Schnellladestation an, um Stromspitzen bei der Schnellladung von batterie-elektrischen Fahrzeugen zu kappen.

1 GRUNDPINZIP VON REDOX-FLOW-BATTERIESYSTEMEN

Bei einer Redox-Flow-Batterie wird die Energie in chemischen Verbindungen gespeichert. Zwei Elektrolyte zirkulieren in zwei getrennten Kreisläufen. Der Austausch der Ionen erfolgt über eine Ionenaustauscher-Membran (z.B. Nafion) in den Batteriezellen. Der Strom wird über Elektroden aus Kohlenstoff zu und abgeführt.

Die Energiespeicherkapazität hängt von der Größe der Tanks ab, in denen der Elektrolyt gespeichert wird. Die Leistung hängt von Größe der Batteriezellen ab. Im Gegensatz zu anderen Batteriesystemen können Energiespeicherkapazität und maximale Leistung unabhängig voneinander skaliert werden. Wie bei Speichersystemen auf Basis von Brennstoffzellen sind bei der Redox-Flow-Batterien Energiespeicherung und Energieumwandlung getrennt.

Die Redox-Flow-Batteriesystem unterscheiden sich in den verwendeten Elektrolyten. Geforscht wurde an einer Vielzahl von Redox-Paaren. Kommerziell verfügbar sind hauptsächlich Systeme mit Vanadium basierten Elektrolyten und organischen Elektrolyten.

Daneben wurden in der Vergangenheit von österreichischen Firma BlueSky Systeme auf Basis von Zink/Eisen angeboten [Khor et al. 2018]. Inzwischen setzt BlueSky auf die Natrium-Ionen-Batterien („Salzwasserbatterie“) [BlueSky 2020].

Die Anzahl der Zyklen und damit die Lebensdauer ist sehr hoch. Die kalendarische Lebensdauer ist im Gegensatz zu anderen Batteriesystemen wie zum Beispiel Lithium-Ionen-Batterien nicht begrenzt.

Redox-Flow-Batterien können zu 100% entladen und wieder aufgeladen werden, aber auch teilweises Be- und Entladen ist kein Problem. Einen Memory-Effekt gibt es auch nicht.

Ein weiterer Vorteil ist die im Vergleich zu Li-Ionen-Batteriesystem erheblich höhere Sicherheit. Es kann im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Batterien kein „Thermal run-away“ auftreten.

Der Nachteil liegt in der niedrigeren Energiespeicherdichte, was jedoch für stationäre Anwendungen weniger relevant ist als für mobile Anwendungen.

In den folgenden Kapiteln werden auch Hersteller von Redox-Flow-Batteriesystemen genannt. Zu beachten ist dabei, dass sich Besitzerverhältnisse und Firmennamen in sehr kurzen Abständen ändern. Auch kann es vorkommen, dass Hersteller auf eine andere Batterietechnologie umsteigen.

2 VANADIUM-REDOX-BATTERIEN (VRFB)

2.1 Technologie

Bei der Vanadium-Redox-Flow-Batterie (VRFB) werden Elektrolyte auf Basis von Vanadium verwendet. Es ist die heute am weitest verbreitete Redox-Flow-Batterie-Technologie.

Abbildung 1 zeigt den Aufbau einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie.

