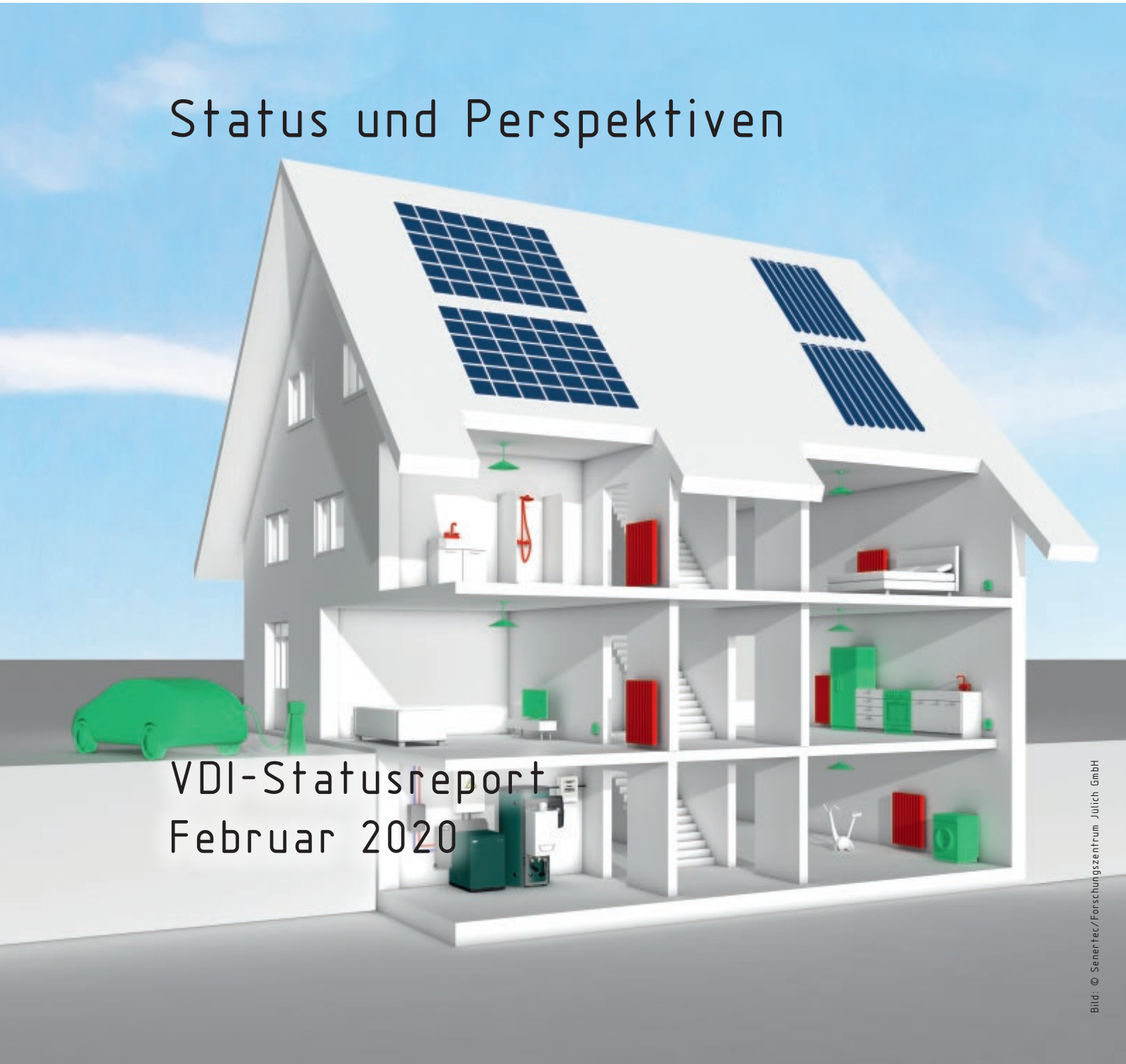
VDI

Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen

Status und Perspektiven



VDI-Statusreport
Februar 2020

Bild: © Senertec/Forschungszentrum Jülich GmbH

Bild Titelseite:
Energieversorgungskonzepte eines Wohngebäudes mit Mikro-KWK-Anlage

Vorwort

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI), in dem ca. 145.000 Fachleute aus Wissenschaft und Technik zusammengeschlossen sind, setzt sich dafür ein, dass die Energieversorgung Deutschlands in den kommenden Jahren technisch effizienter, ökonomisch tragfähiger, ökologisch nachhaltiger und sozial verträglicher gestaltet wird.

Das Ausbauziel der Bundesregierung, den Stromanteil mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bis 2020 auf 25 % zu verdoppeln, zeigt, dass die Vorteile der KWK-Technologie erkannt wurden. Die Niederlande, Dänemark und Finnland erreichen bereits einen KWK-Stromanteil von 30 % bis 40 %.

Aufgrund veränderter Rahmenbedingungen in der Energiewirtschaft gibt es gute Chancen für die Modernisierung und den Zubau umweltfreundlicher Anlagen zur gekoppelten Strom- und Wärmeversorgung Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), kombiniert mit einem hohen Maß an Versorgungssicherheit. Denn KWK-Anlagen lassen sich häufig schnell an veränderte Betriebsbedingungen anpassen. Deshalb sind sie auch geeignet, die zukünftigen Anforderungen an eine sichere Stromversorgung zu erfüllen, die im Zusammenspiel mit den fluktuierenden Erneuerbaren Energien (Wind, Fotovoltaik) entstehen.

Der Fachausschuss „Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“ (Mikro-KWK) der VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU) setzt sich mit allen Mikro-KWK-Technologien, von der Entwicklung, Demonstration bis hin zur Anwendung und optimierten Betriebsweise, auseinander. Dabei steht die neutrale, technisch-wissenschaftliche Information der Öffentlichkeit über den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen und die Erstellung von Richtlinien (z. B. VDI 4655, VDI 4656) als Hilfestellung für die Planung und den Betrieb dieser Anlagen im Vordergrund.

Der vorliegende Statusreport „Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen – Status und Perspektiven“ ist eine Überarbeitung des Statusreports vom Oktober 2013. Er zeigt den Stand der Technik und die sich abzeichnenden Tendenzen. Er gibt konkrete Hinweise für die Planung, Dimensionierung und die Betriebsweise dieser Systeme, die Abrechnung von Wärme- und Stromerzeugungskosten aus einer KWK-Anlage in einem Mehrfamilienhaus und stellt die gesetzlichen Rahmenbedingungen insbesondere hinsichtlich Förderung dieser Anlagen dar.

Der Statusreport wendet sich an den interessierten Laien, aber auch an Journalisten, Wohnungswirtschaft, Kommunen, Energieversorger. Für den schnellen Leser weisen wir auf die Zusammenfassung des Status-reports sowie die wichtigsten Aussagen für jeden Abschnitt („Fakten in Kürze“) hin.

Düsseldorf im Februar 2020

Dipl.-Ing. Jochen Riedel
Vorsitzender Fachausschuss „Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“ (Mikro-KWK)

An diesem Statusreport haben folgende Mitglieder des Fachausschusses „Mikro-KWK" mitgewirkt:

Dipl.-Ing. Wulf Binde, Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. B.KWK, Berlin

Jürgen Blümer, Heinz Lackmann GmbH & Co. KG, Münster

Dipl.-Ing. Heinz Ulrich Brosziewski, Ingenieurbüro Heinz Ullrich Brosziewski Kraft-Wärme-Kopplung Beratung, Projektierung, Gutachten, Hannover

RA Martin Hack, Rechtsanwälte Günther, Hamburg

Ralf Kiryk, BDH, Köln

Dr.-Ing Jens Matics, Stadtwerke Heiligenhaus GmbH, Heiligenhaus

Dipl.-Ing. (FH) Andre Merz, Senertec GmbH, Schweinfurt

Dr.-Ing. Michael Schmidt, encadi GmbH, Münster

Dipl.-Ing. Franz-Josef Schulte, lion energy GmbH & Co. KG /ENERCEL UG, Brilon

Dipl.-Ing. Dipl. Betriebswirt Patrick Selzam, Fraunhofer IEE, Kassel

Dr.-Ing. Christian Spitta, Zentrum für Brennstoffzellentechnik ZBT GmbH, Duisburg

Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas, Hochschule Reutlingen

Dipl.-Ing. Andreas Vollmer, Hexis AG, CH-Winterthur

Dr.-Ing. Matthias Wagnitz, ZVSHK, Potsdam

Dipl.-Ing. (FH) Maren Wenzel, Gas-Wärme-Institut (GWI), Essen

Inhalt

1 Einleitung 4

2 Zusammenfassung 5

3 Technologien 7

3.1 Ottomotor 7

3.2 Stirlingmotor 8

3.3 Dampfexpansion, ORC und Gasturbine 9

3.4 Brennstoffzellen 10

4 Primärenergie- und CO_2-Einsparung 13

5 Potenziale und Anwendungsbereiche 17

5.1 Potenziale für Mikro-KWK 17

5.2 Realisierte KWK-Anlagen 19

5.3 Anwendungsbereiche 19

6 Planung und Betriebsweisen von Mikro-KWK-Anlagen 22

7 Abrechnungstechnische Modelle und Contracting 27

7.1 Verwendung von KWK-Strom in Einfamilienhäusern 27

7.2 Wärmeberechnung bei KWK-Nutzung gemäß VDI 2077 Blatt 3.1 28

7.3 Mikro-KWK als Contracting-Lösung 32

8 Energierechtliche Rahmenbedingungen 33

8.1 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 33

8.2 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2017) 37

8.3 Marktstammdatenregister 40

8.4 Energiesteuergesetz 40

8.5 Stromsteuergesetz 41

8.6 Umsatzsteuer 41

8.7 Ertragsteuer 42

8.8 Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) 42

8.9 Energieeinsparverordnung (EnEV) 42

8.10 Förderinstrumente 43

9 Aktuelle Ansätze und Perspektiven 44

9.1 Smart Grid 45

9.2 Power-to-Gas 45

9.3 Virtuelle Kraftwerke 46

9.4 Zukünftige Geschäftsmodelle 48

Schrifttum 51

1 Einleitung

Die Möglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gehören – genauso wie die Stromerzeugung aus Fotovoltaikmodulen und Windkraftanlagen – zu den wesentlichen Elementen im Konzept der Energiewende der Bundesregierung. Bei einer KWK-Anlage treibt ein Motor einen Generator an, der Elektrizität erzeugt, oder es wird eine Brennstoffzelle eingesetzt. Die dabei gleichzeitig entstehende Wärme wird für die Beheizung und Warmwasserversorgung verwendet. Dadurch wird der eingesetzte Brennstoff effizient genutzt. Anders als die bislang vorherrschende getrennte Erzeugung von Elektrizität in Großkraftwerken und Wärme in Heizgeräten wird der Ausstoß an klimaschädlichem CO_2 reduziert. Bund, Länder und Versorger haben deswegen zahlreiche Förderprogramme aufgelegt, um die Verbreitung dieser klimaschonenden Technologie als einen Teil der Energiewende zu forcieren.

Damit die ambitionierten Ziele der Energiewende auch in den kommenden Jahren eine greifbare Perspektive für den Klimaschutz in Deutschland bieten können, ist der Gesetzgeber weiter gefordert. Wichtigstes Fundament hierfür sind langfristige kontinuierliche Rahmenbedingungen, die Investoren Sicherheit in ihren Entscheidungen bieten. Gleichzeitig sind die noch bestehenden Hindernisse in Gesetzen und Verordnungen zu beseitigen, um beispielsweise auch der Wohnungswirtschaft einen wirtschaftlich tragfähigen Zugang zur Zukunftstechnologie KWK zu ermöglichen.

Die Hersteller bieten bereits ein breites Spektrum an KWK-Technologien für unterschiedlichste Einsatzbereiche an – vom Einfamilienhaus bis zum Nahwärmekonzept für ganze Straßenzüge oder Großobjekte. Zukünftig werden Brennstoffzellen-Heizgeräte eine weitere innovative KWK-Variante bieten. Auch die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) wird in den kommenden Jahren einen neuen Markt für diese Technologie erschließen können.

Die Voraussetzungen und Perspektiven für die KWK sind grundsätzlich positiv und die Zahl der neu installierten KWK-Anlagen wächst kontinuierlich. Doch an vielen Stellen erschweren nach wie vor Details in Verordnungen den Durchbruch dieser klimaschonenden und effizienten Technologie. So könnte gerade das für die KWK ideale Einsatzfeld der Wohnungswirtschaft durch bereits bestehende Contracting-Lösungen schnell und spürbar für die Reduzierung des CO_2-Ausstoßes sorgen. Weil der Contracting-Geber jedoch die EEG-Umlage auf den Strom erheben muss, den er an den Endkunden bzw. Mieter liefert, stockt der weitere Ausbau der KWK. Es ist paradox: Würde z. B. der Eigentümer eines Einfamilienhauses die gleiche KWK-Anlage im gleichen Objekt selbst betreiben, fiele die EEG-Umlage nicht an.

2 Zusammenfassung

Die große Vielfalt von Mikro-KWK-Anlagen[1)] am Markt lässt sich im Wesentlichen anhand der Kerntechnologien für das KWK-Gerät

- Ottomotor,
- Stirlingmotor,
- Mikro-Dampfturbine,
- Organic Rancine Cycle (ORC),
- Mikro-Gasturbine und
- Brennstoffzelle

darstellen. Jede der Technologien besitzt individuelle Charakteristika, die – neben den reinen Effizienzdaten – bei der Auswahl beachtet werden müssen.

Mikro-KWK-Anlagen sparen Primärenergie und CO_2 ein. Selbst im kleinsten Leistungsbereich von 1 kW_{el} können heute schon Primärenergieeinsparungen über 15 % gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme in Kraftwerk und Heizkessel erreicht werden. Bei Mikro-KWK-Anlagen mit einem elektrischen Nutzungsgrad von 30 % beträgt die Primärenergieeinsparung bis zu etwa 25 % (siehe auch Tabelle 1 in Abschnitt 4). Mit Brennstoffzellen sind sogar noch höhere Werte möglich. Die mit Mikro-KWK-Anlagen erreichbaren CO_2-Einsparungen können nahezu 40 % betragen.

Mikro-KWK-Anlagen können sowohl in Ein- und Zwei- als auch Mehrfamilienhäusern und Gewerbebetrieben einen großen Teil der elektrischen und thermischen Grundlast erzeugen. Jährlich werden ca. 700.000 Heizsysteme installiert, davon entfielen im Jahr 2018 bei den geltenden Rahmenbedingungen nur ca. 0,3 % auf Mikro-KWK-Anlagen. Unter angemessenen Rahmenbedingungen ist bis 2030 ein Anteil von über 5 % möglich. Da knapp 50 % des bundesdeutschen Baubestands mit Erdgas versorgt wird, ist die Infrastruktur bezüglich des Erdgaseinsatzes für die Mikro-KWK vorhanden.

Der wirtschaftliche Betrieb einer Mikro-KWK-Anlage setzt eine individuelle sowie objektspezifische Planung und Dimensionierung voraus. Die Richtlinie VDI 4656 „Planung und Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen“ inklusive Berechnungsprogramm unterstützt Fachhandwerk oder Fachplaner hierbei. Eine KWK-Anlage wird standardmäßig wärmegeführt. Durch eine überlagerte Stromorientierung kann der Anteil der Eigenstromnutzung und damit die Wirtschaftlichkeit des Systems deutlich gesteigert werden.

Mikro-KWK-Anlagen kommen überwiegend bei der Sanierung zum Einsatz. Die Infrastruktur für Brennstoff- und Wärme- sowie Trinkwarmwasserverteilung kann in der Regel beibehalten werden. Die Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK erhöht sich, wenn der produzierte KWK-Strom im Objekt verwendet wird. Die Wertigkeit der Eigenstromverwendung orientiert sich an den vermiedenen Strombeschaffungskosten. Im Vergleich zur Einspeisung in das Netz gemäß KWKG ergibt sich hier ein Faktor von derzeit ca. 2,5. Für den Einsatz im Mehrfamilienhaus eignet sich das „Summenzählermodell“, das die im KWKG beschriebenen virtuellen Zählpunkte nutzt.

