



Im Forschungsprojekt SysMMO werden innovative Vermarktungsstrategien für Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen entwickelt und getestet

Quelle: KI-generiert mit ChatGPT

Großwärmepumpen flexibel betreiben: Welche Potenziale bietet die Multi-Market-Optimierung?

Der Ausbau von Fernwärme und Großwärmepumpen erfordert flexible Betriebskonzepte. Im Forschungsprojekt SysMMO wird untersucht, wie eine Multi-Market-Optimierung über Day-Ahead-, Intraday- und Regelleistungsmarkt zusätzliche Erlöspotenziale erschließt und Wärmepumpen system- und netzdienlich integriert.

Getrieben durch das Wärmeplanungsgesetz, die Pflicht zur kommunalen Wärmeplanung sowie steigende Gas- und CO₂-Preise rückt der Einsatz von Großwärmepumpen (GWP) in Fernwärmenetzen zunehmend in den Fokus. Diese Entwicklung schafft neue Marktchancen, stellt Anlagenbetreiber jedoch zugleich vor die Herausforderung, die Flexibilität dieser strombasierten Wärmeerzeuger wirtschaftlich und systemdienlich zu vermarkten. Im

Forschungsprojekt SysMMO (FKZ 03EN3123A/B/C) entwickeln die Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, die VK Energie GmbH und die Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) Multi-Market-Vermarktungsstrategien für GWP und erproben diese im Pilotbetrieb. Ziel ist eine globale Optimierung über alle relevanten Strommarktsegmente hinweg, um Flexibilität markt-, system- und netzdienlich bereitzustellen. Im Folgenden werden die Ergeb-

nisse der ersten Projektphase – der Markt- und Umfeldanalyse – zusammengefasst.

Ausbau von Fernwärme und Großwärmepumpen

Aktuelle Studien prognostizieren einen deutlichen Anstieg der Fernwärmeerzeugung in Deutschland. Die Prognos-Studie „Perspektive der Fernwärme“ und die Langfristszenarien von Fraunhofer ISI und

Consentec erwarten gegenüber 2020 ein Wachstum der Fernwärmeerzeugung zwischen 20 bis 30 % bis 2030 und rd. 50 % bis 2045 [1;2]. Im Jahr 2045 würde die Fernwärmeerzeugung je nach Szenario um die 180 TWh/a erreichen. Noch deutlicher fällt die Dynamik bei den GWP aus: Die Prognos-Studie prognostiziert 17 TWh(th)/a aus GWP im Jahr 2030 und 69 TWh(th)/a im Jahr 2045, die Langfristszenarien sogar um die 90 bzw. rd. 130 TWh(th)/a [1;2]. Ausgehend von rd. 210 MW(th) installierter Leistung im Jahr 2025 ergeben sich jährliche Zubauraten zwischen 1,16 und 15 GW(th) – ein historisch beispielloser Markthochlauf, der in den Studien zwar unterschiedlich ausgeprägt, in seiner Größenordnung jedoch übereinstimmend prognostiziert wird (Bild 1) [1;3].

Aktueller Stand des Anlagenbetriebs

GWP werden heute überwiegend wärmegeführt betrieben. Die Einsatzplanung orientiert sich vorrangig an der Lastsituation im Wär-