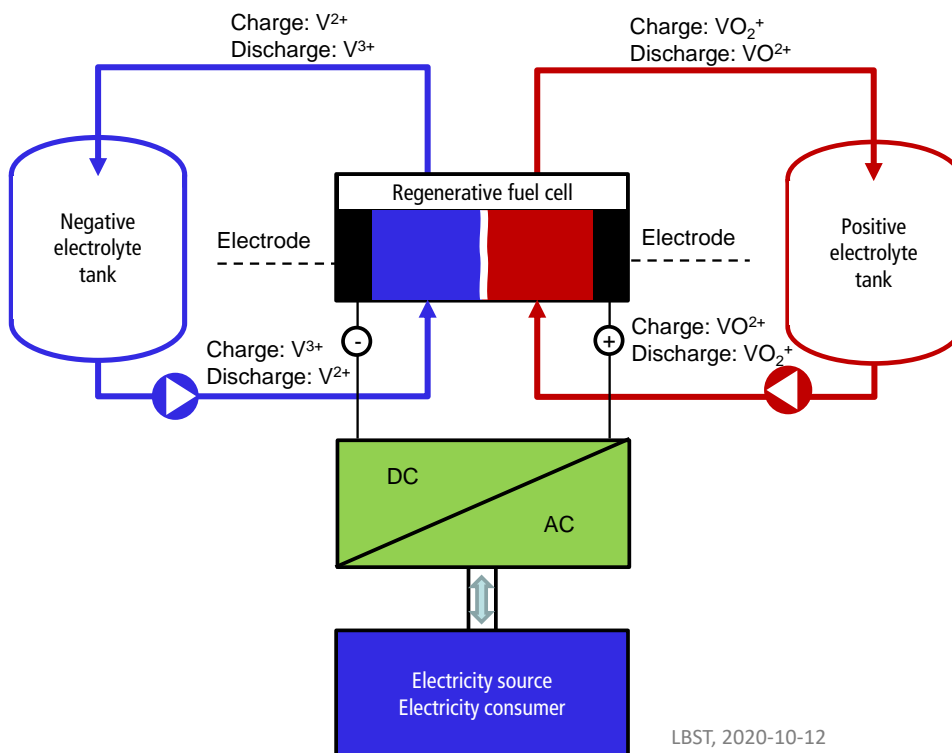
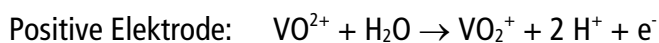
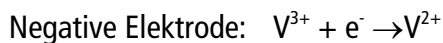


Abbildung 1: Aufbau Redox-Flow-Batterie

Beim Ladevorgang wird der Negative Elektrolyt von V^{3+} zu V^{2+} reduziert und der positive Elektrolyt von VO^{2+} zu VO_2^+ oxidiert.



Beim Entladen laufen die Reaktionen umkehrt ab.

Selbstentladung kann aufgrund der Permeation von Vanadium-Ionen in die umgekehrte Richtung auftreten. Werden VRFB überladen, kann es zur Bildung von Wasserstoff und

Sauerstoff an den Elektroden sowie zur Bildung von CO₂ durch Oxidation der Kohlenstoffelektroden kommen [KIM 2019].

Die Energiespeicherdichte von VRFB liegt zwischen 25 bis 35 Wh pro l Elektrolytflüssigkeit oder 30 bis 32 Wh pro kg Elektrolytflüssigkeit [Kim 2019]. Im Vergleich dazu weisen Lithium-Ionen-Batterien eine Energiespeicherdichte von etwa 100 bis 200 Wh pro kg (Gesamtsystem) auf.

Der Nachteil von VRFB sind die relativ hohen Kosten für das Vanadium. Bei hoher Marktdurchdringung von VRFB und großen Elektrolytmengen könnte es zu Problemen mit der Verfügbarkeit von Vanadium kommen (Häufigkeit von Vanadium in der Erdkruste mit etwa 0,01 Massenprozent vergleichbar mit Kupfer). Deshalb wird auch an Systemen mit organischen Elektrolyten gearbeitet (siehe Kapitel 3).

VRFB werden für den Einsatz als Heimspeicher mit wenigen kW Leistung und wenigen kWh Energiespeicherkapazität bis zu Großbatterien bis einigen MW Leistung und einigen MWh Energiespeicherkapazität angeboten. Die Batteriesysteme werden typischerweise für die Speicherung von Strom für 3 bis 9 Stunden ausgelegt. Die größte Vanadium-Redox-Flow-Batterie mit einer Leistung von 200 MW und einer Energiespeicherkapazität von 800 MWh wurde in China errichtet [Yang 2017].

2.2 Hersteller

Inzwischen gibt es verschiedene Hersteller von Vanadium-Rexo-Flow-Batterie-Systemen, davon einige in Österreich und Deutschland.

