



Zukunftsfähige Energiekonzepte für Strom und Wärme

Teil 1: Die Kombination von BHKW und Wärmepumpe

Stand heute stehen viele unterschiedliche Technologien zur Verfügung, um die Energiewende positiv zu gestalten. Kommt es zu einer Verknüpfung, so können die entsprechenden Stärken weiter hervorgehoben und die Schwächen kompensiert werden. Ziel sollte es sein, das Dreieck aus Versorgungssicherheit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit zu erfüllen. Am Beispiel der Symbiose von BHKW und Wärmepumpe kann dies mit einer optimierten Fahrweise, unter Einbezug von Wetterdaten, Bedarf und Marktsignalen in der Praxis umgesetzt werden.

Grundlagen Kraft-Wärme-Kopplung

Aus einem Kraftwerksprozess zur Stromerzeugung kann Wärme z. B. zur Bereitstellung für eine Fernwärmeversorgung ausgekoppelt werden. Hierzu wird ein Teil des Dampfes in einen Heizkondensator geleitet, wo er seine Wärmeenergie an ein Heizwassernetz abgibt, anstatt über einen Kühlturm an die Umgebung. Unter dem Begriff Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird die gleichzeitige Gewinnung von

elektrischem Strom und Wärme für Heizzwecke verstanden. Gegenüber der konventionellen Stromerzeugung in einem Kraftwerk und der Wärme eines Heizkessels sparen KWK-Anlagen bis zu 40% Primärenergie und es entsteht deutlich weniger Kohlendioxid (CO₂). Hinzu kommt, dass dezentrale KWK-Anlagen Wärme und Strom dort erzeugen, wo sie benötigt werden. Sie müssen nicht aufwendig von A nach B geleitet werden.

Die kombinierte Strom- und Nutzwärmeherstellung gilt vor diesem Hintergrund als eine der wirksamsten Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Senkung der CO₂-Emissionen. Moderne KWK-Systeme ersetzen perspektivisch Kohle-KWK-Kraftwerke, sichern die Strom- und Wärmeversorgung ab und unterstützen durch eine flexible und systemdienliche Fahrweise die Integration der erneuerbaren Energien.



Bild: www.nq-anlagentechnik.de/maschinenraum-mr-200l

Bild 1: Gegenüberstellung zentraler Stromerzeugung ohne Wärmeausnutzung zu dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung mit Nutzung von Wärme und Strom.

Bild 1 zeigt eine Gegenüberstellung von konventionellen Großkraftwerken (zentral) und einer dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung.

Kennzahlen bei Kraft-Wärme-Kopplung

Um ein KWK System bewerten zu können, sind Kennzahlen unabdinglich. Wichtige Kenndaten zur Beschreibung der Energieausnutzung der Kraft-Wärme-Kopplung sind folgende:

Stromkennzahl

$$\sigma = \frac{P_{el}}{Q_N}$$

Stromausbeute

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{Q_B}$$

Über die Stromausbeute/elektrischen Wirkungsgrad kann dann der Gasverbrauch ermittelt werden.

Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{Q_N}{Q_B}$$

Gesamtwirkungsgrad

$$\eta_{ges} = \frac{P_{el} + Q_N}{Q_B}$$

P_{el} elektrische Arbeit
 Q_B Primärenergie
 Q_N Nutzwärme

Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus dem Wirkungsgrad der elektrischen und der thermischen Energieerzeugung zusammen. Dabei wird die genutzte Ener-

gie aus dem Gas in Relation zur erzeugten Energie gesetzt.

Unterscheidungsmerkmale von Blockheizkraftwerken

Unter Blockheizkraftwerken (BHKW)/Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) versteht man Anlagen, die mittels Verbrennungsmotoren gleichzeitig Strom und Wärme erzeugen, Aufbau siehe Bild 2. Die Stärke ist die Koppelproduktion von Strom und Wärme und damit die Verbesserung des thermodynamischen Prozesses. Blockheizkraftwerke wurden oftmals durch Heizkessel ergänzt, die die Spitzenwärmelast erzeugen. Neuerdings findet eine Kombination von Wärmepumpe in Kombination mit einem BHKW Anwendung; die Fahrweise wird entspre-

chend angepasst. Bei standardisierter Ausführung sind 90 °C Vorlauftemperatur möglich. Bei Einsatz von alternativen Wärmetauschern, Heißwasser mit Hochdruck, Heißdampf oder Thermalölen sind auch Temperaturen bis zu 200 °C erreichbar. Dieses Temperaturniveau ist ausreichend, um einen Großteil der Industrieprozesse in Deutschland zu realisieren.