Da beim Einsatz einer KWK-Anlage gleichzeitig Wärme und Strom produziert werden, ist zur Bestimmung der umlagefähigen Kosten im Sinne der Heizkostenverordnung eine eindeutige Ermittlung des Aufwands für die Wärmeerzeugung erforderlich. Die Richtlinie VDI 2077 Blatt 3.1 „Verbrauchskostenerfassung für die Technische Gebäudeausrüstung; Ermittlung der umlagefähigen Wärmeerzeugungskosten von KWK-Anlagen“ beschreibt rechnerische und messtechnische Methoden, mit der diese Aufteilung vorgenommen werden kann.

Ein Instrument zur Auflösung des aktuell vorhandenen Investitionshemnisses ist Contracting. In einer Contracting-Lösung übernimmt ein Energiedienstleister die Objektversorgung mit Strom und Wärme, wobei Planung, Errichtung, Finanzierung, Betrieb sowie Wartung und Instandhaltung vom Contractor als Komplettpaket angeboten werden. Dadurch wird das wirtschaftliche Risiko bezüglich Investition und Betrieb vom Endkunden auf den Contractor übertragen. Die Ungleichstellung von Contracting und Eigenbetrieb bezüglich der Fälligkeit zur Zahlung der EEG-Umlage stellt jedoch ein wesentliches Hemmnis zur Markteinführung von Contracting-Lösungen dar.

[1)] Da es keine gesetzliche Definition des Begriffs „Mikro-KWK“ gibt, umfasst der hier verwendete Begriff Mikro-, Mini- und Klein-KWK-Anlagen. Die KWK-Anlage schließt dabei das KWK-Gerät selbst, ein optionales Zusatzheizgerät und einen Wärmespeicher ein.

Die energierechtlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb und die Förderung der KWK sind vielfältig und teils äußerst komplex. Sie umfassen:

- Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2017)
- Marktstammdatenregister
- Energiesteuergesetz
- Stromsteuergesetz
- Umsatzsteuer bei Investitionen in KWK-Anlagen
- Ertragssteuer
- Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG)
- Energieeinsparverordnung (EnEV)
- Förderprogramm von Bundesländern, Kommunen und Unternehmen

Die Energieversorgungsstruktur wird zukünftig vermehrt dezentral und auf Basis erneuerbarer Energien stattfinden. Im Smart Grid als Energienetzwerk soll das Verbrauchs- und Einspeiseverhalten aller Marktteilnehmer integriert werden. Mithilfe der kommunikationstechnischen Bündelung einer hohen Anzahl von Mikro-KWK-Anlagen könnten diese entsprechende technische Aufgaben im Niederspannungsnetz übernehmen.

Energieversorger werden die Betreiber von nicht direkt steuerbaren Mikro-KWK-Anlagen durch variable Tarife motivieren, Strom bedarfsgerecht zu erzeugen. Die Kombination von Geschäftsmodellen (Energielieferung, Beschaffungsoptimierung, Netzlastmanagement, Regelenergiebereitstellung und Systemdienstleistungen) wird die Komplexität für Mikro-KWK-Steuerungen zwar erhöhen, aber die Ertragschancen verbessern. Dazu müssen Energiemanagementsysteme entwickelt und etabliert werden.

3 Technologien

Fakten in Kürze

- Die große Vielfalt von Mikro-KWK-Anlagen am Markt lässt sich im Wesentlichen darstellen anhand der Kerntechnologien für das KWK-Gerät:
  - Stirlingmotor
  - Brennstoffzelle
  - Ottomotor
  - Mikro-Dampfturbine
  - Organic Rancine Cycle
  - Mikro-Gasturbine
- Jede der Technologien besitzt individuelle Charakteristika, die neben den reinen Effizienzdaten bei der Auswahl beachtet werden müssen.

Die weiter wachsende Vielfalt von Mikro-KWK-Geräten lässt sich auf wenige grundsätzliche KWK-Technologien reduzieren. Neben den nachfolgend beschriebenen KWK-Technologien befinden sich noch eine Reihe weiterer KWK-Projekte in der Entwicklung. Eine Übersicht derzeit verfügbarer Geräte mit Informationen zur Leistung, Größe, Gewicht und weiteren Herstellerangaben ist in [11] zu finden.

3.1 Ottomotor

Der Ottomotor ist durch seine über 100-jährige Geschichte im Pkw-Bereich besonders ausgereift. Er ist vor allem bei größeren thermischen Leistungen am Markt weit verbreitet. Seine Funktionsweise kann durch den bekannten Vier-Takt-Prozess beschrieben werden (siehe Bild 1). Dabei wird die Bewegung des Kolbens vom Stillstand in eine Richtung bis zum erneuten Stillstand als Takt bezeichnet. Im ersten der vier Takte des Motors wird über die Senkung des Kolbens ein Luft-Kraftstoff-Gemisch durch das Einlassventil in den Zylinder gesaugt. Im zweiten Takt wird das eingeleitete Gemisch mit der Kolbenbewegung nach oben verdichtet und im darauffolgenden Takt durch die Zündkerze gezündet. Durch die Freisetzung der chemisch gebundenen Energie des Brennstoffs erhöht sich der Druck im Zylinder, was zu einer aktiven Herabbewegung des Kolbens führt. Im letzten Takt stößt der wieder nach oben schnellende Kolben das Abgas durch das nun geöffnete Auslassventil aus und der Otto- oder Gleichraumprozess beginnt erneut.

Die Entwicklung von Otto-Motoren für KWK-Geräte in kleineren Leistungsbereichen ist weit fortgeschritten und es ist bereits eine Vielzahl von Maschinen am

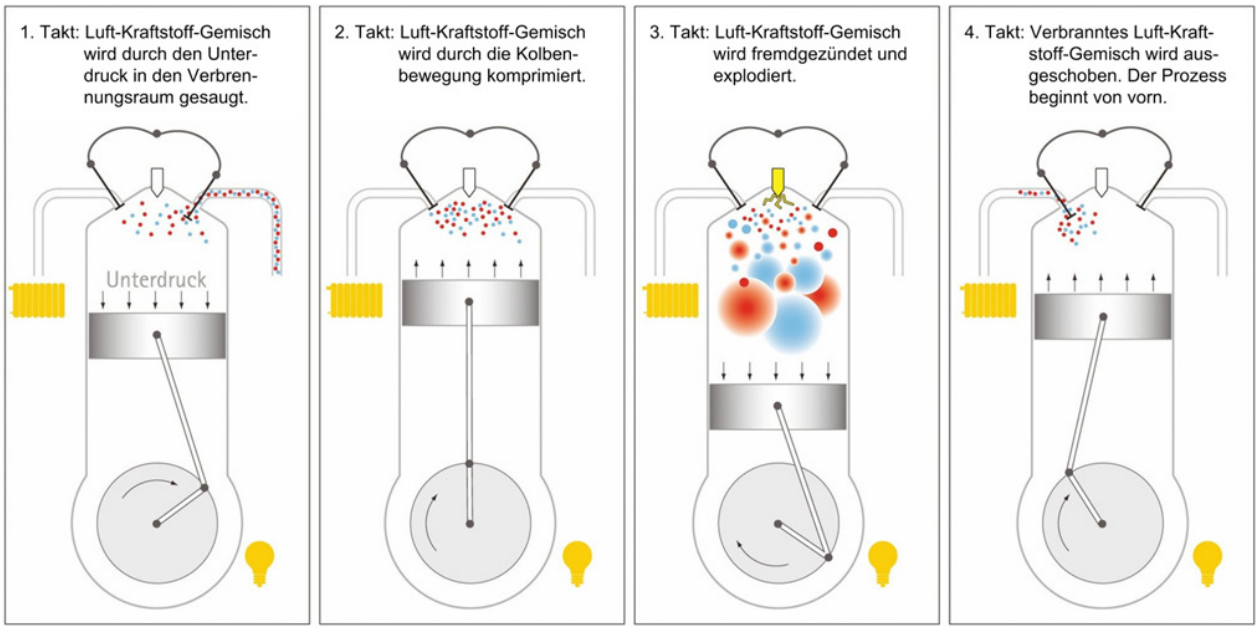


Bild 1. Darstellung der Funktionsweise des Otto-Motors (Quelle: ASUE)

Markt verfügbar. Im Vergleich zu anderen KWK-Technologien, heben sich die Anlagen mit Otto-Motor durch den relativ hohen elektrischen Wirkungsgrad im Bereich von 20 % bis 38 % (im Leistungsbereich 1 kW_{el} bis 50 kW_{el} gemäß [14]) ab. Die Stromkennzahlen[2)] sind, bezogen auf die anderen heute kommerziell verfügbaren Technologien, vergleichsweise hoch und erreichen Werte bis zu 0,5 in diesem Leistungsbereich. Demgegenüber stehen höhere Wartungskosten, resultierend aus den regelmäßig notwendigen Ölwechseln und den höheren Emissionen durch die interne Verbrennung des Brennstoffs im Motor, die einen Katalysator zur Abgasnachbehandlung erfordern.

3.2 Stirlingmotor

Im kleineren Leistungsbereich der Mikro-KWK-Geräte ist der Stirlingmotor eine relativ neue KWK-Technologie. Auch der Stirlingmotor lässt sich durch vier Takte beschreiben. Er besteht im Wesentlichen aus einem Arbeitskolben (Kolben A, Bild 2), der das innere Medium gegen die Umgebung abdichtet und einen, um eine viertel Periode vorauseilenden Verdrängerkolben (Kolben B, Bild 2), der eine Durchlässigkeit für das eingeschlossene Medium besitzt und als Regenerator fungiert.

Beim ersten Takt, der Expansionsphase, wird dem eingeschlossenen Medium durch eine externe Wärmequelle Energie zugeführt, was zu einer Druckerhöhung und einer Bewegung des Arbeitskolbens führt. Im anschließenden Takt strömt das Arbeitsmedium durch die Heraufbewegung des Verdrängerkolbens durch diesen und gibt dabei thermische Energie an ihn ab. Im dritten Takt bewegt sich der Arbeitskolben nach oben und komprimiert das Arbeitsmedium. Die bei der Kompression entstehende Wärme wird dem System über die äußere Kühlung der Prozesshülle entzogen. Beim letzten Takt bewegt sich der Verdrängerkolben wieder nach unten und verschiebt das Arbeitsmedium vom kalten in den warmen Bereich des Systems. Infolge der Durchleitung durch den Verdrängerkolben gibt dieser seine zuvor zugeführte Wärme abzüglich der Regenerationsverluste wieder an das Arbeitsgas ab.

Mikro-KWK-Geräte auf Stirlingmotor-Basis zeichnen sich durch einen nahezu verschleißfreien Betrieb und damit korrelierenden niedrigen Wartungskosten aus. Bedingt durch die externe Verbrennung können Stirlingmotor sehr emissionsarm betrieben werden und kommen damit ohne Katalysator aus. Trotz eines vergleichsweise hohen Energieausnutzungsgrads von über 90 %, bei Brennwertnutzung zum Teil sogar über 100 % bezogen auf den Heizwert des Brennstoffs, liegen die elektrischen Wirkungsgrade im kleinsten Leistungsbereich von 1 kW_{el} derzeit bei maximal 10 % bis 16 %. Durch Einsatz einer Luftvorwärmung können diese Werte jedoch gesteigert werden.

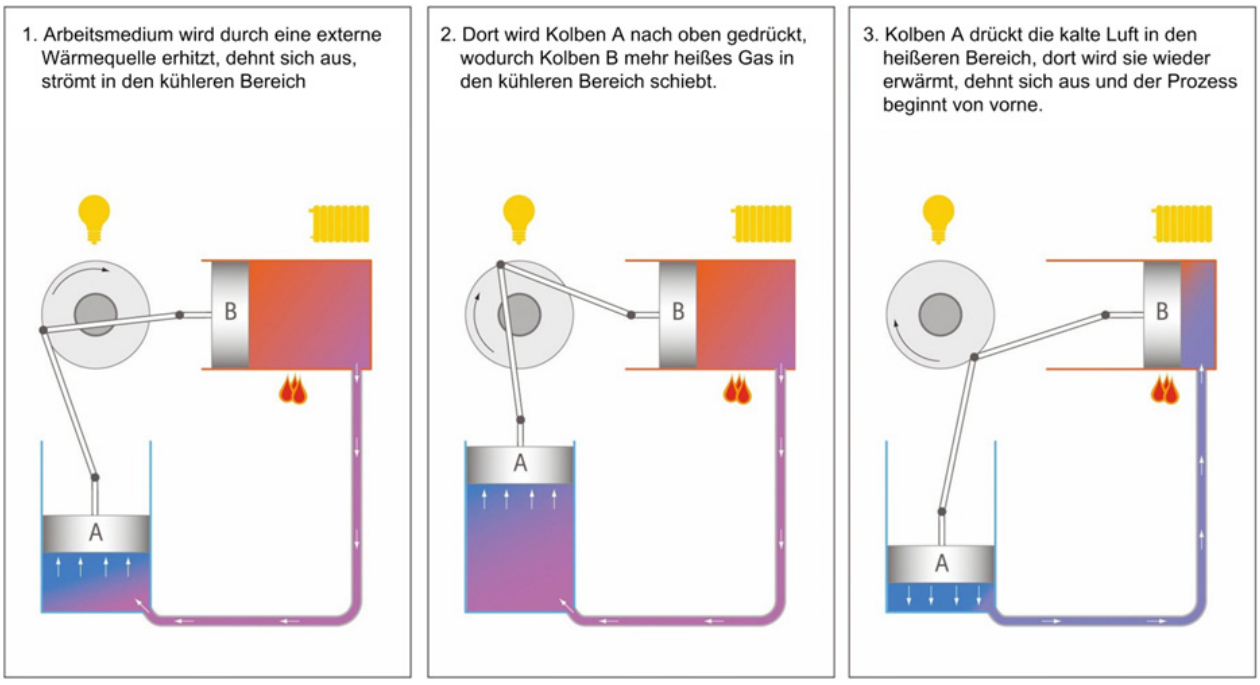


Bild 2. Darstellung der Funktionsweise eines Stirlingmotors (Quelle: ASUE)

[2)] Die leistungsbezogene Stromkennzahl ergibt sich aus dem Verhältnis von elektrischer Bruttostromleistung zur Bruttowärmeleistung bzw. vom elektrischen Wirkungsgrad zum thermischen Wirkungsgrad.