Beispiele:

Enerox (früher Gildemeister Energie Storage), Enerox GmbH, IZ NÖ-Süd, Straße 3, Obj. M36, 2355 Wr. Neudorf, Austria, <https://www.cellcube.com/>

- Leistung: 500 kW (CellCube FB 500-2000)
- Energiespeicherkapazität: 2000 kWh (CellCube FB 500-2000)
- Wirkungsgrad Laden: 94%
- Wirkungsgrad Entladen: 88%
- Lebensdauer: >20.000 Zyklen, >25 Jahre
- Anwendung: Industrie und Energieversorgungsunternehmen

SCHMID, Robert-Bosch-Str. 32-36, 72250 Freudenstadt, Germany, www.schmid-group.com

- Leistung Heimspeicher: 5 kW
- Energiespeicherkapazität Heimspeicher: Modelle mit 15 kWh (CS 5/15), 30 kWh (CS 5/30) oder 45 kWh (CS 5/45) verfügbar



- Masse Modell CS 5/15: 1550 kg
- Leistung Speicher für industrielle Anwendungen oder Energieversorgungsunternehmen: bis zu einigen MW
- Energiespeicherkapazität Speicher für industrielle Anwendungen oder Energieversorgungsunternehmen: bis zu einigen MWh
- Lebensdauer: ≥ 10.000 Zyklen, ≥ 20 Jahre

Vanadis Power, Westplein 12, 3016 BM Rotterdam, The Netherlands,
<https://www.vanadispower.com>

- Leistung: 10 kW bis 100 MW
- Energiespeicherkapazität: 4 h Nennleistung (typische Auslegung)
- Herstellung in China durch Rongke Power (Produktionskapazität 1 GW/a)

Volterion GmbH, Carlo-Schmid-Allee 3, 44263 Dortmund, Deutschland,
<https://www.volterion.com/>

- Leistung Heimspeicher: mit 2,5 kW, 5 kW und 10 kW (Dauerleistung)
- Energiespeicherkapazität Heimspeicher: 13 kWh
- Lebensdauer: ≥ 20.000 Zyklen
- Selbstentladung: 1% pro Jahr
- Masse Heimspeicher: 1500 kg
- Leistung Großbatterien bis Multi-MW-Bereich

VoltStorage GmbH, Gmunder Straße 37, 81379 München, <https://voltstorage.com>

- Leistung Heimspeicher: 1,5 kW
- Energiespeicherkapazität Heimspeicher: 6,2 kWh
- Lebensdauer: ≥ 10.000 Ladezyklen, ≥ 20 Jahre
- Wirkungsgrad Batterie (max.): 84,5%
- Wirkungsgrad Wechselrichter (max.): 94%
- Wirkungsgrad DC/AC: maximal 79,4%
- Preis Heimspeicher: 6999 € [Energie-Experten 2019]

3 REDOX-FLOW-BATTERIEN MIT ORGANISCHEM ELEKTROLYTEN

3.1 Technologie

Statt Vanadium-Verbindungen werden hier organische Elektrolyte verwendet, die aus Lignin erzeugt werden können.

Der Hersteller CMBlu Energie verwendet eine organische Verbindung auf Basis eines aromatischen Ringsystems für den negativen Elektrolyten (Negolyt). Als positiver Elektrolyt (Posolyt) wird eine organische Eisen-Komplexverbindung eingesetzt. Alle Rohstoffe sind leicht verfügbar. Die Elektroden enthalten keine metallhaltigen Katalysatoren und es werden keine giftigen Schwermetalle verwendet [CMBlu 2020].

Die Energiespeicherdichte liegt bei 28 Wh pro l Volumen (1000 kWh pro 35 m³).

3.2 Hersteller

CMBlu Energy AG, Industriestraße 19, 63755 Alzenau, Deutschland, <https://www.cmblu.de>

- Leistung: 500 bis 3500 kW
- Energiespeicherkapazität: 1000 bis 14.000 kWh
- Wirkungsgrad: etwa 90%
- Volumen: 35 bis 500 m³
- Flächenbedarf: 20 bis 180 m²
- Anwendungen: Vermeidung von hohen Lastspitzen an Schnellladestationen für batterieelektrische Fahrzeuge, Industrie, Netzstabilisierung, Quartierspeicher
- Kompatibel mit allen Schnellladestationen (50/135/350/500 kW pro Ladesäule)

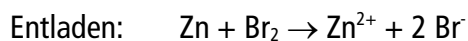
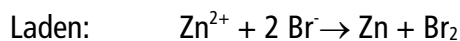


4 ZINK-BROM-FLOW-BATTERIEN

4.1 Technologie

Als Elektrolyt wird hier ein Redox-Paar bestehend aus Zink und Brom verwendet. Allerdings handelt es sich bei der Zink-Brom-Flow-Technologie nicht um eine Redox-Flow-Batterie im engeren Sinn, sondern um eine sogenannte Hybrid-Flow-Batterie. Die Hybrid-Flow-Batterie (HFB) nutzt ein Redox-Paar, das in einer Oxidationsstufe als Feststoff vorliegt [Winsberg et al. 2016]. Trotzdem wird sie manchmal im Zusammenhang mit Redox-Flow-Batteriesystemen beschrieben.