Der Entwurf der VDI 4646 „Anwendung von Großwärmepumpen“ gibt Auskunft über typische Temperaturbereiche für die Sektoren Lebensmittel und Getränke, Holz, Textilien, Metalle, Chemie und Pharma sowie Automobilindustrie.

Wasserstoff auf dem Vormarsch

Als typische Brennstoffe für BHKW dienen Erdgas, Heizöl und alternative Brenn-

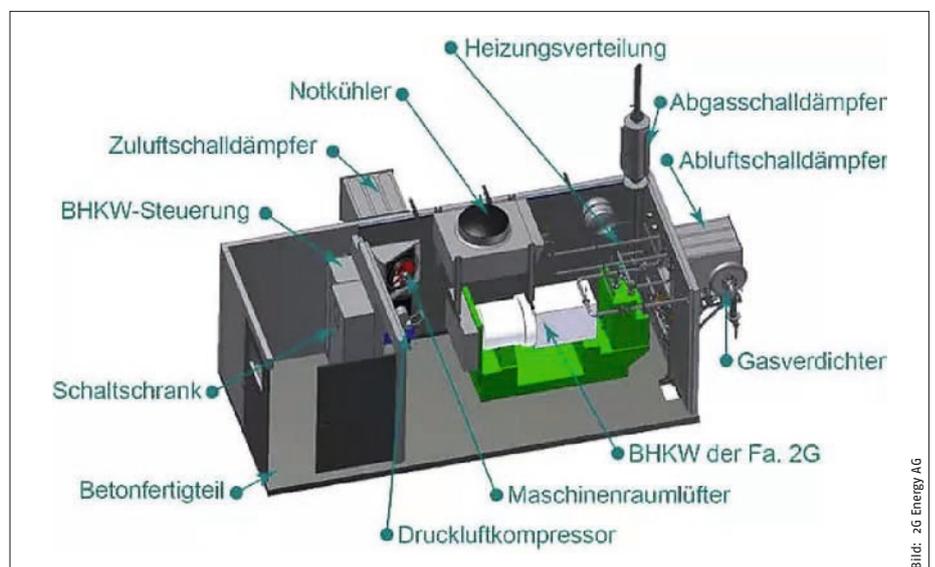


Bild: 2G Energy AG

Bild 2: Aufbau eines BHKW Maschinenraums mit Abgasanlage.