3.3 Dampfexpansion, ORC und Gasturbine

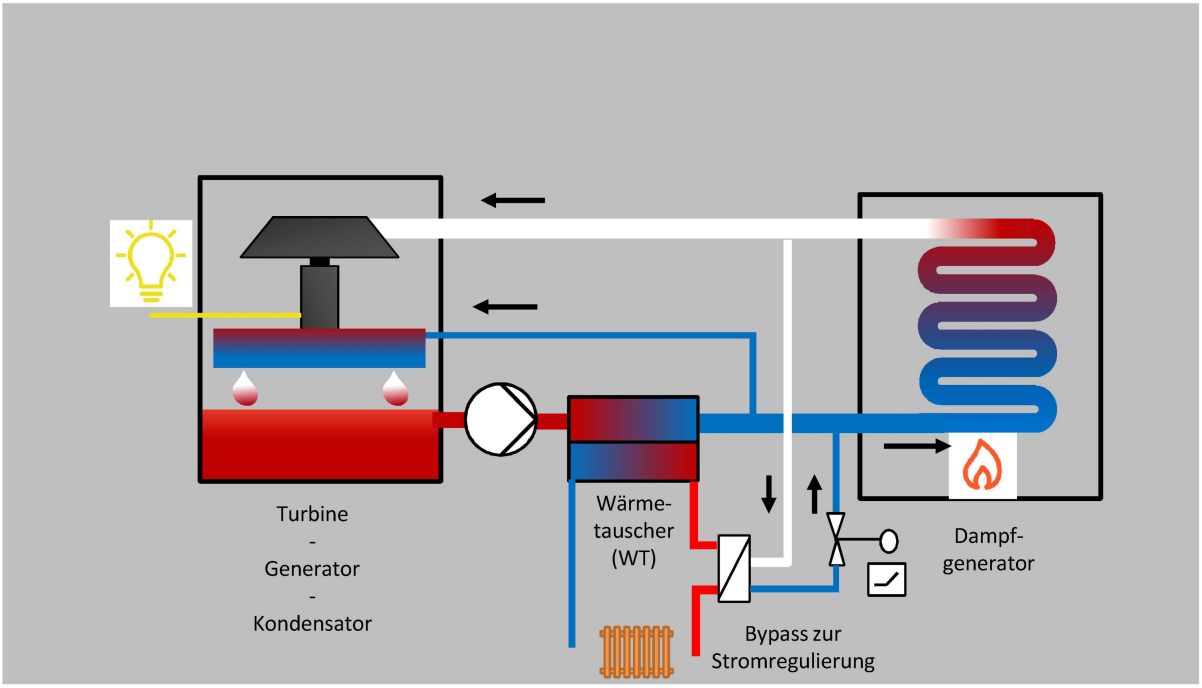
KWK-Systeme mit einem **Dampfmotor** spielen am Markt eine untergeordnete Rolle. Auch die Forschung und Weiterentwicklung dieser Technologie wird derzeit nur vereinzelt betrieben. Stattdessen ist mittlerweile eine **Mikro-Dampfturbine** entwickelt, die derzeit vor der Markteinführung steht.

Der Dampfprozess ist wie bei Großkraftwerken ein geschlossener Kreislauf. Das Arbeitsmedium „Speisewasser“ wird bei Mikro-Dampfturbinen durch Zuführung von Wärme aus handelsüblichen Brennern verdampft und überhitzt. Der Dampf treibt eine Mikro-Turbine mit hoher Drehzahl an. Der Rotor ist mit der direkt gekoppelten Turbine das einzig bewegte Teil (siehe Bild 3). Da das Speisewasser gleichzeitig für die Lagerschmierung genutzt wird, ist kein weiterer Betriebshilfsstoff erforderlich. Als Brennstoffe können sowohl Erd- und Flüssiggas als auch andere Brennstoffe genutzt werden. Bei der Verflüssigung des abgeleiteten Nassdampfs im Kondensator kann dem System die latent freigesetzte Wärme entzogen werden.

Die Vorteile der Mikro-Dampfturbine bestehen vor allem im sehr einfachen Aufbau und sehr niedrigen Betriebsgeräusch. Die Wartungskosten sind ebenfalls sehr gering, da Wasser seine Eigenschaften nicht verliert und daher nicht ersetzt werden muss. Die Standzeiten können ähnlich hoch sein wie bei modernen Brennwertgeräten bzw. Dampfkraftwerken. Der Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage liegt bei ca. 95 %. Mikro-Dampfturbinen können sowohl thermisch und, unabhängig davon, elektrisch modulieren. Mit schneller Modulation kann der größte Teil des Strombedarfs im Bereich 50 Watt bis 1.200 Watt in Ein- bis Dreifamilienhäusern abgedeckt werden.

Mikro-Dampfturbinen können wie andere KWK-Anlagen auch mit PV-Panel und/oder Batterien kombiniert werden, um den Jahresstrombezug im Objekt weiter zu reduzieren.

Beim **Organic Rankine Cycle** (ORC) handelt es sich um einen Dampfturbinenprozess, der sich besonders durch das eingesetzte Arbeitsmedium auszeichnet. Im Gegensatz zu Anlagen mit Wasser als Arbeitsmedium liegt der essenzielle Vorteil des eingesetzten organischen Arbeitsmediums in der niedrigeren Siedetemperatur. Hierdurch kann bereits durch „kleine“ Wärmequellen mit niedrigen Temperaturen eine Verdampfung des Arbeitsmediums erreicht werden. Die niedrigen Temperaturen des Arbeitsmediums führen zu relativ niedrigen Drücken innerhalb des Systems und damit folglich zu einer geringen Beanspruchung der eingesetzten Bauteile, sodass auf kostspielige und wartungsintensive Hochdrucktechnik verzichtet werden kann.



Der im Dampfgenerator produzierte Dampf treibt die Turbine zur Stromproduktion im direkt gekoppeltem Generator an. Das heiße Kondensat versorgt das Gebäude über den WT mit Wärme und Warmwasser. Mithilfe des Bypasses wird der produzierte Strom unabhängig von der Wärmeversorgung dem jeweiligen Bedarf angepasst.

Bild 3. Darstellung der Funktionsweise der Mikro-Dampfturbine (Quelle: lion energy GmbH & Co. KG FJS)

Die Funktionsweise beruht auf der Wärmezufuhr einer externen Wärmequelle (siehe Bild 4). Durch den thermischen Energieeintrag in das System (heiße Abgase, heiße Luft, heißes Waser, heißes Thermalöl) wird das organische Arbeitsmedium verdampft und überhitzt, sodass ein vergleichsweise hoher Druck innerhalb der Anlage generiert wird.

Über eine Turbine oder einen Schraubenexpander wird die innere Energie des Arbeitsmediums in mechanische Rotationsenergie der Generatorwelle umgewandelt und somit dem System entzogen. Das verdampfte Arbeitsmedium wird über einen Rekuperator – zur Rückkopplung der thermischen Energie – zum Kondensator geleitet, der wiederum die restliche Wärme aus der Anlage auskoppelt. Durch die Speisepumpe des Systems wird das verflüssigte, organische Arbeitsmedium durch den Rekuperator geleitet, um es vorzuwärmen und es danach erneut dem Verdampfer zuzuführen.

Im Gegensatz zu konventionellen Turbinenprozessen mit Wasserdampf treten deutlich geringere Temperaturen und Drücke auf. Da es sich auch hier um einen Prozess mit einer externen Wärmequelle handelt, zeichnet sich die ORC-Anlage durch niedrige Emissionen aus und bietet ebenso den Vorteil, dass die Anlagenleistung gut moduliert werden kann.

Aufgrund der Möglichkeit, Wärmequellen auf niedrigem Temperaturniveau nutzen zu können, eignen sich ORC-Anlagen insbesondere zur Nutzung von Abwärmeströmen zur Stromerzeugung. In dieser Anwendung spielt der geringere elektrische Wirkungsgrad zwischen 10 % und 20 % insbesondere im größeren Leistungsbereich, in dem ORC-Anlagen überwiegend eingesetzt werden, eine untergeordnete Rolle.

Bei **Gasturbinenprozessen** sind Geräte ab 28 kW_{el} im Markt verfügbar. Konstruktionsbedingt erlauben Gasturbinen eine lastmodulierende Fahrweise mit einer hohen Verfügbarkeit. Mikro-Gasturbinen im kleinen Leistungsbereich sind derzeit im Prototypstadium.

3.4 Brennstoffzellen

Auch Brennstoffzellen sind mittlerweile am Markt verfügbar.

Beim Funktionsprinzip der Brennstoffzelle handelt es sich im Gegensatz zu den bereits erläuterten Prozessen um eine elektrochemische Reaktion, das heißt, die thermische und anschließend mechanische Energiewandlung zur Erzeugung von Elektrizität entfällt. Damit begründet sich auch der, im Vergleich mit anderen KWK-Technologien, hohe elektrische Wirkungsgrad (35 % bis 55 % bezogen auf den Heizwert). Hinzu kommt eine gute Modulationsfähigkeit mit geringen Einbußen bei Wirkungsgrad und niedrigen Emissionswerten. Aufgrund der vergleichsweise hohen Stromkennzahl, ist die Brennstoffzelle für den Einsatz in modernen, gut gedämmten Einfamilienhaus gut geeignet und kann auch bei geringem Wärmebedarf noch hohe Einsparungen im Vergleich zu konventionellen Systemen erwirtschaften.

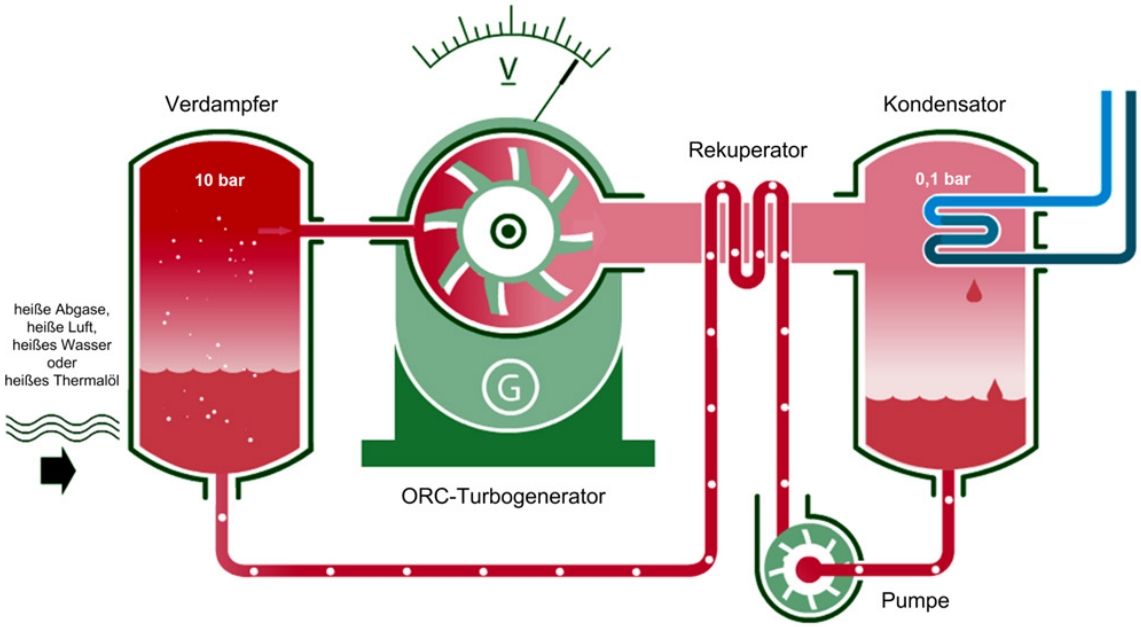


Bild 4. Funktionsweise Organic Rankine Cycle (Quelle: Gesellschaft für Motoren und Kraftanlagen)

Ein Elektrolyt, der je nach Brennstoffzellentechnologie für bestimmte Ionen durchlässig ist, trennt die zu reagierenden Prozessgase voneinander. Durch die somit entstehende Potenzialdifferenz zwischen den beiden Seiten des Elektrolyten kann ein elektrischer Fluss über die Verbindung der Anode mit der Kathode ermöglicht werden. Zur besseren Veranschaulichung zeigt Bild 5 den Funktionsaufbau einer Polymermembran-Brennstoffzelle. Die Elektrolytmembran ist bei dieser Brennstoffzellentechnologie für das positiv geladene Wasserstoffproton H^+ durchlässig. Durch die Verbindung der Anode mit der Kathode mittels eines elektrischen Leiters können die bei der Trennung von H_2 freigesetzten Elektronen in Richtung der Kathode fließen, um dort am Katalysator aus zwei Wasserstoffprotonen und einem Sauerstoffatom O^{2-} zu Wasser H_2O entstehen zu lassen.

Es befinden sich verschiedene Arten von Brennstoffzellen im Feldtest und der Entwicklung. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch die eingesetzte Elektrolytmembran, die damit korrelierende elektrochemische Reaktion und die benötigte Betriebstemperatur. Bild 6 gibt einen Überblick über die derzeit wichtigsten Arten von Brennstoffzellen, mit ihren Reaktionsverläufen und Betriebstemperaturen.

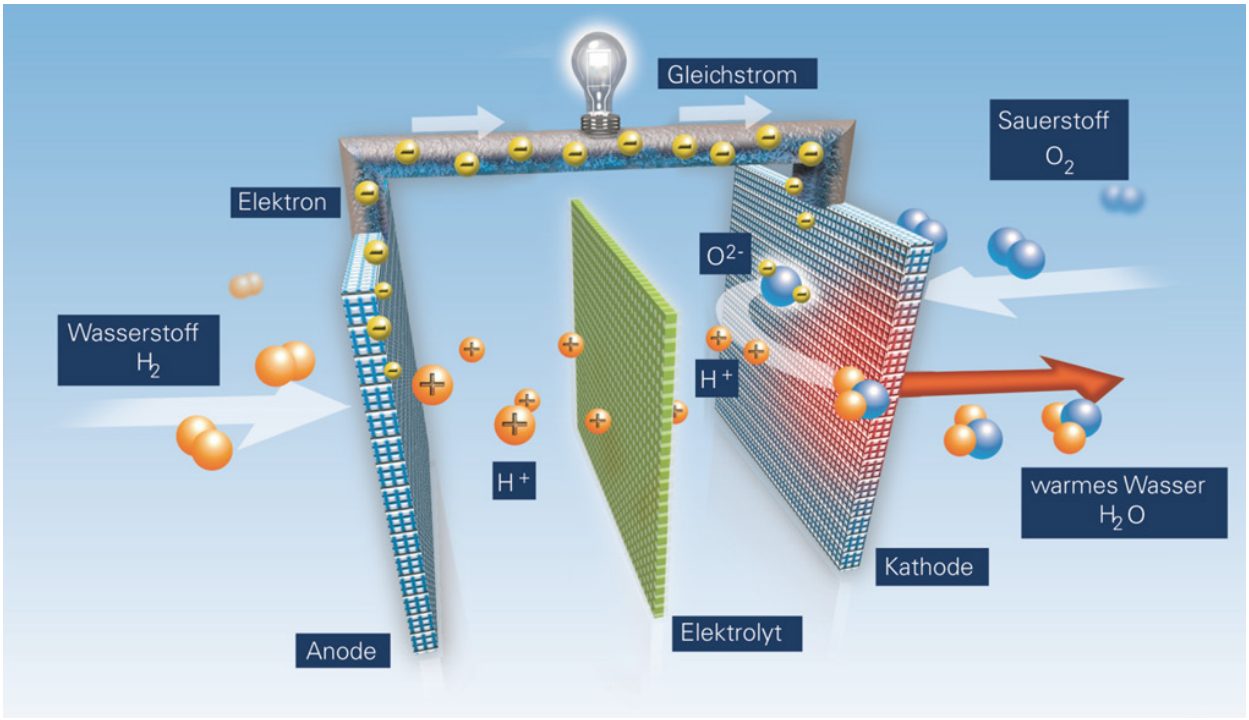


Bild 5. Funktionsaufbau einer PEFC-Brennstoffzelle (Quelle: IBZ)

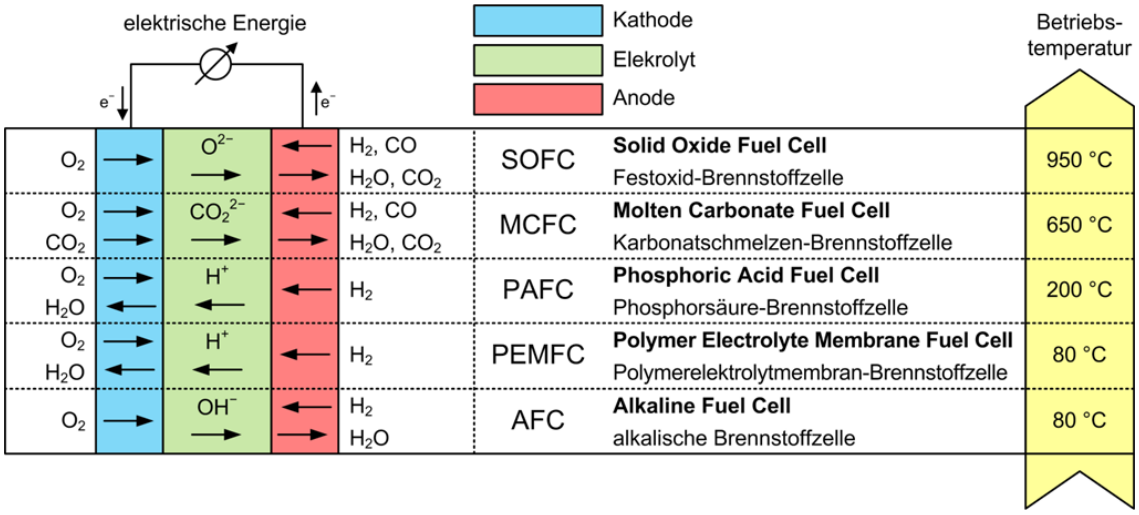


Bild 6. Vereinfachte Darstellung von verschiedenen Brennstoffzellen-Technologien (Quelle: Uni Hannover)

Für die Anwendung von Brennstoffzellen zur Kraft-Wärme-Kopplung im häuslichen Bereich, konzentrieren sich die Entwicklungsaktivitäten heute hauptsächlich auf die Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEFC) und die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC).