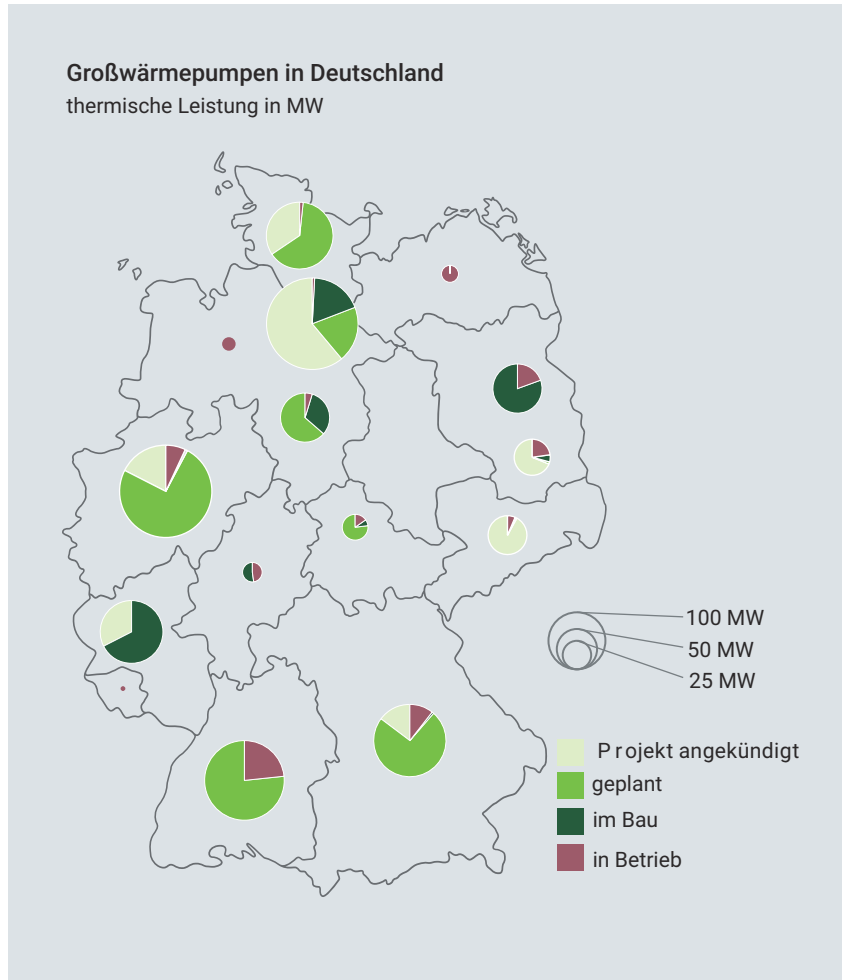


Bild 1. Angekündigte, geplante sowie im Bau und Betrieb befindliche Großwärmepumpen in Deutschland nach Bundesländern

Quelle: eigene Darstellung FfE nach [3]

Anzeige

Das Beste aus zwei Welten

KWK und Wärmepumpe im perfekten Zusammenspiel

- ✓ Wirtschaftlich
- ✓ Versorgungssicher
- ✓ Umweltfreundlich



Alles aus einer Hand:
Planung, Installation,
Instandhaltung
und Service



Weitere Infos
finden Sie auf
unserer Website



menetz, während Strompreise, Netzengpässe oder systemische Flexibilitätsanforderungen häufig nicht explizit berücksichtigt werden. Diese Fahrweise sichert zwar die Wärmeversorgung, lässt aber wirtschaftliche und systemdienliche Potenziale ungenutzt. Innova-

tive Fernwärmenetzbetreiber ergänzen den wärmegeführten Betrieb bereits um eine Day-Ahead-getriebene Optimierung für den Folgetag, beschränken sich dabei jedoch meist auf dieses einzelne Marktsegment. Kurzfristige Intraday-Preissignale, Anforderungen aus

dem Regelleistungsmarkt oder netzseitige Restriktionen bleiben dabei unberücksichtigt.

Vor diesem Hintergrund übernimmt VK Energie eine zentrale Rolle als Dienstleister für Anlagenbetreiber: Das Unternehmen unterstützt Betreiber von Erzeugungs-