Bei der von Redflow entwickelten Technologie wird der Elektrolyt in zwei Tanks gespeichert. In einem Tank wird der Elektrolyt für die positive Elektrode gespeichert, der andere Tank dient zur Speicherung des Elektrolyten für die negative Elektrode. Beim Ladevorgang scheidet sich an der negativen Elektrode metallisches Zink ab. An der positiven Elektrode wird Bromid zu Brom umgesetzt. Das Brom wird in einer wässrigen Lösung im Tank gespeichert.



Beim Entladevorgang löst sich das metallische Zink wieder in der Elektrolytlösung und das Brom wird wieder zu Bromid. Nach Angaben des Herstellers soll es zu keiner Degradation der Energiespeicherkapazität kommen.

Die Energiespeicherdichte wird mit 30 bis 80 Wh pro kg Elektrolyt angegeben [Fischer et al. 2019] und damit höher als bei der VRFB.

4.2 Hersteller

Verschiedene Hersteller bieten Zink/Brom-Flow-Batterien an.

Beispiele:

Redflow, 27 Counihan Road, Seventeen Mile Rocks, Brisbane, QLD, 4073, Australia
<https://redflow.com/products/>

- Leistung Heimspeicher: 3 kW (Dauerleistung) bzw. 5 kW (Spitzenleistung)
- Energiespeicherkapazität Heimspeicher (Modell ZCell): 10 kWh
- Wirkungsgrad: 80% (DC/DC)¹
- Masse: 240 kg inklusive Elektrolyt

¹ Wird der Wirkungsgrad des Gleichrichters mit 95% und der Wirkungsgrad des Wechselrichters ebenfalls mit 95% angegeben, würde sich ein Zyklus-Wirkungsgrad von 72,2% ergeben

- Volumen Elektrolyt: 100 l
- Garantie: 10 Jahre
- Betriebstemperatur (Elektrolyt): 15 bis 50°C
- Energiespeicherkapazität Großbatterien (Modell ZBM2): 600 kWh

Primus Power, 3967 Trust Way, Hayward, CA 94545, USA,
<https://www.primuspowers.com/en/>

- Leistung (Modell EnergyPod 2 Flow Battery): 25 kW
- Energiespeicherkapazität (EnergyPod 2): 125 kWh
- Lebensdauer: ≥ 30.000 Zyklen, ≥ 20 Jahre
- Wirkungsgrad: 70% (nicht angegeben, ob AC/AC oder DC/DC)
- Metallische Elektroden



5 ANDERE BATTERIESYSTEME/ABGRENZUNG

Bei der Natrium-Ionen Batterie (Salzwasserbatterie) handelt es sich nicht um eine Redox-Flow-Batterie. Ein Hersteller von Heimspeichern auf Basis von Natrium-Ionen Batterie ist BlueSky aus Österreich [BlueSky 2020], der früher Redox-Flow-Batterien mit Elektrolyten auf Basis von Zink/Eisen angeboten hat.

Der Hersteller wirbt mit der Umweltverträglichkeit der eingesetzten Materialien und der im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien hohen Sicherheit (Nichtbrennbarkeit).