Die Stromkennzahl einer PEFC im Mikro-KWK-Bereich liegt bei rund 0,7 und ist im Vergleich zu den bereits verfügbaren KWK-Technologien vergleichsweise hoch. Die thermische Belastung der verwendeten Materialien ist durch die Betriebstemperatur von 80 °C dagegen gering und ermöglicht ein häufiges An- und Herunterfahren der Brennstoffzelle. Beim Einsatz von Erdgas oder anderen Kohlewasserstoffen wird bei der PEFC ein Reformer benötigt, der das Erdgas in ein Gemisch aus Wasserstoff H_2 und Kohlendioxid CO_2 umwandelt. In einer anschließenden Gasfeinreinigung wird das restliche CO mit Luftsauerstoff zu CO_2 oxidiert, da der Platinkatalysator in der PEFC nur sehr geringe Mengen an CO toleriert.

Durch die hohe Betriebstemperatur der SOFC wird bei dieser Brennstoffzelle nicht unbedingt ein vorgeschalteter Reformer benötigt, da das Erdgas direkt in der Brennstoffzelle am CO-unempfindlicheren Nickel-Katalysator der Anode aufgespalten werden kann. Wird jedoch ein zusätzlicher Reformer vorgeschaltet, so ist es möglich, Stromkennzahlen von bis zu 2,5 bei Mikro-KWK-Geräten zu erreichen, und damit liegt die SOFC sowohl im Vergleich zu den oben aufgeführten Kreisprozessen als auch zur PEFC bedeutend höher. Durch die hohen thermischen Belastungen der verwendeten Komponenten und der mangelnden Flexibilität der Materialien, können An- und Abfahrvorgänge aber nur bedingt und mit dem Risiko einer Beschädigung der Brennstoffzelle durchgeführt werden.

4 Primärenergie- und CO_2-Einsparung

Fakten in Kürze

- Mikro-KWK Anlagen sparen Primärenergie und CO_2 ein.
- Selbst im kleinsten Leistungsbereich von 1 kW_{el} können heute schon Primärenergieeinsparungen über 15 % gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme in Kraftwerk und Heizkessel erreicht werden. Bei Mikro-KWK-Anlagen mit hohem elektrischen Nutzungsgrad beträgt die Primärenergieeinsparung bis zu etwa 25 %. Mit Brennstoffzellen sind sogar noch höhere Werte möglich.
- Die mit Mikro-KWK-Anlagen erreichbaren CO_2-Einsparungen können nahezu 40 % betragen.

Mikro-KWK-Anlagen sparen ohne Zweifel sowohl Primärenergie als auch CO_2 ein. Doch wie wird das Maß der Einsparung an Primärenergie festgelegt? Wann gilt eine KWK-Anlage als hocheffizient – und damit in der Regel als förderungswürdig? Antwort gibt die Richtlinie EU 2004/8/EG, die direkt Eingang in die EU-Effizienzrichtlinie 2012/27/EG gefunden hat. Hier wird eine Methode zur Bestimmung der Primärenergieeinsparung als Maß für die Effizienz von KWK-Geräten im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme in Kraftwerk und Heizkessel festgelegt. Das in dieser Richtlinie entwickelte Bewertungsinstrument soll allen Mitgliedstaaten gleichzeitig bei der Förderung von KWK-Anlagen dienen. Zu diesem Zweck ist auch der Begriff „hocheffizient“ in der Richtlinie definiert, der angewendet werden darf, wenn die Primärenergieeinsparung der KWK-Geräte gegenüber der getrennten Erzeugung mehr als 10 % beträgt. Für Mikro-KWK-Geräte und Kleinanlagen unter 1 MW_{el} gilt bereits eine Primärenergieeinsparung größer null als hocheffizient.

In Deutschland sind diese Empfehlungen im KWK-Gesetz aufgegriffen worden, in dem ab 01.01.2009 nur noch hocheffizienten Anlagen der Anspruch auf den KWK-Zuschlag zugesprochen wird. Das 2012 in Kraft getretene und am 15.12.2014 novellierte Förderprogramm für KWK-Anlagen bis 20 kW_{el} [1] fordert ebenfalls einen Mindestwert für die Primärenergieeinsparung. Hierbei gehen die Initiatoren jedoch deutlich über das in der EU-Richtlinie definierte Kriterium der Hocheffizienz hinaus. Für KWK-Anlagen unterhalb von 10 kW_{el} wird eine Primärenergieeinsparung von mindestens 15 % und für KWK-Anlagen von 10 kW_{el} bis 20 kW_{el} sogar von 20 % verlangt.

Die in der Richtlinie 2012/27/EU aufgeführte Methode zur Berechnung der Primärenergieeinsparung von KWK-Geräten ist in Gleichung (1) bis Gleichung (3) (siehe S. 15) dargestellt. Prinzipiell ist die Primärenergieeinsparung danach über den Vergleich der thermischen und elektrischen Jahresnutzungsgrade eines KWK-Geräts mit den Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme definiert. An dieser Stelle ist bewusst von Jahresnutzungsgraden die Rede, denn die in der EU-Richtlinie verwendeten Wirkungsgradbegriffe beziehen sich auf jährliche Energiemengen und nicht auf Leistungsgrößen, die eigentlich zur Berechnung der Wirkungsgrade dienen. Somit sind die praxisnahen Anfahrverluste und eventuell geringen Umwandlungsgrade bei Teillast in der Berechnung der Primärenergieeinsparung enthalten. Die erforderlichen Nutzungsgrade der KWK-Geräte können nach DIN EN 50465*VDE 0130-310 bestimmt werden.

Die Bestimmung der Referenzwerte muss laut EU-Richtlinie sowohl auf Basis der gleichen Primärenergieträger als auch jeweils im Vergleich mit der aktuell besten, in wirtschaftlich vertretbarem Rahmen erhältlichen Technik erfolgen. Zu diesem Zweck werden in regelmäßigen Abständen harmonisierte Referenzwerte von der europäischen Kommission festgelegt und veröffentlicht. Die jüngste Definition dieser Art datiert vom 12.10.2015 [2]. Darin sind entsprechende Referenzwerte für die Nutzungsgrade der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme in Kraftwerk und Heizkessel für verschiedene Primärenergieträger aufgelistet. Geht man von einer Neuanlage aus, die mit dem Brennstoff „Erdgas“ betrieben wird, so sind Referenzwerte von 92 % für die getrennte Wärmeerzeugung im Heizkessel und von 53 % für die getrennte Stromerzeugung im Kraftwerk bei Standardtemperatur festgelegt.

Bei Betrachtung der gesamten KWK-Anlage ist zudem zu berücksichtigen, dass jegliche Wärmedeckung durch das Zusatzheizgerät die Primärenergieeinsparung schmälert. Darum sollte dieser Anteil möglichst gering ausfallen. In passend ausgelegten Mikro-KWK-Anlagen werden thermische Deckungsgrade für das KWK-Gerät zumeist von über 80 %, in verschiedenen Fällen auch über 90 %, erreicht.

Um einen Eindruck der nach dieser Methode berechneten Primärenergieeinsparung für KWK-Anlagen zu vermitteln, sind in Tabelle 1 entsprechende Werte in Abhängigkeit des thermischen und elektrischen Nutzungsgrads des KWK-Geräts sowie des Anteils der thermischen Deckung durch das KWK-Gerät α zusammengestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass selbst KWK-Anlagen mit einem vergleichsweise geringen elektrischen Nutzungsgrad eine deutliche Primärenergieeinsparung erzielen können.

CO_2-Einsparung

Die Angabe der jährlichen Einsparungen an CO_2 beim Einsatz einer KWK-Anlage muss ebenfalls im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom im Kraftwerk und Wärme in einem Heizkessel erfolgen. Dabei hängen die Berechnungsergebnisse jedoch mehr oder weniger stark von den angesetzten CO_2-Äquivalenten für die Verbrennung von Erdgas und der Stromerzeugung ab. Während der Einsatz des CO_2-Äquivalents für die Verbrennung von Erdgas mit 244 g/kWh [4] unstrittig ist, gibt es beim CO_2-Äquivalent für die Stromerzeugung unterschiedliche Vorgehensweisen. Der vom Umweltbundesamt für das Jahr 2015 veröffentlichte Wert liegt bei 528 g/kWh [5]. Aufgrund des zunehmenden Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung fällt dieser Wert stetig.

Bedenkt man jedoch, dass Strom aus KWK-Anlagen ebenso wie Strom, der auf Basis erneuerbarer Energien erzeugt wird, bei der Einspeisung in das Netz vorrangig behandelt wird, dann ist die Frage nach dem verdrängten Strom zu stellen bzw. das CO_2-Äquivalent des verdrängten Stroms anzusetzen. Anstelle des Strommixes spricht man dann vom Verdrängungsmix, und das zugehörige CO_2-Äquivalent liegt aufgrund der überwiegend auf der Verbrennung von Kohle basierenden Erzeugung deutlich höher. In der Literatur sind Werte für den CO_2-Emissionsfaktor des Strommixes von 840 g/kWh für das Jahr 2014 [6] bis 912 g/kWh für das Jahr 2012 sowie 810 g/kWh für das Jahr 2020 [7] zu finden. Die tägliche Stromerzeugung, der Verbrauch und der CO_2-Emissionsfaktor sind unter [16] einzusehen. In den letztgenannten höheren Werten ist keine Stromerzeugung in Kernkraftwerken enthalten, da es sich dabei um Grundlastkraftwerke handelt, die nur sehr wenig durch die Einspeisung von KWK-Strom betroffen sind. Die Werte können somit auch als Anhaltspunkt für die Steigerung des CO_2-Äquivalents für den Verdrängungsmix nach der Abschaltung der Kernkraftwerke dienen. Zur Verdeutlichung des Effekts und zur generellen Angabe der möglichen CO_2-Einsparungen beim Einsatz von KWK-Anlagen, sind im Folgenden für die in Tabelle 1 aufgeführten KWK-Anlagen zusätzlich die erreichten CO_2-Einsparungen zusammengestellt (siehe Tabelle 2). Dabei ist wiederum die Abhängigkeit vom Anteil der durch das KWK-Gerät erbrachten thermischen Deckung α berücksichtigt. Zudem wird für den Strommix mit einem CO_2-Äquivalent von 528 g/kWh und für den Verdrängungsmix mit einem Mittelwert von 820 g/kWh gerechnet.

Der Einfluss dieses Faktors auf die Ergebnisse ist direkt ersichtlich. Bei Ansatz des Verdrängungsmixes erhöht sich der Wert für die CO_2-Einsparung um mehr als die Hälfte des Werts, der sich für den Strommix ergibt. Generell bleibt auch hier festzuhalten, dass KWK-Anlagen mit moderatem elektrischen Nutzungsgrad ebenfalls in erheblichem Umfang zur Reduktion der CO_2-Emissionen beitragen.

Abschließend sei erwähnt, dass KWK-Anlagen ebenso mit Biomethan[3)] betrieben werden können. Mit diesem regenerativen Energieträger ist der Betrieb der KWK-Anlage CO_2-neutral, oder anders ausgedrückt wird so eine 100%ige CO_2-Einsparung erreicht.

Tabelle 1. Primärenergieeinsparung von KWK-Anlagen mit unterschiedlichen thermischen und elektrischen Nutzungsgraden (nach Gleichung (4) mit γ = 0,5 in der Berechnung von $RefE\eta$ nach Gleichung (2))

Elektrischer Nutzungsgrad des KWK-Geräts ($KWK\ E\eta$) in %	Thermischer Nutzungsgrad des KWK-Geräts ($KWK\ W\eta$) in %	Anteil des KWK-Geräts an der thermischen Deckung α in %	Primärenergieeinsparung (PEE) in %
12	85	80	12,9
12	85	100	15,4
25	65	80	17,3
30	68	80	24,6
30	68	100	27,8

[3)] Unter Biomethan, das auch als Bioerdgas bezeichnet wird, versteht man auf Erdgasqualität aufbereitetes Biogas, das auf diese Weise in das Erdgasnetz eingespeist und mit diesem an beliebigen Orten zur Verfügung steht und verwendet werden kann.

Tabelle 2. CO_2-Einsparung von KWK-Anlagen bei unterschiedlichem Ansatz des CO_2-Äquivalents für den erzeugten Strom

Elektrischer Nutzungsgrad des KWK-Geräts in %	Thermischer Nutzungsgrad des KWK-Geräts in %	Anteil des KWK-Geräts an der thermischen Deckung α in %	CO_2-Einsparung in %	
			Strommix $CO_{2\,Gas}$ = 244 g/kWh $CO_{2\,el}$ = 528 g/kWh	Verdrängungsmix $CO_{2\,Gas}$ = 244 g/kWh $CO_{2\,el}$ = 820 g/kWh
12	85	80	13,0	21,0
12	85	100	15,5	24,7
25	65	80	17,4	31,7
30	68	80	24,7	38,7
30	68	100	28,0	42,8

Berechnung der Primärenergieeinsparung von KWK-Geräten gemäß Richtlinie 2012/27/EU und von KWK-Anlagen

Nach der Richtlinie **2012/27/EU** wird die Primärenergieeinsparung von KWK-Geräten nach Gleichung (1) berechnet:

$$PEE = \left[1 - \frac{1}{\frac{KWK\,W\eta}{Ref\,W\eta} + \frac{KWK\,E\eta}{Ref\,E\eta}}\right] \cdot 100\,\% \qquad (1)$$

Dabei ist

PEE Primärenergieeinsparung des KWK-Geräts im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme in Kraftwerk und Heizkessel in %

$KWK\,W\eta$ thermischer Nutzungsgrad des KWK-Geräts als Verhältnis der jährlich erzeugten Nutzwärme zur jährlich vom KWK-Gerät verbrauchten und auf den Heizwert bezogenen Brennstoffenergie in %

$Ref\,W\eta$ thermischer Nutzungsgrad der getrennten Wärmeerzeugung im Heizkessel als Referenzwert in %

$KWK\,E\eta$ elektrischer Nutzungsgrad des KWK-Geräts als Verhältnis der jährlich erzeugten elektrischen Energie zur jährlich vom KWK-Gerät verbrauchten und auf den Heizwert bezogenen Brennstoffenergie in %

$Ref\,E\eta$ elektrischer Nutzungsgrad der getrennten Stromerzeugung im Kraftwerk als Referenzwert in %

Die Referenzwerte für die Nutzungsgrade der getrennten Wärme- und Stromerzeugung in Heizkessel und Kraftwerk können der aktuellen Festlegung der europäischen Kommission vom 12.10.2015 [2] entnommen werden. Für Neuanlagen, die mit dem Brennstoff „Erdgas“ betrieben werden, betragen die Nutzungsgrad-Referenzwerte 92 % für die getrennte Wärmeerzeugung im Heizkessel ($Ref\,W\eta$ = 92 %) und 53 % für die getrennte Stromerzeugung im Kraftwerk bei Standardtemperatur ($Ref\,E\eta_0$ = 53 %).