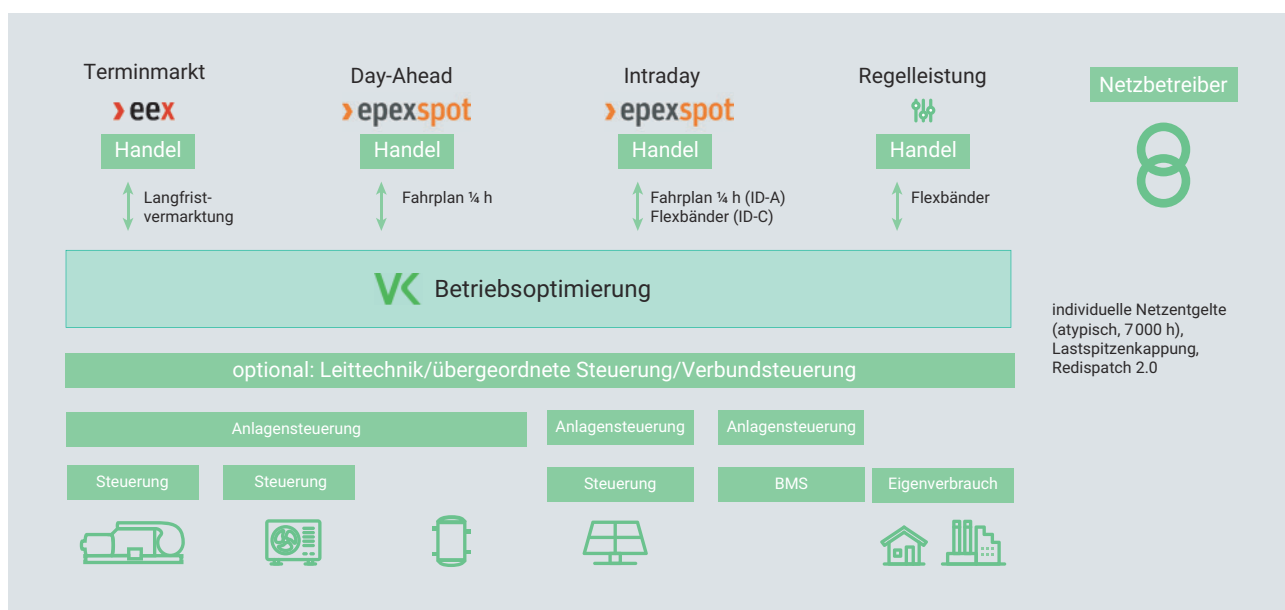


Bild 2. Schaubild der VK-Betriebsoptimierung mit den eingehenden Marktsegmenten und benötigten Steuerelementen