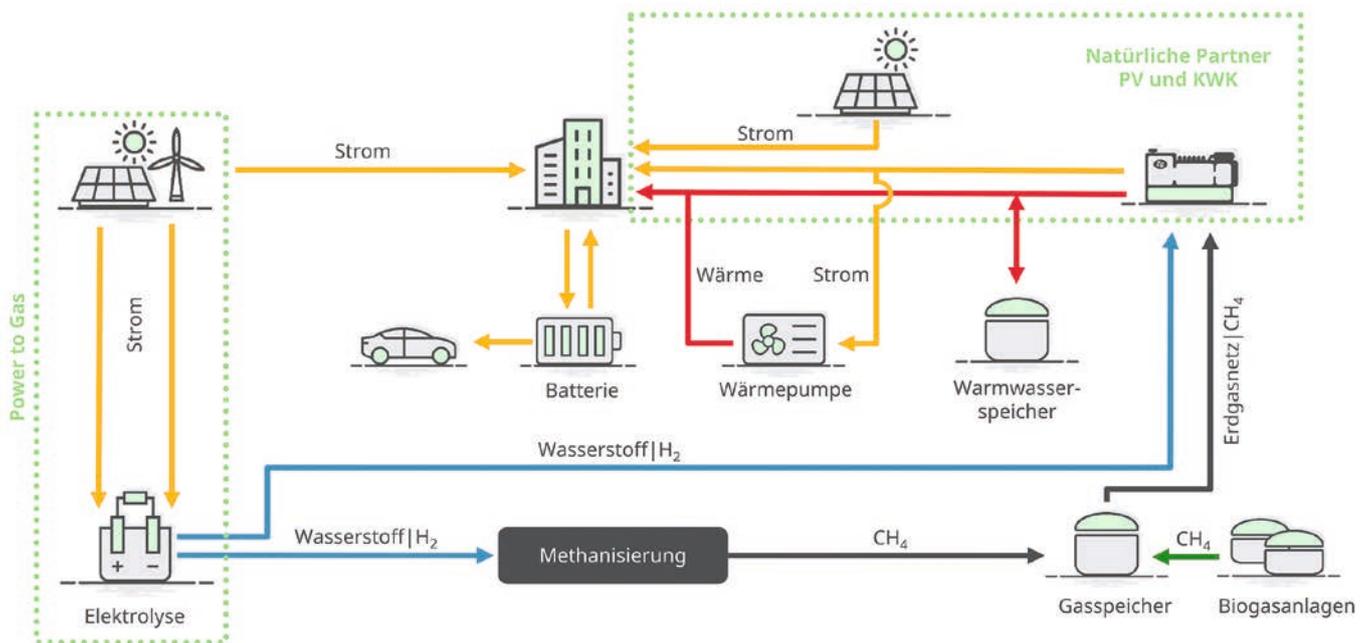


Bild: ZG Energy AG

Bild 3: Zukunftsfähige, resiliente Sektorenkopplung.

stoffe wie Biogas, Klärgas oder Deponiegas. Aufgrund des Wandels in der Energie- und Umweltpolitik sind zukunftsfähige BHKW wasserstoff-fähig (H_2). Anlagen im Bestand können oftmals bereits bis zu einem Anteil von 40% mit Wasserstoff in der Standard-Erdgaskonfiguration betrieben werden. Für den Betrieb mit 100% Wasserstoff ist bei führenden Herstellern eine Umrüstung mit geringem Zeitaufwand und einer Investition von ca. 10 bis 15% des Modulpreises möglich. Die mit grünem Wasserstoff erzeugte Wärme und der Strom werden als regenerativ angesehen.

Im Rahmen der fortschreitenden Energiewende ruhen große Hoffnungen auf Wasserstoff als komplett klimaneutralem Energieträger. Dieser wird zum Beispiel aus überschüssigem Wind- und Sonnenstrom gewonnen oder muss importiert werden. Am 24. 7. 2024 hat die Bundesregierung die „Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate“ veröffentlicht¹⁾. Nur einen Tag davor legten die

Fernleitungsnetzbetreiber Gas (FNB Gas) der Bundesregierung Pläne für den Aufbau eines Wasserstoff-Kernnetzes vor. Bis 2032 sollen Verbrauchs- und Erzeugungsschwerpunkte, Speicher und Importpunkte miteinander verbunden sein. Die Investitionssumme hierfür wird mit knapp 20 Mrd. Euro angegeben.

Betreiber wären durchaus bereit den Mehrpreis für (noch) teuren Wasserstoff zu zahlen. Allerdings müsste dann das Strommarktdesign entsprechend ausgestaltet werden, dass diese gesicherte Leistung auch gewürdigt wird. Die aktuellen Rahmenbedingungen des EEG bzw. KWKG lassen eine Wirtschaftlichkeit (noch) nicht darstellen. Stattdessen konzentriert sich die Politik auf die Ausschreibung von großen Kraftwerken. Diese Strategie gilt es aus Sicht des Autors zu überdenken, da viele kleinere bis mittlere dezentrale KWK-Anlagen, durch Wirtschaftsunternehmen investiert und betrieben, eine bessere Lösung sein könnten. Laut Branchenauskunft ist ein Zubau von 6 GW jährlich möglich, eine Entlastung des Stromnetzes wäre die Folge.

Wie eine resiliente Sektorenkopplung mit Wasserstoff in der Zukunft aussehen könnte, zeigt Bild 3.

Einteilung nach elektrischer Leistung

Je nach elektrischer Leistung können KWK-Anlagen allgemein wie folgt unterteilt werden (diese Eingruppierung kann von Unternehmen zu Unternehmen schwanken):

- Mikro-KWK (< 2kW_{el})
- Mini-KWK (2 bis 50 kW_{el})
- Klein-KWK (50 kW_{el} bis 2 MW_{el})
- Groß-KWK (ab 2 MW_{el}).