Während der Referenzwert für den Nutzungsgrad der getrennten Wärmeerzeugung $Ref\,W\eta$ direkt übernommen und in Gleichung (1) eingesetzt werden kann, muss der Referenzwert für den elektrischen Nutzungsgrad der getrennten Stromerzeugung noch hinsichtlich der klimatischen Verhältnisse am Aufstellungsort und der Netzverluste korrigiert werden. Diese Korrektur kann über Gleichung (2) beschrieben werden:

$$Ref\,E\eta = \left(Ref\,E\eta_0 + (15 - t) \cdot 0{,}1\right) \cdot \left(K_{Netz} \cdot \gamma + K_{eigen} \cdot (1 - \gamma)\right) \qquad (2)$$

Dabei ist

$Ref\,E\eta_0$	Referenzwert für den elektrischen Nutzungsgrad der getrennten Stromerzeugung im Kraftwerk bei Standardtemperatur (15 °C) in %
t	jährliche Durchschnittstemperatur im Mitgliedsstaat in °C
K_{Netz}	Korrekturfaktor für die vermiedenen Netzverluste bei Netzeinspeisung des erzeugten KWK-Stroms
K_{eigen}	Korrekturfaktor für die vermiedenen Netzverluste bei Eigenverbrauch des erzeugten KWK-Stroms
γ	Anteil des erzeugten KWK-Stroms, der in das Netz eingespeist wird ($0 \leq \gamma \leq 1$)

Anhand von Gleichung (2) ist zu erkennen, dass die Anpassung an die klimatischen Verhältnisse über die jährliche Durchschnittstemperatur erfolgt. Konkret wird eine Korrektur des Referenznutzungsgrads um 0,1 % je 1 Grad Abweichung von der Standardtemperatur von 15 °C vorgenommen; höhere Durchschnittstemperaturen führen zu einer Absenkung der Referenzwerte und umgekehrt. Um den Einfluss von Schwankungen der jährlichen Durchschnittstemperatur zu eliminieren, wird empfohlen, einen mehrjährigen Mittelwert einzusetzen. Für Deutschland ergibt sich basierend auf Daten des Deutschen Wetterdiensts nach [3] eine über die Jahre 2001–2010 gemittelte jährliche Durchschnittstemperatur von 9,2 °C (t = 9,2 °C). Dadurch erhöht sich der Referenzwert für den elektrischen Nutzungsgrad eines in Deutschland betriebenen modernen Erdgas-Kraftwerks von 53 % auf 53,8 %.

Bei Betrachtung der vermiedenen Netzverluste ist die Spannungsebene entscheidend, auf der das KWK-Gerät mit dem Netz gekoppelt ist. Bei einem Anschluss an die Niederspannungsebene unterhalb von 0,45 kV betragen die Korrekturfaktoren bei Netzeinspeisung K_{Netz} = 0,888 und bei Eigenverbrauch K_{eigen} = 0,851 (siehe 2012/27/EU).

Mit den eingesetzten Referenz- und Korrekturwerten ergibt sich unter den genannten Randbedingungen

- Neuanlage,
- Brennstoff „Erdgas“,
- Standort Deutschland und
- elektrische Anschlussspannung unterhalb von 0,45 kV

Gleichung (3) für die Berechnung der Primärenergieeinsparung, die nach Angabe des thermischen und des elektrischen Nutzungsgrads des Mikro-KWK-Geräts $KWK\,W\eta$ und $KWK\,E\eta$ sowie des Anteils des eingespeisten KWK-Stroms γ berechnet werden kann:

$$PEE = \left[1 - \frac{1}{\frac{KWK\,W\eta}{92\,\%} + \frac{KWK\,E\eta}{53{,}58\,\% \cdot \left(0{,}888 \cdot \gamma + 0{,}851 \cdot (1-\gamma)\right)}}\right] \cdot 100\,\% \tag{3}$$

Die Ergebnisse der bis zu diesem Punkt aufgeführten Gleichungen sind unter der Prämisse anwendbar, dass das KWK-Gerät den kompletten Wärmebedarf monovalent deckt. In der Praxis ist dieses nicht immer erreichbar, und die KWK-Anlage ist deshalb zumeist mit einem Zusatzheizgerät ausgerüstet, das die jeweils fehlende Wärmemenge bereitstellt. Deshalb ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass der Vorteil einer kompletten KWK-Anlage in punkto Primärenergieeinsparung mit abnehmendem Anteil an der Deckung des Wärmebedarfs (thermische Deckung) durch das KWK-Gerät geschmälert wird. Somit bedarf es einer Erweiterung von Gleichung (3) um genau diesen Effekt, sodass auch die Primärenergieeinsparung von KWK-Anlagen berechnet werden kann. Beschreibt man den Anteil der thermischen Deckung, die durch das KWK-Gerät erbracht wird, mit dem Prozentsatz α derart, dass ein Wert von 100 % den Fall beschreibt, in dem der Wärmebedarf vollständig durch das KWK-Gerät gedeckt wird, und nimmt man weiterhin an, dass der thermische Nutzungsgrad des Zusatzheizgeräts dem Referenzwert $Ref\,W\eta$ entspricht, ergibt sich die erweiterte Gleichung zur Berechnung der Primärenergieeinsparung von KWK-Anlagen wie folgt:

$$PEE = \left[1 - \frac{1 + \left(\frac{100-\alpha}{\alpha}\right)\frac{KWK\,W\eta}{Ref\,W\eta}}{\frac{KWK\,E\eta}{Ref\,E\eta} + \frac{KWK\,W\eta}{Ref\,W\eta} \cdot \frac{100}{\alpha}}\right] \cdot 100\,\% \tag{4}$$

Die Größen $KWK\,E\eta$, $KWK\,W\eta$, $Ref\,E\eta$ und $Ref\,W\eta$ sind wiederum entsprechend den Anmerkungen zu Gleichung (1) sowie den zugehörigen Erläuterungen bezüglich der Referenzwirkungsgrade einzusetzen. Es ist zu erkennen, dass die Primärenergieeinsparung nach Gleichung (4) in das Ergebnis von Gleichung (1) übergeht, wenn eine vollständige Deckung des Wärmebedarfs durch das KWK-Gerät angenommen wird, α also 100 % beträgt. Im umgekehrten Fall (α = 0 %) wird die Primärenergieeinsparung zu null.

5 Potenziale und Anwendungsbereiche

Fakten in Kürze

- Mikro-KWK-Anlagen können sowohl in Ein- und Zwei- als auch Mehrfamilienhäusern und Gewerbebetrieben einen großen Teil der elektrischen und thermischen Grundlast erzeugen.
- Jährlich werden ca. 700.000 Heizsysteme installiert, davon entfielen 2018 jeweils nur ca. 0,3 % auf Mikro-KWK-Anlagen. Bis 2030 wird ein Anteil von ca. 5 % erwartet.
- Da knapp 50 % des bundesdeutschen Baubestands mit Erdgas versorgt wird, ist die Infrastruktur bezüglich des Erdgaseinsatzes für die Mikro-KWK vorhanden.
- Mikro-KWK-Anlagen kommen überwiegend bei der Sanierung zum Einsatz. Die Infrastruktur für Brennstoff und Wärme- sowie Trinkwassererwärmung kann in der Regel beibehalten werden.

5.1 Potenziale für Mikro-KWK

Der bundesdeutsche Gebäudebestand umfasst laut Statistischem Bundesamt Ende 2017 ca. 17,4 Mio. Gebäude. Davon sind ca. 16,3 Mio. Ein-, Zwei- und Dreifamilienhäuser sowie 3 Mio. Mehrfamilienhäuser mit mehr als drei Wohneinheiten [17]. Zusätzlich existieren etwa 1,5 Mio. Nichtwohngebäude, die überwiegend gewerblich oder kommunal genutzt werden. Bild 7 zeigt die Struktur der Wohngebäude (Ein- und Mehrfamilienhäuser) in Deutschland.

Nicht alle Gebäude werden mit einem eigenen Wärmeerzeuger oder einer Zentralheizung versorgt. Etwa 22 % des Wohnungsbestands verwenden Fernwärme oder werden mit Wärme aus Strom und sonstigen Energieträgern wie Kohle und Koks versorgt. Erdgasbasierte Heizwärmeerzeugung macht knapp 50 %, Heizöl als Energieträger ca. 30 % Anteil aus. Bild 8 zeigt die Entwicklung der Beheizungsstruktur in Deutschland. Der größte Teil der erdgasversorgten Objekte sowie ein Teil der Objekte, die Heizöl als Energieträger nutzen, kommen für Mikro-KWK infrage. Auch in energieeffizienten Neubauten eignen sich Mikro-KWK-Anlagen in Verbindung mit Nahwärmenetzen.

Im Schnitt der letzten zwölf Jahre wurden jährlich ca. 670.000 Heizwärmeerzeuger pro Jahr verkauft und installiert (siehe Bild 9). Zunehmend erschließen sich vor allem Wärmepumpen einen Marktanteil. Auch die Mikro-KWK-Technologie wird diese Entwicklung hin zu ökologischen und effizienten Heizungssystemen unterstützen.

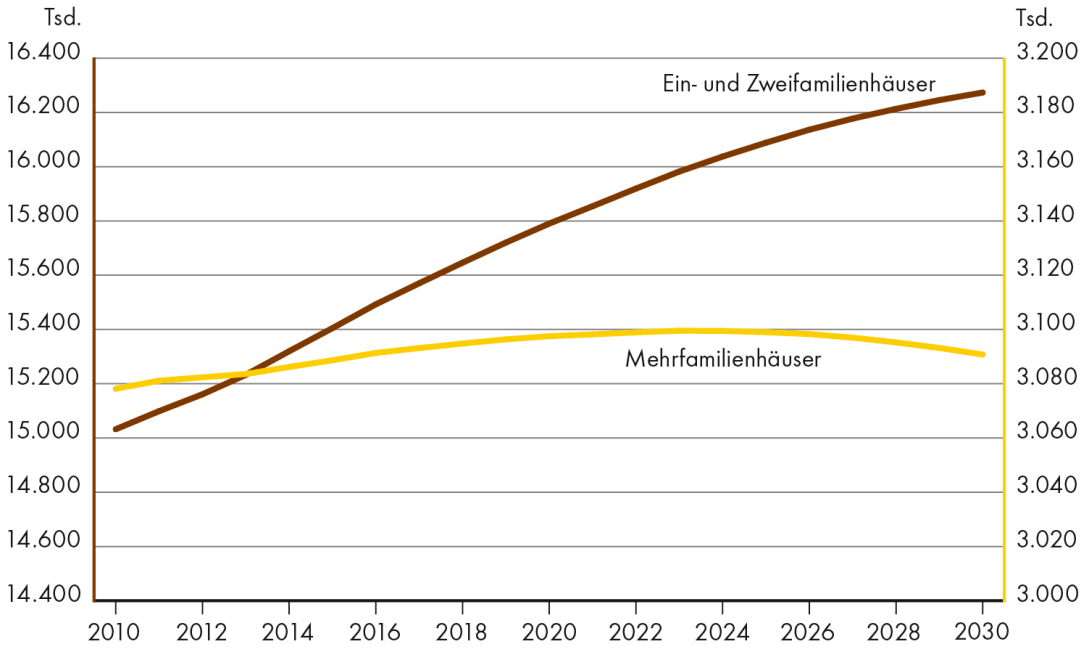


Bild 7. Bestand der Wohngebäude in Deutschland, 2010 (Quelle: [17], HWWI)

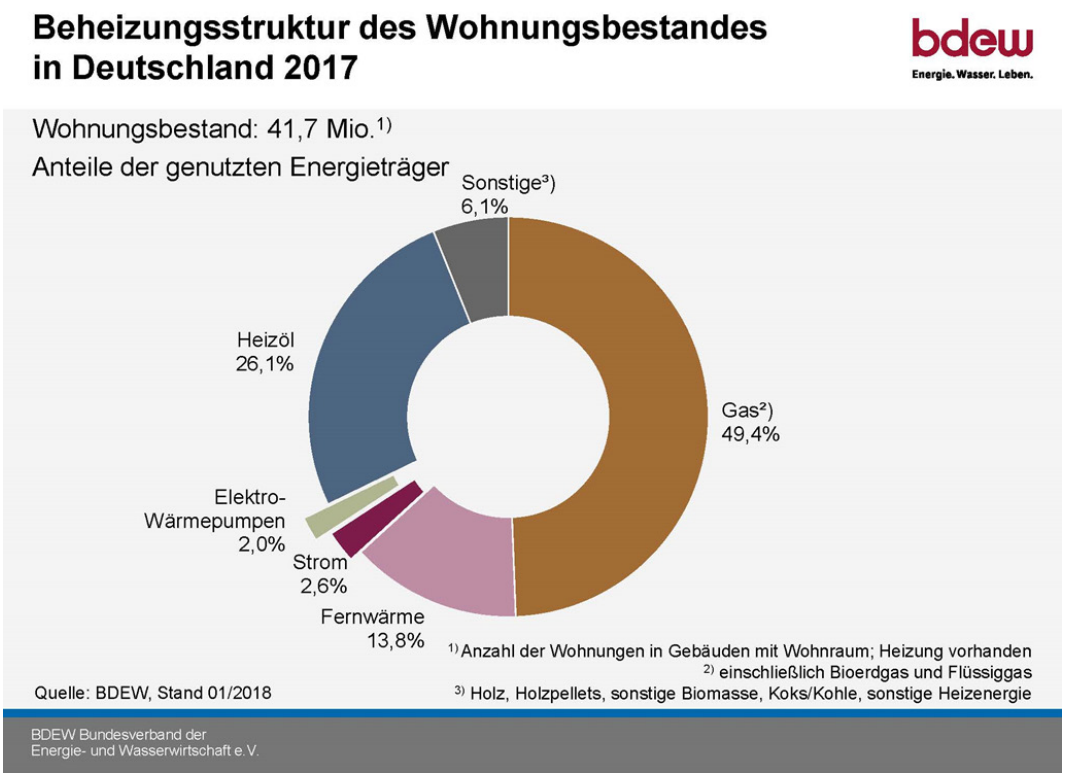


Bild 8. Beheizungsstruktur des Wohnungsbestands in Deutschland (Quelle: BDEW)

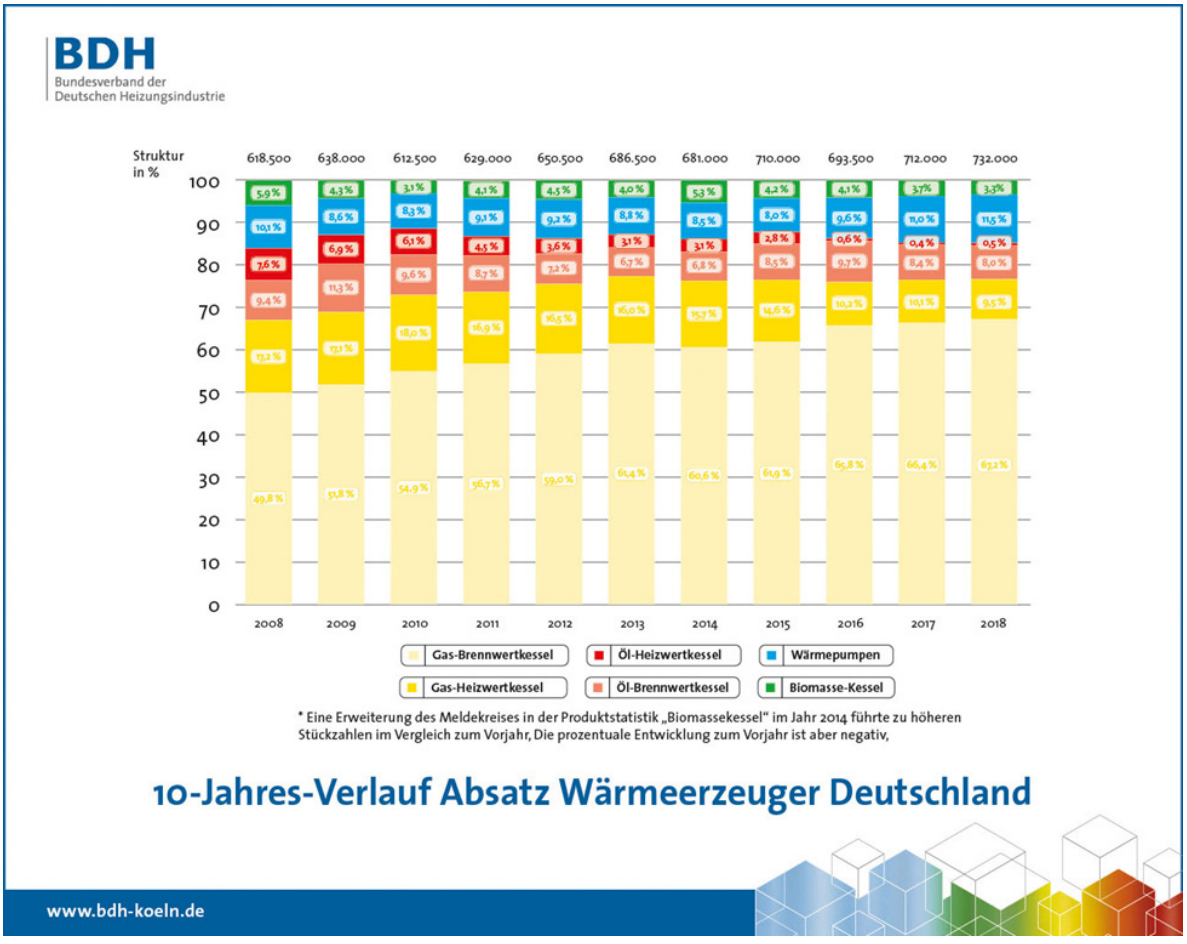


Bild 9. Marktentwicklung Wärmeerzeuger 2008-2018 (Quelle: BDH)