6 LITERATUR

- [BlueSky 2020] BlueSky Energie GmbH: GREENROCK Saltwater Battery; accessed 12 October 2020; https://www.bluesky-energy.eu/en/saltwater_battery/
- [CMBlu 2020] CMBlu Energie: Organic-Flow-Batterien: Stromspeicher für die Energiewende; White Paper, Mai 2020; https://www.cmblu.de/wp-content/uploads/2020/08/White-Paper-Organic_Flow_Batteries-2020-05.pdf
- [Energie-Experten 2019] Energie-Experten: Redox-Flow-Speicher SMART mit 6,8 kWh für 6.999 Euro erhältlich; 16. April 2019; <https://www.energie-experten.org/experte/meldung-anzeigen/news/redox-flow-speicher-smart-mit-68-kwh-fuer-6999-euro-erhaeltlich-4779.html>
- [Fischer et al. 2019] Fischer, P.; Noak, J.; Tübke, J.: Electrical Storage and Generation with Redox-Flow-Batteries and Fuel Cells and their Integration in different Microgrids; 8 March 2019
- [Khor 2018] Khor, A., C.; Flox, V.; Mohamed, M., R.; Xu, Q.: Review of zinc-based hybrid flow batteries: From fundamentals to applications; Materials Today Energy 8 (2018) 80-108, <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2017.12.012>
- [Kim 2019] Kim, S.: Vanadium Redox Flow Batteries: Electrochemical Engineering; 3 April 2019; DOI: 10.5772/intechopen.85166; <https://www.intechopen.com/books/energy-storage-devices/vanadium-redox-flow-batteries-electrochemical-engineering>
- [Winsberg et al. 2016] Winsberg, J.; Hagemann, T.; Janoschka, T.; Hager, M., D.; Schubert, U., S.: Redox-Flow-Batterien: von metallbasierten zu organischen Aktivmaterialien; Angew. Chem. 2016, 128, 2-30; DOI: 10.1002/ange.201604925
- [Yang 2017] Yang, Z., G.: It's Big and Long-Lived, and It Won't Catch Fire: The Vanadium Redox-Flow Battery; IEEE Spectrum, 16 October 2017; <https://spectrum.ieee.org/green-tech/fuel-cells/its-big-and-lonlived-and-it-wont-catch-fire-the-vanadium-redoxflow-battery>

LUDWIG-BÖLKOW-SYSTEMTECHNIK GMBH

Die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) ist ein Beratungsunternehmen für nachhaltige Energieversorgung und Mobilität. Mit unserer Expertise in Technologien, Märkten und Politik unterstützen wir internationale Kunden aus Industrie, Finanzsektor, Politik und Verbänden bei Fragen zu Strategien, Machbarkeit und Märkten. Acht DAX-Unternehmen vertrauen den zuverlässigen Einschätzungen der LBST zu neuen Entwicklungen in den Bereichen Energiewirtschaft und Mobilität.

Über drei Jahrzehnte kontinuierlicher Erfahrung des interdisziplinären Teams renommierter Experten bilden die Basis der umfassenden Kompetenz der LBST.

Die LBST bietet ihren Kunden:

SYSTEM- UND TECHNOLOGIESTUDIEN	Technologiebewertung und Due Diligence; Energie- und Infrastrukturkonzepte; Machbarkeitsstudien;
STRATEGIEBERATUNG	Produktportfolioanalysen, Identifizierung neuer Produkte und Dienstleistungen; Marktanalysen; politische Analysen;
NACHHALTIGKEITSBERATUNG	Lebenszyklus-Analysen; Carbon Footprint Analysen; Bewertung natürlicher Ressourcen (Energie, Mineralien, Wasser); Nachhaltigkeitsbewertung;
KOORDINATION	Projektmanagement, -begleitung und -bewertung;
ENTSCHEIDUNGSVORBEREITUNG	Studien, Briefings, Expertenkreise, Trainings.

Besondere Arbeitsschwerpunkte liegen in den Bereichen Energie (erneuerbare Energie, Energiespeicherung, Wasserstoff und Brennstoffzellen) und Verkehr (Kraftstoffe und Antriebe, Infrastruktur, Mobilitätskonzepte), sowie bei umfassenden Nachhaltigkeitsanalysen.

Ein konsequenter Systemansatz ist Kennzeichen aller Arbeiten. Nur dadurch, dass wirklich alle relevanten Elemente einer vernetzten Welt berücksichtigt werden, können wir unseren Kunden eine vollständige Grundlage für ihre Entscheidungen geben.

Mit ihrem tiefen Verständnis gesellschaftlicher und technologischer Entwicklungen sowie ihrer Unabhängigkeit hilft die LBST ihren Kunden mit objektiven und fundierten Informationen bei nachhaltigen Entscheidungen zur Sicherung ihrer Zukunft.

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH

Daimlerstr. 15 · 85521 Ottobrunn

Telefon +49 89 6081100 · Fax +49 89 6099731

Email: info@lbst.de · Web: <http://www.lbst.de>