Wichtige Einsatzgebiete der Strom- und Wärme produzierenden Anlagen sind die Versorgung von Krankenhäusern, Industrie- und Gewerbebetrieben - und hier insbesondere die Leistungsklasse von 50 kW_{el} bis 3 MW_{el}. Aber auch in Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie Kleingewerbe werden die Anlagen zusammen mit Wärmepumpen verbaut. Der zweite Teil dieser Artikelserie beschäftigt sich damit in der Tiefe.

KWK-Anlagen sind besonders sinnvoll, wo Strom und Wärme gleichzeitig gefragt sind und die weitgehende Eigennutzung der von den KWK-Anlagen abgegebenen Energien gewährleistet ist. Aufgrund der neuen Strommarktsituation und dem Ausbau von Wärmenetzen ändert sich diese Ausrichtung hin zum zusätzlichen Ver-

¹⁾ Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate, www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/importstrategie-wasserstoff.pdf?__blob=publicationFile&v=12

kauf des Stroms bei hoher Nachfrage. Mit der kommunalen Wärmeplanung rücken BHKW in Kombination mit Wärmepumpen immer mehr in den Fokus, da hiermit gegenüber herkömmlichen Gaskesseln eine Dekarbonisierung erreicht werden kann.

Motorenkonfiguration – Fokus auf elektrischen oder thermischen Wirkungsgrad

Das Herz der KWK-Module ist der Motor samt mechanischem Antrieb und der Generator zur Stromerzeugung. Als Motoren sind häufig der turboaufgeladene Magermotor und der schwachaufgeladene Lambda-1-Motor vorzufinden. Jede Bauart hat ihre Stärken. Der Turbomotor hat einen höheren elektrischen Wirkungsgrad, somit kann ein höherer Anteil el/th erzielt werden. Allerdings erfordert diese Bauart in der Regel eine Abgasnachbehandlung (SCR-Katalysator), um die

Stickoxide in Stickstoff und Wasser umzuwandeln. Für die Umsetzung dieser selektiven katalytischen Reduktion erhöhen sich die Investitionskosten des Aggregates. Im Gegensatz hierzu ist beim Lambda-1-Motor ein höherer thermischer Wirkungsgrad festzustellen. Durch die Installation eines 3-Wege-Mischers wird das im Verbrennungsprozess anfallende CO/NO_x-Gemisch neutralisiert. Eine saubere Verbrennung ist die Folge.

Bei größeren Motoren wird der elektrische Wirkungsgrad tendenziell ebenfalls größer. Dies liegt darin begründet, dass die vorhandene Reibleistung bei der Verbrennung im Motor bei kleineren Motoren relativ gesehen stärker durchschlägt als bei Motoren mit größeren Brennräumen (Hubräumen). Die Auswahl des passenden Motors ist daher in hohem Maße abhängig vom Anwendungsfall und welches Betriebskonzept (technisch, betriebswirtschaftlich) dahintersteckt. Entsprechend