Tabelle 3. Anzahl der beim BAFA zugelassenen neuen, modernisierten und nachgerüsteten KWK-Anlagen [a] nach Größenklassen und Inbetriebnahmejahren (Stand 18.03.2019)

Elektrische Leistung	2014		2016		2018 [b]	
	Anzahl	Zubau in MWel	Anzahl	Zubau in MWel	Anzahl	Zubau in MWel
≤ 2 kW bis ≤ 10 kW	4.165	16,42	3.065	12,06	2.254	6,23
› 10 kW bis ≤ 50 kW	3.142	222,75	2.276	175,36	812	29,54
› 50 kW bis ≤ 2 MW [c]	199	223,99	236	293,08	8	10,12
	7.506	462,66	5.577	480,50	3.074	45,89

a) Es sind neben aktuell zuschlagsberechtigten Anlagen auch jene enthalten, die zugelassen wurden, jedoch keinen Förderanspruch mehr aufweisen (Erreichen der max. Vollbenutzungsstunden).

b) Die ausgewiesenen Zulassungszahlen sind nur sehr eingeschränkt aussagekräftig, da Zulassungsanträge noch fristgerecht bis zum 31.12.2018 eingereicht werden können/konnten und nicht alle eingegangenen Anträge abschließend geprüft wurden.

c) Mit dem KWKG 2016 gibt es ab 100 kW_{el} auf den Eigenverbrauch keine Förderung mehr. Daher gibt es für einen kompletten Selbstversorger (100 % Eigenverbrauch) keinen Grund mehr sich bei der BAFA zu melden, weshalb die Zahlen nicht mehr die gesamte reale Menge erfassen.

5.2 Realisierte KWK-Anlagen

Der durchschnittliche jährliche Zubau von Mikro-KWK-Anlagen bis 10 kW betrug in den Jahren 2009 und 2010 2.340 Stück. Das entspricht etwa 0,5 % aller jährlich installierten Heizsysteme. Im Jahr 2018 betrug der Absatz von Mikro-KWK-Geräten ca. 2.200 Stück (vgl. Tabelle 3). Dies entspricht einem Anteil von rund 0,3 % aller im Jahr 2018 verkauften Heizsysteme. Unter günstigen Rahmenbedingungen prognostizieren die Hersteller einen jährlichen Zuwachs von etwa 35.000 Anlagen (< 10 kW_{el}) im Jahr 2030. Das entspräche ca. 5 % des jährlichen Heizgeräteabsatzes von geschätzt ca. 700.000 Stück.

5.3 Anwendungsbereiche

Mikro-KWK ist für einen sinnvollen Betrieb immer dort einsetzbar, wo ein Bedarf an elektrischer und thermischer Energie besteht. Für das Leistungsspektrum der Mikro-KWK kommen Gebäude infrage, die idealerweise einen ganzjährigen Wärmebedarf benötigen.

In den klassischen Anwendungsgebieten dienen Mikro-KWK-Anlagen primär der Bereitstellung von Heizwärme und Trinkwarmwasser. Vorteil ist, dass ein ausreichend hohes Temperaturniveau (50 °C bis 80 °C) erzeugt wird. Das erlaubt die Verwendung der bestehenden Heizflächen. Als Energieträger dienen meist Erdgas, Flüssiggas, Bio-Erdgas oder Heizöl. Bei Umstellung von konventioneller Heizung auf Mikro-KWK kann somit die Infrastruktur des Energieträgers beibehalten werden. Mikro-KWK eignet sich also gut für die Sanierung von Heizsystemen in bestehenden Gebäuden. Typische Anwendungsgebiete sind somit:

- Ein- und Mehrfamilienhäuser
- kleine Gewerbebetriebe
- kommunale Einrichtungen

Zu den Anwendungen außerhalb der reinen Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarfsdeckung zählen Sonderanwendungen wie die Erzeugung von Prozesswärme für Produktionsprozesse oder die Klimatisierung mittels Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.

Ein- und Zweifamilienhäuser

Hier werden Mikro-KWK-Geräte mit 1 kW bis 2 kW elektrischer und 3 kW bis 10 kW thermischer Leistung auf Basis des Otto- und Stirlingmotors sowie künftig zunehmend Brennstoffzellen-Technologie eingesetzt. Zur Deckung der thermischen Spitzenlast verfügen die Anlagen über Spitzenlast-Wärmeerzeuger. Ein Pufferspeicher mit einem Inhalt von 300 bis 1.000 Liter speichert die Wärme und stellt diese für Heizung und Trinkwassererwärmung zur Verfügung. Dadurch wird eine gleichmäßige Auslastung des Mikro-KWK-Geräts gewährleistet und eine gewisse Entkopplung von Wärme- und Stromerzeugung erreicht. Bild 10 zeigt ein beispielhaftes Anlagenschema einer Mikro-KWK-Anlage in einem Einfamilienhaus.

Der Einsatzbereich erstreckt sich von 10.000 kWh/a bis ca. 40.000 kWh/a Wärmebedarf. Der Strombedarf in diesen Objekten ist geprägt von privater Nutzung, üblicherweise zwischen 3.000 kWh bis 10.000 kWh pro Jahr. Die Mikro-KWK-Anlagen erzeugen zwischen 2.000 kWh und 6.000 kWh Strom pro Jahr, wovon 40 % bis 70 % von den Nutzern im Gebäude selbst verbraucht werden.

Mehrfamilienhäuser

In Mehrfamilienhäusern kommen aufgrund des größeren Wärme- und Strombedarfs Mikro-KWK-Geräte von ca. 3 kW bis 15 kW elektrischer und 10 kW bis 30 kW thermischer Leistung zum Einsatz. Diese, überwiegend motorisch betriebenen KWK-Geräte erzeugen dort 10.000 kWh bis 60.000 kWh Strom pro Jahr. Vorteilhaft ist der ganzjährige Trinkwarmwasserverbrauch, dessen Erzeugung für eine Auslastung der Mikro-KWK-Geräte auch im Sommer sorgt. In Mehrfamilienhäusern erreichen KWK-Geräte teilweise über 6.000 Volllaststunden pro Jahr. Immer erforderlich ist ein Spitzenlastkessel, der im Winter die notwendige Heizleistung an kalten Tagen sicherstellt. Eine Mikro-KWK-Anlage im Mehrfamilienhaus ist dann besonders wirtschaftlich, wenn der erzeugte Strom überwiegend im Objekt genutzt, das heißt an die Bewohner (Mieter oder Wohnungseigentümer) weitergegeben werden kann. Bild 11 zeigt die Wärme- und Stromverteilung in einem Mehrfamilienhaus bei Nutzung des KWK-Stroms durch Mieter.

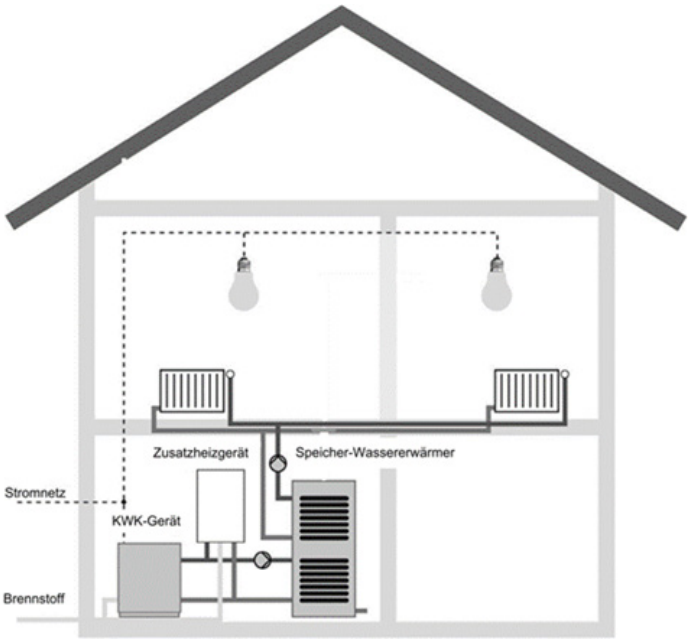


Bild 10. Mikro-KWK im Einfamilienhaus (Quelle: VDI 2077 Blatt 3.1)

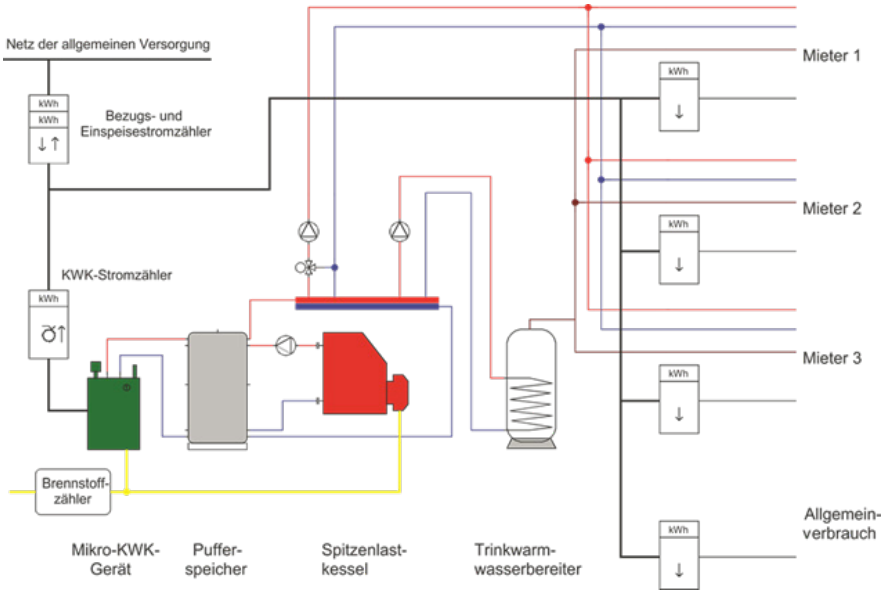


Bild 11. Wärme- und Stromverteilung im Mehrfamilienhaus bei Nutzung des KWK-Stroms durch Mieter (Quelle: Senertec)

Hierzu sind energiewirtschaftliche, miet- und vertragsrechtliche Rahmenbedingungen zu beachten, die im folgenden Abschnitt analysiert werden. Erfahrungen haben gezeigt, dass bei idealen Bedingungen und Auslegungen der KWK-Anlage bis zu 70 % des erzeugten KWK-Stroms innerhalb des Gebäudes von Mietern und Wohneigentümern genutzt werden können.

Gewerbeanwendung und Bereitstellung von Prozesswärme

KWK kann auch in Anwendungen außerhalb der reinen Heizwärme- und Trinkwarmwasserbereitstellung eingesetzt werden. Für Fertigungs- und Produktionszwecke wird z. B. Prozesswärme benötigt. Ihre Merkmale sind eine sehr konstante Last und ein hoher Produktionskostenfaktor. Für die Erzeugung von Prozesswärme mit einem Temperaturniveau von ca. 60 °C bis 80 °C ist der Einsatz von Mikro-KWK wirtschaftlich und effizient. Der Einsatz ist jedoch aufgrund dieses maximalen Temperaturniveaus begrenzt.

Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)

In jüngster Zeit werden Mikro-KWK-Geräte auch dazu genutzt, aus der produzierten Wärme mittels Adsorptions- oder Absorptionsprozessen Kälte zu erzeugen. Hierbei wird anstatt kostenintensiver elektrischer Energie Wärme als Antriebsenergie für den Kälteprozess genutzt. Aus 1 kW Wärme bei einem Temperaturniveau von > 60 °C entsteht bis ca. 0,8 kW Kälte mit ca. 10 °C, die für die Klimatisierung verwendet werden kann. Die entstehende Niedertemperaturabwärme kann gleichzeitig noch für die Vorwärmung von Trinkwarmwasser oder z. B. für die Aufheizung von Schwimmbädern eingesetzt werden. Bild 12 zeigt das Schaltbild einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlage.

Eine Adsorptions- oder Absorptionskälteanlage erhöht die jährliche Ausnutzung eines Mikro-KWK-Geräts. Anstatt Elektrizität für die Klimatisierung zu verbrauchen, wird diese erzeugt. Für die KWKK kommen im Prinzip alle Anwendungen infrage, bei denen hohe Komfortansprüche umweltschonend erfüllt werden müssen. Die Geräte stehen im Kälteleistungsbereich von 10 kW bis 30 kW zur Verfügung, passen also ideal zu Mikro-KWK-Anlagen.

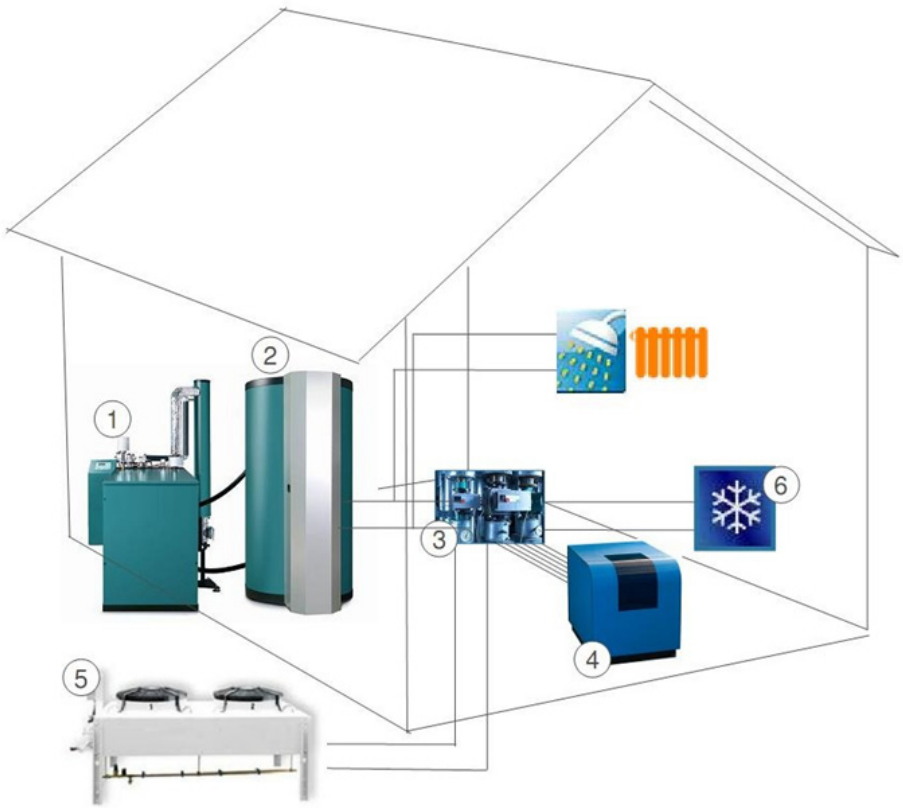


Bild 12. Schaltbild einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlage (Quelle: Senertec)

1 Mikro-KWK-Gerät
2 Wärmespeicher
3 Kälteregelung
4 Adsorptions-Kälteanlage
5 Rückkühler
6 Kälteverteilsystem

6 Planung und Betriebsweisen von Mikro-KWK-Anlagen

Fakten in Kürze

- Der wirtschaftliche Betrieb einer Mikro-KWK-Anlage setzt eine individuelle sowie objektspezifische Planung und Dimensionierung voraus. Die Richtlinie VDI 4656 inklusive Berechnungsprogramm unterstützt Fachhandwerk oder Fachplaner hierbei.
- Eine KWK-Anlage wird standardmäßig wärmegeführt. Durch eine überlagerte Stromorientierung werden der Anteil der Eigenstromnutzung und damit die Wirtschaftlichkeit des Systems deutlich gesteigert.