Quelle: VK Energie

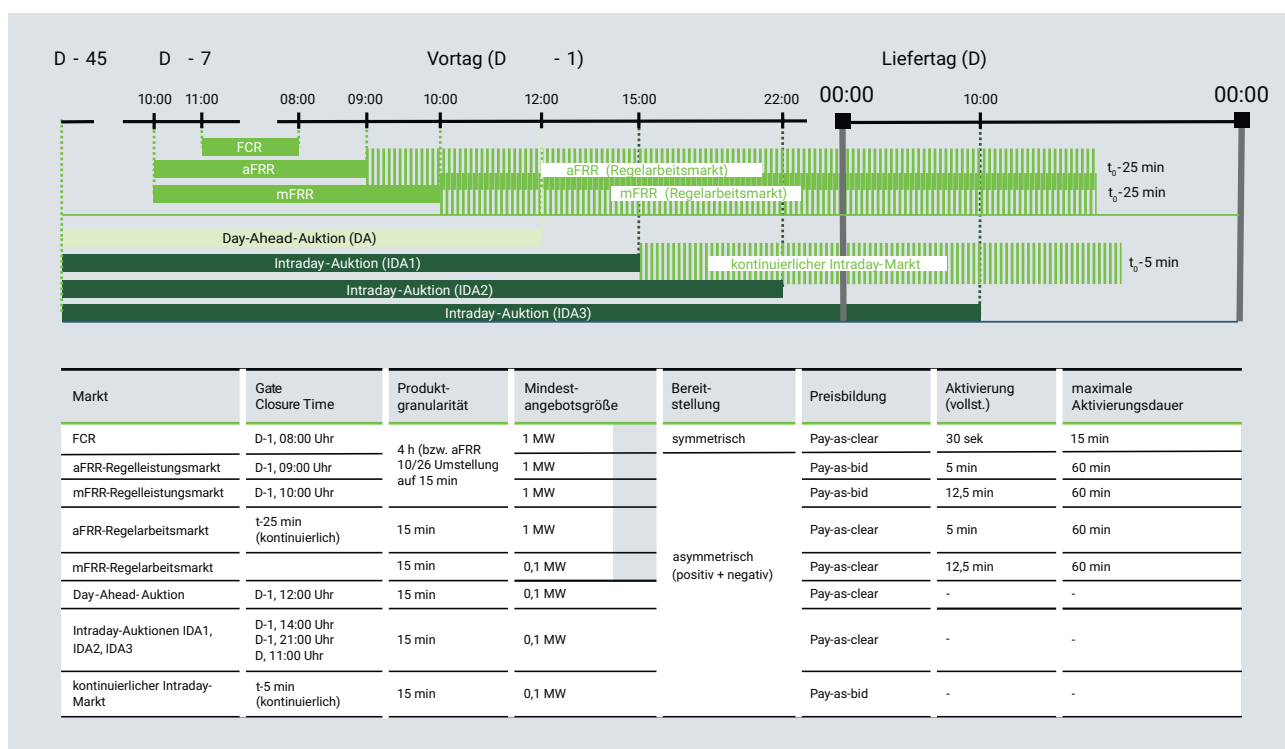


Bild 3. Gate-Closure-Timeline und Anforderungen der Spot- und Regelleistungsmärkte Quelle: eigene Darstellung FfE nach [4;5]

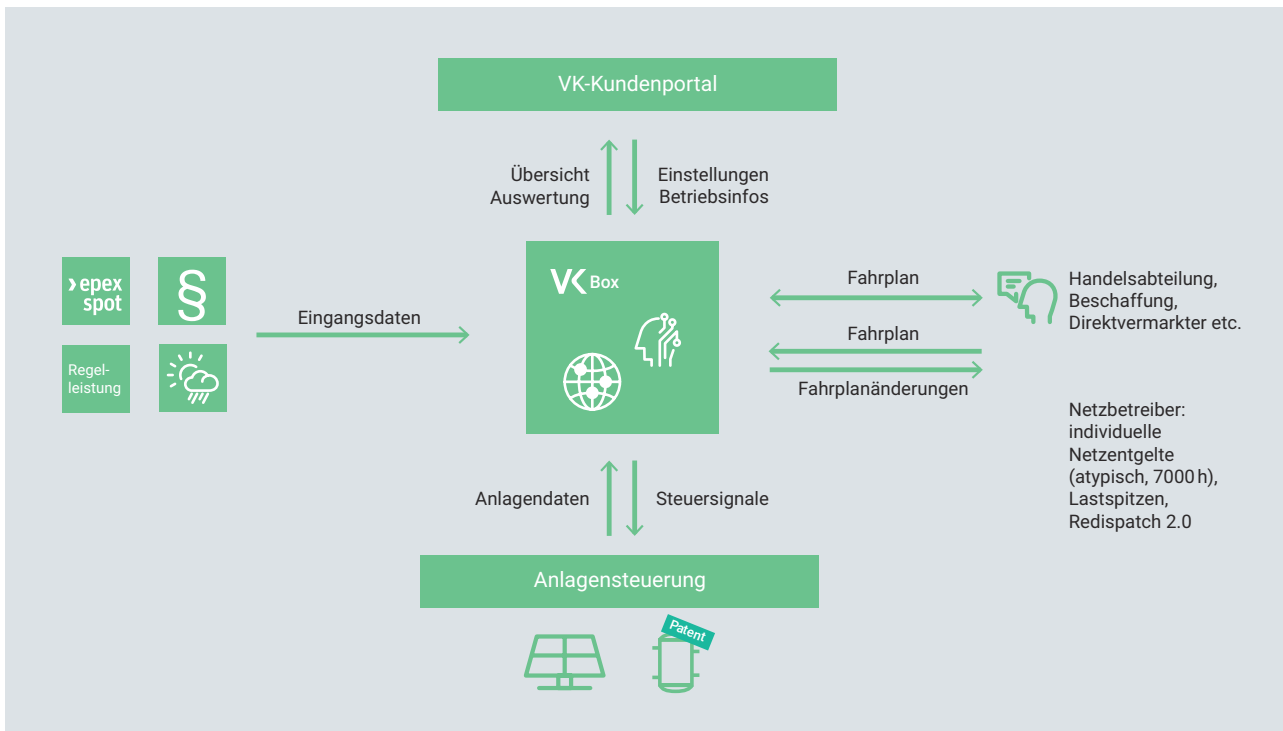


Bild 4. Schematische Systemarchitektur zur Betriebsoptimierung von Erzeugungsanlagen