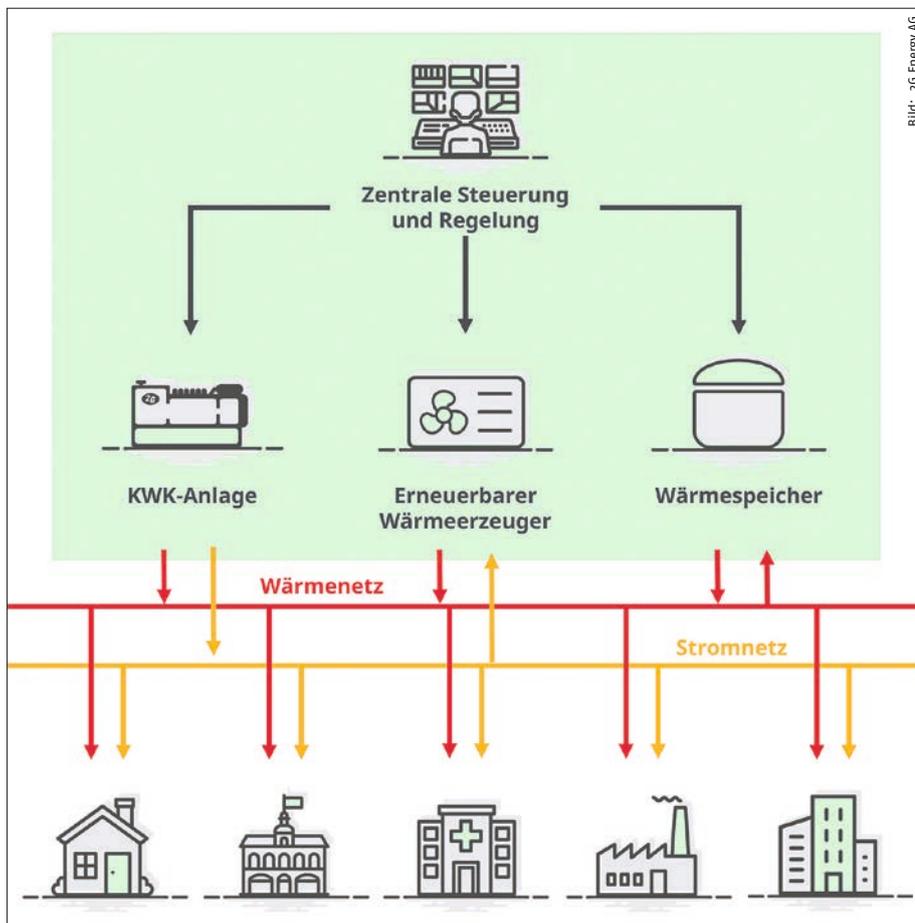


Bild 4: Elektrische und thermische Energieflüsse einer zukunftsfähigen KWK – Wärmepumpen-Energiezentrale.

ist der Betreiber gefordert, den Planer bzw. Hersteller schon bei der Projektplanung zu involvieren und mit den notwendigen Informationen zu versorgen.

Die Motorwärme wird über einen Kühlwasserwärmetauscher und anschließend einen Abgaswärmetauscher an den Heizkreislauf übertragen. Das erwärmte Wasser kann für Heizzwecke, aber auch für Trocknung, Dampferzeugung, Lufterwärmung, Antrieb von Absorptionskältemaschinen u. A. eingesetzt werden.

Vom Dauerläufer zum Sprinter – die optimierte Fahrweise

Ein BHKW ist ein Arbeitstier und kann die Grundlastdeckung übernehmen. Jährliche Laufzeiten von > 5000 Stunden sind dabei keine Seltenheit. Ähnlich einem PKW mit Verbrennungsmotor sind auch beim BHKW feste Wartungsintervalle mit vorgeschriebenen Servicearbeiten einzuhalten. Je nach Motor sind Wartungsintervalle etwa alle 2000 Betriebsstunden durchzuführen. Bei regelmäßiger Wartung erzielen BHKW-Motoren eine Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren.

Unter Bezug auf die aktuelle Situation, betreffend der Zeiten reduzierter Stromerzeugung, volatiler Strompreise und geänderter Förderbedingungen, u. a. durch das KWKG 2023, wird jedoch eine andere Fahrweise empfohlen. Um diese optimierte Fahrweise umzusetzen, ist eine Gesamtbetrachtung der Energiezentrale notwendig. Als weiterer Wärmeerzeuger wird hier, nicht wie oft in der Vergangenheit ein Gaskessel, sondern eine effiziente Großwärmepumpe eingesetzt. Laut GEG ist jede kWh erzeugte Wärme durch eine Wärmepumpe als 100% regenerativ anzusehen. Dies ist ein wichtiges Bauteil um die Dekarbonisierungsziele der Unternehmen um zu setzen. Eine zukunftsfähiges KWK-Wärmepumpen-Konzept besteht somit aus einer KWK-Anlage, einer Wärmepumpe, einem ausreichend groß dimensionierten thermischen Pufferspeicher und einer übergeordneten Regelung. Diese Komponenten laden und entladen dann optimiert das Wärme- und Stromnetz, siehe Bild 4.