Die KWK-Anlage besteht aus den Komponenten (siehe Bild 13)

- KWK-Gerät,
- Zusatzheizgerät, das auch integriert sein kann, und
- Wärmespeicher.

Der wirtschaftliche Betrieb einer Mikro-KWK-Anlage setzt eine objektspezifische Planung und individuelle Dimensionierung voraus. Die zugehörigen Planungsschritte werden in der Richtlinie VDI 4656 „Planung und Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen“ beschrieben. Das der Richtlinie beiliegende Berechnungsprogramm unterstützt den Planer bei den notwendigen Variationsrechnungen und ermöglicht so, verschiedene KWK-Anlagen unter gleichen Rahmenbedingungen zur Versorgung eines Objekts zu vergleichen. Bild 14 zeigt die Struktur des Berechnungsprogramms gemäß VDI 4656 auf.

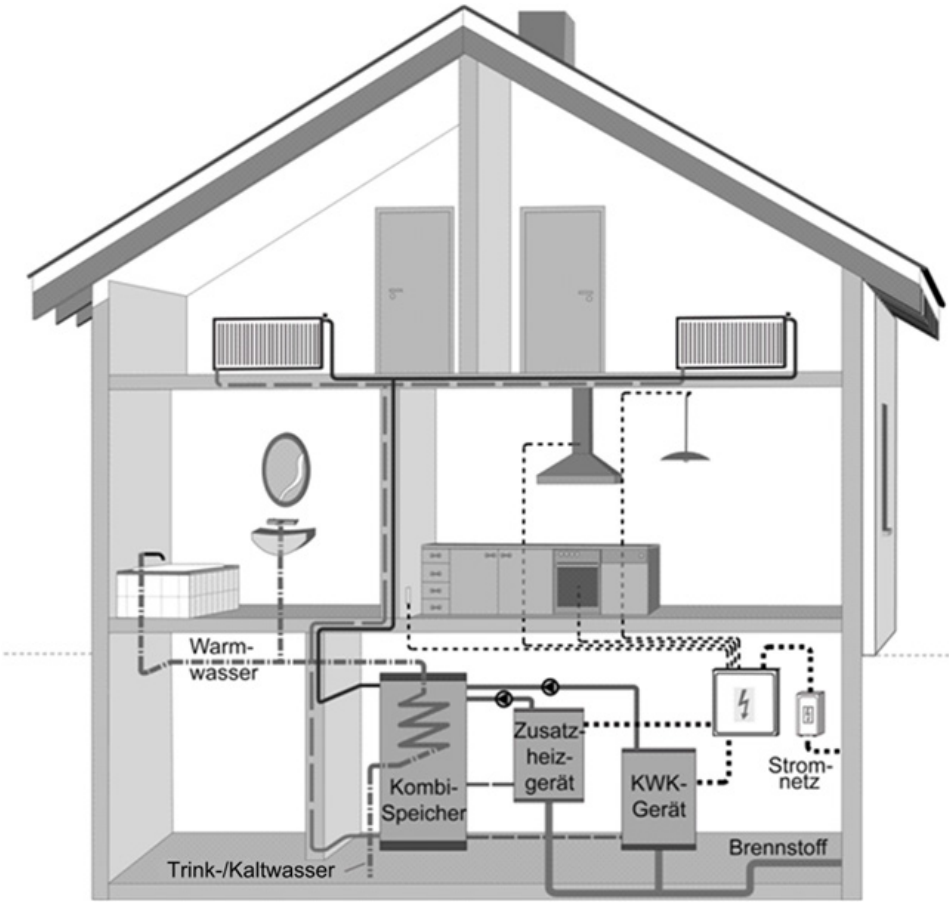


Bild 13. KWK-Gerät, Zusatzheizgerät und Wärmespeicher in einem Wohnobjekt (Quelle: VDI 4656)

Die objektspezifischen Bedarfslastgänge werden gemäß der Richtlinie VDI 4655 „Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“ ermittelt. Hierbei werden zehn Typ-Tagekategorien (siehe Tabelle 4) mit der objektspezifischen Klimazone und den tatsächlichen Jahresverbräuchen für Strom-, Heizwärme- und Trinkwarmwasser des Objekts verknüpft.

Die Rahmenbedingungen zur Regelung des Mikro-KWK-Systems[4)] werden dabei durch die in der Planung festgelegten Komponenten und Dimensionierungen bestimmt. Fehler im Planungs- oder Dimensionierungsprozess können im Nachhinein durch die Regelung des Systems nur bedingt ausgeglichen werden und führen stets zu ökologischen und ökonomischen Effizienzeinbußen.

Das Betriebsverhalten von KWK- und Zusatzheizgerät wird durch den Wärmebedarf der Heizung und des Warmwasser- sowie Strombedarfs des Objekts und den hinterlegten Regelungsstrategien im KWK-Gerät geprägt. Bei den Regelungsstrategien wird grundsätzlich zwischen wärmegeführt und stromorientiert unterschieden.

In der wärmegeführten Betriebsweise wird die KWK-Anlage ausschließlich am thermischen Zustand des Systems ausgerichtet. Die aktuell in mehreren Schichten gemessenen Temperaturen des Warmwasserspeichers werden dabei regelmäßig mit den vorliegenden Temperatur-Sollwerten für die Heizkreise und das Trinkwarmwasser verglichen. Unterschreitet der Ist- den Sollwert um einen festgelegten Betrag (Einschalthysterese-KWK) so wird das KWK-Gerät aktiviert. Sinkt die Temperatur im Speicher weiter ab (Einschalthysterese-Zusatzheizgerät), so wird zusätzlich zum KWK-Gerät das Zusatzheizgerät aktiviert, um den Wärmekomfort des Objekts zu gewährleisten.

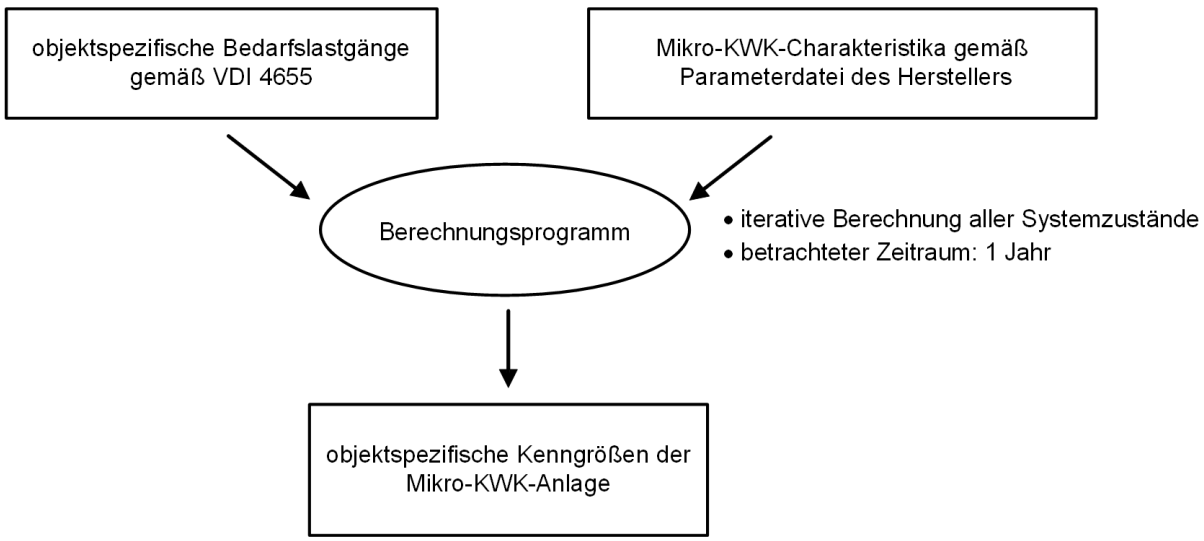


Bild 14. Struktur des Berechnungsprogramms gemäß VDI 4656

Tabelle 4. Typ-Tagekategorien gemäß VDI 4655

Jahreszeit	Werktag W		Sonntag S	
	Heiter H	Bewölkt B	Heiter H	Bewölkt B
Übergang Ü	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB
Sommer S	SWX		SSX	
Winter W	WWH	WWB	WSH	WSB

[4)] Ein KWK-System beinhaltet zusätzlich zur KWK-Anlage auch die elektrischen und thermischen Verbraucher des Objekts.

Steigt nun die im thermischen Speicher gemessene Temperatur wieder an, wird zuerst das Zusatzheizgerät bei Erreichen eines ersten Temperatur-Schwellwerts (Abschalthysterese-Zusatzheizgerät) deaktiviert. Steigt die gemessene Temperatur weiter an, wird auch das KWK-Gerät nach Überschreitung eines zweiten Schwellwerts (Abschalthysterese-KWK) deaktiviert. Die beschriebenen Hysteresen stellen geringe Taktraten sowie einen priorisierten Betrieb und damit lange Laufzeiten des KWK-Geräts sicher. Das Konzept ist einfach sowie robust und gewährleistet die Wärmeversorgung des Objekts mit vergleichsweise geringem Aufwand. Bild 15 zeigt die täglichen Betriebsstunden eines Mikro-KWK-Geräts mit integriertem Spitzenlastbrenner im Jahresverlauf. Hydraulik (siehe Bild 16) und Regelstrategie sind aufeinander abgestimmt.

Nachteilig ist zu bewerten, dass auch die Generierung elektrischer Energie auf Basis der Speichertemperaturen erfolgt; eine Ausrichtung der Stromerzeugung am lokalen Stromverbrauch im Objekt ist somit nicht gegeben. Die Eigenstromnutzung im Objekt fällt geringer aus als möglich, sodass die wirtschaftlichen Vorteile des KWK-Geräts nicht voll ausgeschöpft werden.

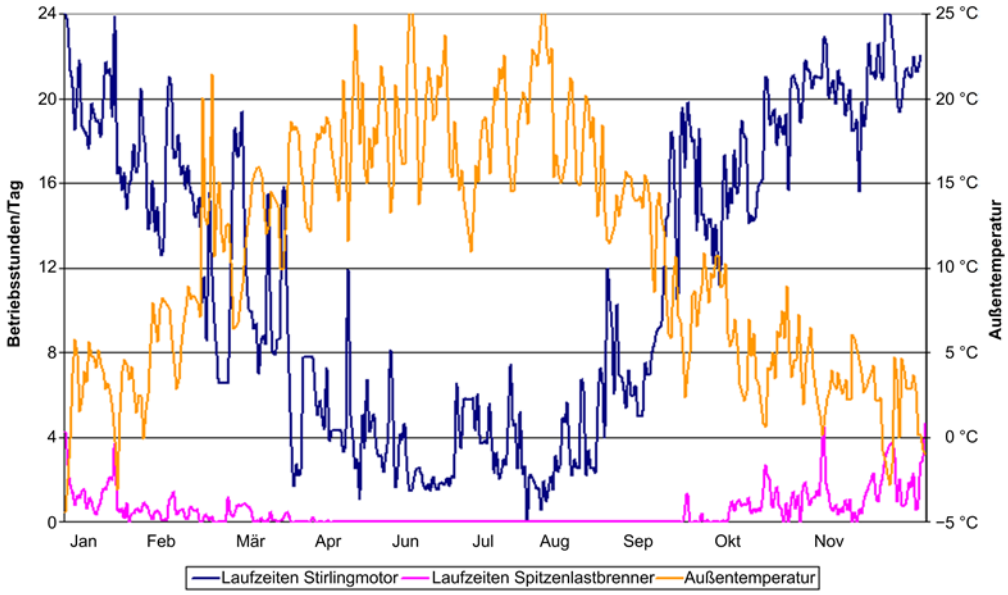


Bild 15. Tägliche Betriebsstunden von einem Mikro-KWK-Gerät auf Stirlingbasis mit integriertem Spitzenlastbrenner im Jahresverlauf in Abhängigkeit der Außentemperatur (Quelle: Senertec)

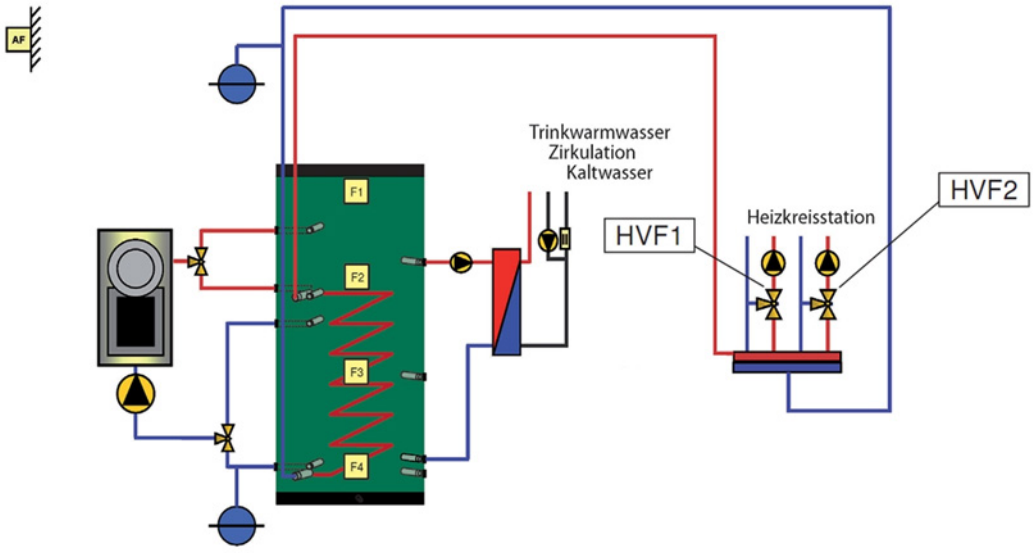


Bild 16. Hydraulik einer Mikro-KWK-Anlage (Quelle: Senertec)

In der stromorientierten Betriebsweise wird zusätzlich zu der oben beschriebenen Messung der Speichertemperaturen auch der aktuelle Strombedarf des Objekts über „Smart Meter“ messtechnisch erfasst. Der Betrieb des KWK-Geräts kann so – neben der Sicherung des Wärmekomforts – zusätzlich am lokalen Strombedarf ausgerichtet werden. Auf diese Weise wird der Anteil der Eigenstromnutzung deutlich gesteigert und somit ein möglichst wirtschaftlicher Betrieb des KWK-Geräts sichergestellt. Der optimierte Eigennutzungsanteil reduziert weiterhin die Inanspruchnahme des Niederspannungsnetzes auf das notwendige Maß.