Quelle: VK Energie

anlagen bei der Einsatzplanung und vermarktet ihre Flexibilität an den Strommärkten. Im Rahmen der Dienstleistung „Betriebsoptimierung“ werden auf Basis technischer Restriktionen, Bedarfsprognosen und Marktpreiserwartungen Einsatzfahrpläne erstellt und die Anlagen automatisiert am Strommarkt vermarktet (Bild 2). Für klassische Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen setzt VK Energie bereits heute eine Multi-Market-Optimierung (MMO) mit koordinierter Vermarktung in Day-Ahead-, Intraday- und Regelleistungsmarkt um, sofern dies wirtschaftlich sinnvoll ist. Interne Analysen zeigen: Eine reine Day-Ahead-Optimierung erschließt häufig nur die Hälfte bis zwei Drittel des realisierbaren Mehrerlöses – zusätzliche Erlöse entstehen vor allem im Intraday- und Regelleistungsmarkt.

Im Anlagenportfolio von VK Energie spielen GWP heute mit 28 Anlagen und knapp 17 MW(th) gegenüber rd. 600 MW(th) aus Blockheizkraftwerken noch eine ver-

gleichsweise kleine, strategisch jedoch zunehmend wichtige Rolle. Mit dem ambitionierten Ausbau der Wärmepumpenkapazitäten wird die Weiterentwicklung der MMO zu einem zentralen Hebel: GWP können bevorzugt in Zeiten hoher Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und niedriger Strompreise betrieben werden, überschüssige Wärme lässt sich in Wärmespeichern zwischenspeichern und zeitversetzt nutzen. Diese zeitliche Entkopplung von Strombezug und Wärmenachfrage schafft wirtschaftliche Vorteile für Anlagenbetreiber und systemische Vorteile für ein zunehmend volatiles Energiesystem.

Anforderungen der Strommärkte

Voraussetzung für die Entwicklung eines integrierten MMO-Konzepts ist ein präzises Verständnis des Marktdesigns, des zeitlichen Ablaufs und der Produktanforderungen der relevanten Märkte. Bild 3

stellt die Gate-Closure-Timeline sowie die wesentlichen Anforderungen der Spot- und Regelleistungsmärkte gegenüber. Während im Day-Ahead-Markt täglich um 12:00 Uhr für den Folgetag gehandelt wird und Stunden- bzw. Viertelstundenprodukte zur Verfügung stehen, ermöglicht der Intraday-Markt einen kontinuierlichen Handel bis kurz vor Lieferung mit deutlich höherer Preisvolatilität. Die Regelleistungsmärkte – Primärregelung (FCR), Sekundärregelung (aFRR) und Minutenreserve (mFRR) – unterscheiden sich hinsichtlich Vorlaufzeit, Aktivierungsgeschwindigkeit und Mindestleistung erheblich. Hieraus ergeben sich unterschiedlich strenge Anforderungen an die technische Dynamik der teilnehmenden Anlagen [4;5].

Systemarchitektur für eine integrierte Marktteilnahme

Die koordinierte Teilnahme an mehreren Marktsegmenten stellt

hohe Anforderungen an Datenverarbeitung, Prognosegüte, Automatisierung und Systemverfügbarkeit. Bild 4 zeigt schematisch die erforderliche Systemarchitektur. Kern ist ein Optimierungssystem, das als Schnittstelle zwischen Markt, Netz und Anlage fungiert. In dieses System fließen Marktpreis- und Preisprognosen, regulatorische Rahmenbedingungen, Wetter- und Wärmebedarfsprognosen sowie anlagenspezifische Betriebsparameter ein. Auf dieser Grundlage werden rollierende Optimierungen für unterschiedliche Zeithorizonte vorgenommen: Für den Day-Ahead-Markt müssen Preisprognosen mit ausreichender Genauigkeit vorliegen, der Intraday-Handel reagiert auf kurzfristige Preissignale und Opportunitätskosten, im Regelleistungsmarkt sind neben Leistungspreisen auch Arbeitspreise und Abrufwahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Das Optimierungssystem muss diese unterschiedlichen Preissignale konsistent in eine gemeinsame Zielfunktion integrieren.