Bei dieser Komponentenkonstellation wird empfohlen, das BHKW nicht mehr

wärmegeführt, sondern Strommarkt geführt zu betreiben. Die Betriebszeiten passen sich flexibel an den Bedarf und somit an die Marktpreise von Strom an. Steht ausreichend Strom im Netz zur Verfügung, so wird der Wärmebedarf über die Wärmepumpe erbracht, der notwendige Strom wird zugekauft. Das anderslautende Szenario ist, aufgrund hoher Nachfrage bzw. hoher Strom-Erzeugungskosten, dass dann das Blockheizkraftwerk Strom und Wärme erzeugt. Der Begriff Residuallast beschreibt den Teil des Stromverbrauchs in Deutschland, der nach Abzug der Einspeisung von fluktuierenden Erneuerbaren Energien ins Stromnetz übrig ist. Es geht also um den Restbedarf an Strom, der nicht durch Wind- und Solarenergie abgedeckt werden kann. Durch den Betrieb dezentraler BHKW findet eine Reduzierung dieser Residuallast statt.

Die Anforderungen an die Regelung derartiger Energiekonzepte sind allerdings sehr hoch: Mit PV-Anlage, Wärmepumpe, Speicherlösungen und weiter möglichen Erzeugern sind zunehmend mehr Komponenten zu integrieren. Gleichzeitig hat eine netzdienliche Steuerung der Gesamtanlage Priorität. Die Fahrweise ist vorausschauend auf Netz- und Marktsignale zu optimieren, dies ist nur durch eine Vernetzung möglich. Durch die Implementierung von KI kann davon ausgegangen werden, dass die Prozesse durch akkurate Datenverarbeitung von Wetter, Bedarf und Marktpreisen kontinuierlich verbessert werden.

Überdimensionierte Pufferspeicher bei der Wärmequelle und Wärmesenke

Beim Betrieb eines BHKW fällt Abwärme auf niedrigem Temperaturniveau ab. Diese Abwärme wurde in der Vergangenheit oft über Tischrückkühler oder Kühltürme an die Umwelt abgegeben. Neue, energieoptimierte Konzepte sehen vor, diese Wärme in einem Solewärmespeicher als Wärmequelle zu nutzen. Je nach Projektierung steht somit ein konstantes Temperaturniveau von 20 bis 30°C zur Verfügung, das mit Hilfe einer Hochtemperatur-Wärmepumpe auf ein Niveau von bis zu 90°C gehoben werden kann. Bei der Wahl des Käl-

temittels ist neben den ökonomischen und ökologischen Aspekten unbedingt das Betriebsfenster mit den maximalen Verflüssigungstemperaturen zu betrachten. Auf der Abnehmerseite ist ein überdimensionierter Pufferspeicher zu installieren, dadurch ist eine zeitliche Kompensation zwischen Erzeugung und Abnahme möglich, Spitzen im Bedarf können geglättet werden. Die Dimensionierung des Pufferspeichers soll eine Deckung des Wärmebedarfs über acht Stunden gewährleisten.

Wie genau die Leistungskombination aus Wärmepumpe und BHKW aussieht, ist in hohem Maße abhängig von den Stromerlöspotenzialen auf der einen sowie Höhe und Verlauf des Wärmebedarfs auf der anderen Seite. Besonders im Hinblick auf das BHKW gibt es zwei grundsätzlich mögliche Varianten, nach denen die Auslegung erfolgen kann: Der Kunde integriert ein eher kleineres BHKW, wodurch sich die Investitions- und Genehmigungskosten reduzieren lassen – allerdings nur wenig Erlöspotential am Strommarkt besteht. Auf der anderen Seite steht die Installation eines größeren, teureren BHKW mit größerem Wärmespeicher und erhöhten Genehmigungspflichten – aber auch deutlich höheren Potenzialen bei der Stromvermarktung. Hier gilt es, jedes Projekt individuell und sorgfältig zu kalkulieren und entsprechend auszuliegen.

Ausblick: Im zweiten Teil dieser Serie beleuchten wir die Grundlagen und Fördermöglichkeiten sowie den Einsatz von Hybridlösungen speziell im kleineren und mittleren Leistungsbereich: ◀

Autor:
Dipl. Ing. (FH) Lars Keller, Fachautor,
Referent VDI 4645 Wärmepumpenanlagen