Die resultierenden Fahrpläne werden automatisiert an die Markt- und Netzschnittstellen übermittelt; parallel geschieht die Rückkopplung an die Anlagensteuerung. Echtzeitmesswerte zu Leistung, Speicherfüllständen, Temperaturen und Regelennergieabrufen fließen kontinuierlich in nachgelagerte Optimierungsschritte ein, sodass Abweichungen zwischen Plan und Ist erkannt und Ausgleichsenergiekosten minimiert werden. Marktseitige Restriktionen und Priorisierungsregeln müssen ebenfalls abgebildet werden: Für Regelleistung reservierte Leistung kann nicht parallel im Spotmarkt vermarktet werden. Erst durch diese integrierte Betrachtung wird eine wirtschaftlich tragfähige Multi-Market-Strategie für flexible Wärmeerzeuger technisch umsetzbar.

Technische Eigenschaften von Großwärmepumpen

Damit GWP im Optimierungsmodell realitätsnah abgebildet werden können, sind die marktseitigen Anforderungen mit den physikalischen und betrieblichen Eigenschaften der Anlagen abzugleichen. Die zentrale technische Komponente von GWP ist der Verdichter, der elektrische Leistungsaufnahme, thermische Leistung und Systemdynamik bestimmt. Hubkolben- und Schraubenverdichter mit Frequenzumrichter modulieren typischerweise zwischen rd. 30 und 100 % der Nennleistung und können ihre Leistungsaufnahme innerhalb etwa einer Minute anpassen – die technischen Voraussetzungen für schnelle Regelennergieprodukte sind damit grundsätzlich erfüllt [6]. Die tatsächliche Dynamik wird häufig weniger durch den thermodynamischen Prozess, sondern durch Schutzfunktionen und Zeitkonstanten im Regelsystem begrenzt [7]. Turboverdichter weisen demgegenüber engere Betriebsbereiche mit definierten Mindestlasten auf und führen im Optimierungsmodell zu diskreten Betriebszuständen [6].

Zu berücksichtigen sind weiterhin Leistungsgrenzen aus Verdichter- und Wärmeübertragerauslegung, zulässige Druck- und Temperaturbereiche sowie betriebliche Restriktionen wie Mindestlauf- und Mindeststillstandszeiten oder An- und Abfahrvorgänge. Bei Luftwärmepumpen kommen Abtauvorgänge hinzu, die als zusätzlicher Leistungsbedarf oder als temporäre Effizienzminderung berücksichtigt werden sollten [6].

Ein weiterer zentraler Einflussfaktor ist darüber hinaus die temperaturabhängige Effizienz von Wärmepumpen: Der Leistungskoeffizient (COP) sinkt mit fallender Quellen- und steigender Senktemperatur, sodass die Grenzkosten

der Wärmeerzeugung zeitlich variieren und temperaturabhängig zu modellieren sind.

Die hydraulische Einbindung der Wärmepumpe beeinflusst zusätzlich ihre Markt- und Systemflexibilität. Wärmespeicher stellen das zentrale Flexibilitätselement dar, weil sie Strombezug und Wärmefachfrage zeitlich entkoppeln. Gleichzeitig entstehen Wechselwirkungen: In Hybridsystemen mit mehreren Wärmeerzeugern können unterschiedliche Temperaturniveaus im Speicher die effektiv nutzbare Kapazität reduzieren. Mit steigendem Speicherfüllstand erhöhen sich häufig die Rücklaufemperaturen zur Wärmepumpe; die Folge sind ein sinkender COP und reduzierte maximale Ladeleistungen. Diese Wechselwirkungen zwischen Speicherzustand, Effizienz und Leistungsgrenzen sollten in einer präzisen MMO zumindest näherungsweise abgebildet werden.

Eignung für die Multi-Market-Optimierung

Der Abgleich zwischen Marktanforderungen und technischen Eigenschaften zeigt: Moderne GWP haben relevante Flexibilitätspotenziale. Neben der Verdichtertechnologie sind vor allem das Regelungskonzept und die Integration thermischer Speicher entscheidend für die Marktfähigkeit. Bei geeigneter Auslegung und Steuerung können GWP grundsätzlich am Day-Ahead- und Intraday-Markt teilnehmen sowie Sekundärregelleistung und Minutenreserve bereitstellen. Erste Untersuchungen deuten unter bestimmten Voraussetzungen sogar auf eine Eignung für Primärregelleistung hin. Offen ist weiterhin die Frage, wie sich häufiger Teillastbetrieb auf den COP und die Anlagenlebensdauer auswirkt – hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf. Zu

berücksichtigen ist zudem, dass nicht jede Wärmepumpe technisch für einen flexiblen Betrieb ausgelegt ist. Im VK-Portfolio finden sich auch Anlagen, die herstellerseitig für reinen Volllastbetrieb konzipiert wurden und daher nicht für eine MMO geeignet sind.

Fazit und Ausblick

Der Ausbau der Fernwärme und der GWP wird in den kommenden Jahren erheblich an Dynamik gewinnen und eine zentrale Rolle für die Dekarbonisierung des Wärmesektors einnehmen. Mit der zunehmenden Elektrifizierung der Wärmeerzeugung steigt der Bedarf an Betriebskonzepten, die neben der Versorgungssicherheit auch wirtschaftliche und systemdienliche Aspekte berücksichtigen. Die vorliegende Markt- und Umfeldanalyse aus dem Projekt SysMMO zeigt, dass bestehende Flexibilitätspotenziale von GWP heute nur partiell genutzt werden und dass eine MMO eine technisch plausible und wirtschaftlich attraktive Perspektive darstellt, um diese Potenziale wirtschaftlich zu erschließen. Die Validierung und Erprobung wird nun

im weiteren Projektverlauf unter realen Betriebsbedingungen mit Pilotanlagen vorgenommen.

Literatur

- [1] Thamling, N.; Langreder, N.; Lettow, F.; Wunsch, M.: Perspektive der Fernwärme – Aktualisierung des Gutachtens „Perspektive der Fernwärme – Aus- und Umbau städtischer Fernwärme als Beitrag einer sozial-ökologischen Wärmepolitik“ aus dem Jahr 2020. Prognos AG im Auftrag von AGFW und VKU, Juni 2024.
- [2] Fraunhofer ISI & Consentec: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. 2022. Verfügbar unter: www.langfristszenarien.de.
- [3] Klaas, A.-K.; Leibfritz, T.; Moritz, M.: Großwärmepumpen: Markthochlauf und Kosten in Deutschland. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), 2026.
- [4] 50Hertz, Amprion, Tennet, Transnet-BW: Beschreibung von Konzepten des Systemausgleichs und der Regelreservemärkte in Deutschland. 2025.
- [5] Epex Spot: Trading Brochure. Februar 2025.
- [6] Ahrendts, F. et al.: Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland. Fraunhofer-Gesellschaft, 2023.
- [7] Meesenburg, W.; Markussen, W. B.; Ommen, T.; Elmegaard, B.: Optimi-

zing control of two-stage ammonia heat pump for fast regulation of power uptake. Applied Energy, Vol. 271, 115126, 2020.

Verena Köppl
Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising
verena.koepl@hswt.de
www.hswt.de



Michael Abele
Teamleiter Operations & Implementierung, VK Energie GmbH, München
michael.abele@vk-energie.de
www.vk-energie.de



Felix Rippinger, M.Sc.
Research Associate & Project Engineer, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbh, München
frippinger@ffe.de
www.ffe.de



Anzeige

95%
Verbesserung der Genauigkeit bei der CO₂-Bilanzierung
(EU-Kommission, EED-Analyse)

Können Sie sich unzuverlässige Datenerfassung leisten?

Unzureichende Datenerfassung bremst Ihre Performance, treibt Kosten in die Höhe und erschwert die Compliance. Kamstrup liefert maßgeschneiderte Lösungen für jeden Anwendungsbereich – damit Sie das volle Potenzial Ihrer Daten nutzen können.

We Make What You Measure Matter



Lesen Sie mehr

kamstrup