Die Eigenstromnutzung und deren wirtschaftliche Bedeutung sollen hier noch genauer betrachtet werden. Die im KWK-Gerät generierte elektrische Leistung wird – abhängig von der aktuellen elektrischen Last im Gebäude – zu einem Anteil im Haushalt selber verbraucht (Eigenstromnutzung). Die Differenz zwischen aktueller Erzeugung im KWK-Gerät und elektrischer Last im Gebäude wird dann mit dem elektrischen Versorgungsnetz ausgetauscht.

Im Beispiel von Bild 17 wird im KWK-Gerät eine elektrische Leistung von 1.000 W bereitgestellt; 200 W werden im Gebäude selbst verwendet, die übrigen 800 W werden in das Stromnetz gespeist.

Im zweiten Zahlenbeispiel (Bild 18) werden ebenfalls 1.000 W im KWK-Gerät bereitstellt. Da der aktuelle Bedarf im Gebäude aber 1.200 W beträgt, wird die gesamte bereitgestellte Leistung von 1.000 W im Gebäude verbraucht und die noch fehlenden 200 W aus dem öffentlichen Netz bezogen.

Die eigenverbrauchte Kilowattstunde ersetzt die ansonsten aus dem elektrischen Netz bezogene Energie, kann also mit ca. 25 ct/kWh bewertet werden. Für die eingespeiste Kilowattstunde werden der übliche Preis (Quartalsmittelwert an der Leipziger Strombörse) sowie die vermiedenen Netznutzungsentgelte (VNN) angesetzt. Die VNN betragen je nach Netzgebiet ca. 0,5 ct/kWh bis 1,0 ct/kWh. Um die wirtschaftlichen Situationen vergleichen zu können, benötigt man den Arbeitspreis für den Strombezug aus dem Netz, die etwaigen Förderungen für eigenverbrauchten und ins Netz eingespeisten Strom, den üblichen Preis zum Stromverkauf bei Einspeisung in das öffentliche Netz (KWK-Index EEX Börse Leipzig), als auch die vermiedenen Netznutzungsentgelte (VNN).

Obwohl die im KWK-Gerät generierte elektrische Leistung in beiden obigen Fällen mit 1.000 W identisch ist, ergibt sich durch den unterschiedlich hohen Eigennutzungsanteil eine nachhaltige Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit des KWK-Systems. Erreicht wird ein hoher Eigenstromanteil durch die oben beschriebene stromorientierte Betriebsweise.

Tabelle 5 zeigt die Erlöse nach den Zahlenbeispiel 1 und Zahlenbeispiel 2 im Vergleich.

Mit der hohen Flexibilität in der Betriebsweise aktuell marktverfügbarer Mikro-KWK-Anlagen können über die lokal wärmegeführte oder stromorientierte Betriebsweise hinaus auch Systemdienstleistungen für das elektrische System angeboten werden. Diese werden in Abschnitt 9 vorgestellt

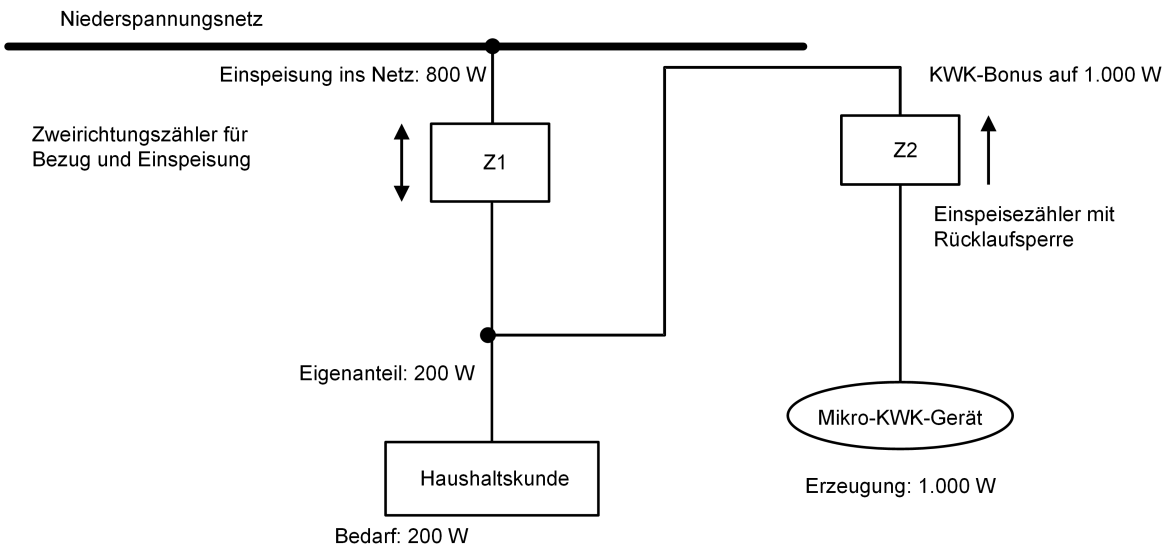


Bild 17. Messprinzip zur Eigenstromnutzung gemäß VDE-AR-N 4105, Zahlenbeispiel 1

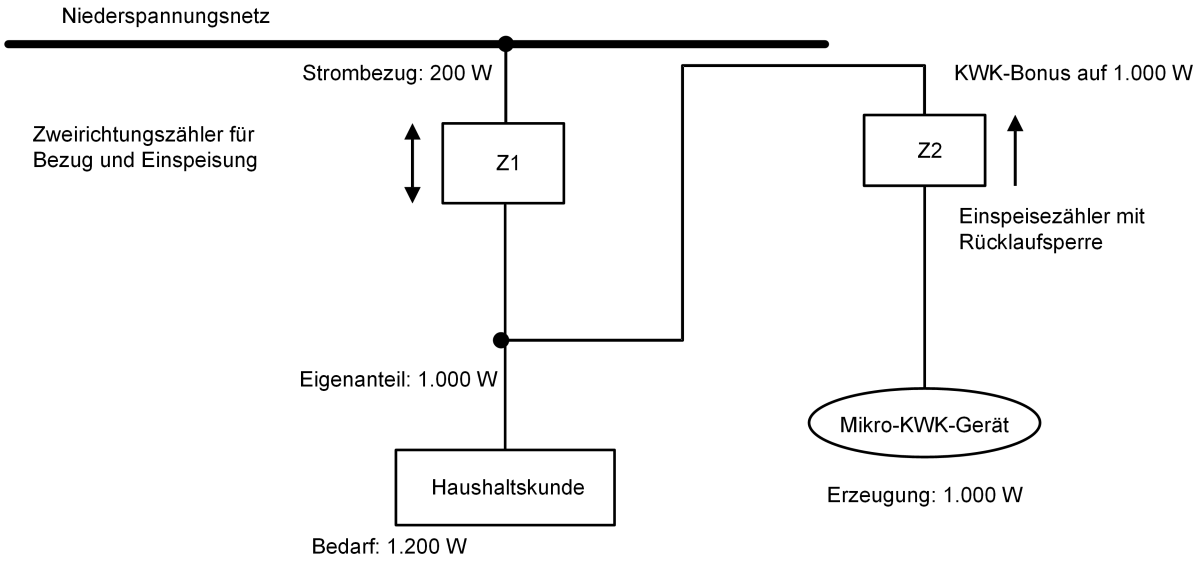


Bild 18. Messprinzip zur Eigenstromnutzung gemäß VDE-AR-N, Zahlenbeispiel 2

Tabelle 5. Erlöse nach Zahlenbeispielen

	Beispiel 1	Beispiel 2
Erlöse aus Eigenverbrauch (Annahme 25 ct/kWh)	200 W x 6.000 h x 0,25 €/kWh = 300 €	1000 W x 6.000 h x 0,25 €/kWh = 1.500 €
Erlöse aus Stromverkauf (EEX) (Annahme 4,4 ct/kWh – Mittelwert 2018)	800 W x 6.000 h x 0,044 €/kWh = 211 €	0 €
Erlöse aus KWK-Zuschlag Eigenverbrauch (Annahme 4 ct/kWh – gemäß KWKG 2016)	200 W x 6.000 h x 0,04 €/kWh = 48 €	1000 W x 6.000 h x 0,04 €/kWh = 240 €
Erlöse aus KWK-Zuschlag Einspeisung (Annahme 8 ct/kWh – gemäß KWKG 2016)	800 W x 6.000 h x 0,08 €/kWh = 384 €	0 €
Erlöse aus VNN (Annahme 0,5 ct/kWh – variiert je nach Standort)	800 W x 6.000 h x 0,005 €/kWh = 24 €	0 €
SUMME Erlöse	967 €	1.740 €

EEX: European Energy Exchange; VNN: Vermiedene Netznutzungsentgelte

7 Abrechnungstechnische Modelle und Contracting

Fakten in Kürze

- Die Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK erhöht sich, wenn der produzierte KWK-Strom im Objekt verwendet wird.
- Die Wertigkeit der Eigenstromverwendung orientiert sich an den vermiedenen Strombeschaffungskosten. Im Vergleich zur Einspeisung ins Netz gemäß KWKG ergibt sich ein Faktor von derzeit ca. 2,5.
- Für den Einsatz im Mehrfamilienhaus eignet sich das „Summenzählermodell“, das die im KWKG beschriebenen virtuellen Zählpunkte nutzt.
- Da beim Einsatz einer KWK-Anlage gleichzeitig Wärme und Strom produziert werden, ist zur Bestimmung der umlagefähigen Kosten im Sinne der Heizkostenverordnung eine eindeutige Ermittlung des Aufwands für die Wärmeerzeugung erforderlich. Die Richtlinie VDI 2077 Blatt 3.1 beschreibt rechnerische und messtechnische Methoden, mit der diese Aufteilung vorgenommen werden kann.
- Ein Instrument zur Auflösung des aktuell vorhandenen Investitionsstaus ist das Contracting. Die Pflicht zur Zahlung der EEG-Umlage, die nur für Contracting, nicht aber beim Eigenbetrieb gilt, stellt jedoch ein wesentliches Hemmnis zur Markteinführung von Contracting-Lösungen dar.
- In einer Contracting-Lösung übernimmt ein Energiedienstleister die Objektversorgung mit Strom und Wärme, wobei Planung, Errichtung, Finanzierung, Betrieb sowie Wartung und Instandhaltung vom Contractor als Komplettpaket angeboten werden. Die gesamte Komplexität und das wirtschaftliche Risiko bezüglich Investition und Betrieb werden vom Endkunden auf den Contractor übertragen.

7.1 Verwendung von KWK-Strom in Einfamilienhäusern

Beim Einsatz von KWK-Anlagen fließt die erzeugte Elektrizität über den kürzesten Weg vom Erzeuger zum Verbraucher. Eine KWK-Anlage kann jedoch nie exakt die Elektrizität produzieren, die aktuell vor Ort nachgefragt wird. Ist der elektrische Verbrauch im Haus höher als die aktuelle Erzeugung der KWK-Anlage, muss der Strombedarf aus dem Netz gedeckt werden. Ebenso kann der Stromverbrauch im Haus auch geringer als die Erzeugung sein, sodass der vor Ort produzierte überschüssige Strom in das öffentliche Netz eingespeist wird.

KWK-Anlagen in Mehrfamilienhäusern sind dann besonders wirtschaftlich, wenn ein möglichst hoher Anteil des erzeugten Stroms auch im Gebäude genutzt wird. Hierzu wird im Folgenden das „Summenzählermodell“ aufgezeigt [12; 13]. Es ermöglicht die Abrechnung des KWK-Stroms im Mehrfamilienhaus. Dieses Modell wird mit den bisher häufig zur Anwendung kommenden Modellen der kompletten Einspeisung des erzeugten KWK-Stroms verglichen.

Vergütung des KWK-Stroms bei Netzeinspeisung

Beim Konzept der vollständigen Einspeisung des erzeugten KWK-Stroms in das öffentliche Netz (nur möglich bei KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis 100 kW) kommt gemäß § 4 Abs. 3 KWKG als Vergütung neben dem stark schwankenden Börsenpreis die Erstattung für vermiedene Netznutzungsentgelte hinzu. Somit resultieren einschließlich des KWK-Zuschlags Erlöse von ca. 8 ct/kWh bis 13 ct/kWh.

Eine weitere denkbare Vermarktungsmöglichkeit wäre die Einspeisung des KWK-Stroms in das Netz mit Verkauf an einen Dritten. Bei diesem Lieferkonzept sucht der Betreiber der KWK-Anlage einen Dritten, der bereit ist, den lokal produzierten KWK-Strom zu kaufen. Mit diesem vereinbart er einen Strompreis. Dieser Vertrag wird dem Netzbetreiber vorgelegt, der nun wiederum verpflichtet ist, dem Betreiber den Strom zu dem mit dem Dritten vertraglich vereinbarten Preis abzunehmen. Der Dritte muss Strom des Netzbetreibers zu dem mit dem KWK-Anlagenbetreiber vereinbarten Preis beziehen und dem Netzbetreiber zusätzlich die Netznutzungsentgelte zahlen. Dieses Modell ist für den Dritten preislich dann attraktiv, wenn der Strompreis, den der KWK-Anlagenbetreiber anbietet, zuzüglich der Netznutzungsentgelte geringer ist als der Strombezug von seinem bisherigen Lieferanten. Dieses Modell der Vermarktung kann sich aus

finanzieller Sicht attraktiver als eine Einspeisung und ein Verkauf des KWK-Stroms an den Netzbetreiber der allgemeinen Versorgung darstellen, ist allerdings noch nicht vollständig geregelt und nur aufwendig umsetzbar.

Verwendung des KWK-Stroms im Gebäude

Bei der Belieferung der Nutzer eines Mehrfamilienhauses kann sich der KWK-Anlagenbetreiber bei seiner Preisgestaltung an der Höhe der bei den Bewohnern vermiedenen Strombeschaffungskosten orientieren.

Die Nutzer der Wohneinheiten werden dabei vom KWK-Anlagenbetreiber vollständig versorgt. Dieser schließt mit einem Stromlieferanten einen Zusatz- und Reservestromvertrag ab, um Strom auch dann liefern zu können, wenn seine KWK-Anlage nicht ausreichend Strom erzeugt. Für dieses Vollversorgungsmodell wird in § 20 Abs. 1 d Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) der „Summenzähler“ als ein maßgebliches Abrechnungskonzept dargestellt. Hierbei ist der KWK-Anlagenbetreiber, wenn er der Betreiber der Kundenanlage ist, der alleinige Netzanschlussnutzer des Gebäudes.

Die Abrechnung der Letztverbraucher erfolgt gemäß § 20 Abs. 1 d EnWG über Unterzähler. Für den Betreiber der KWK-Anlage, der auch Kundenanlagenbetreiber ist, wird ein „virtueller Zählpunkt“ gebildet (siehe Bild 19).

Dem Betreiber der KWK-Anlage wird dabei ein Zählpunkt zugeordnet, dessen Zählwerte nicht die gemessenen des Summenzählers Z sind, sondern errechnete Werte aus den Zählwerten des Summenzählers, von dessen Zählwert die Summe der Zählwerte aller Unterzähler abgezogen wird, die den Verbrauch von Letztverbrauchern messen, die nicht vom KWK-Anlagenbetreiber versorgt werden. Weil nicht der gemessene reale, sondern ein errechneter Zählwert maßgeblich ist, bezeichnet man den Zählpunkt als virtuellen Zählpunkt (siehe Bild 19). Der Unterzähler V_1 des fremdbelieferten Letztverbrauchers wird gedanklich parallel zum Zweirichtungszähler des Betreibers der KWK-Anlage geschaltet [13].

Vom tatsächlichem Zählwert Z des Zweirichtungszählers wird der Zählwert V_1 abgezogen. Es ergibt sich der rechnerische Wert Z', der vom Netzbetreiber als maßgeblicher Verbrauchswert des Betreibers der KWK-Anlage seinen Meldungen und seiner Netzentgeltabrechnung zugrunde gelegt wird. Die maßgeblichen Zählpunkte werden V_1 und Z' zugeordnet [13].

Beim Summenzählermodell bleibt jedem Nutzer die Möglichkeit, den Stromlieferanten beliebig zu wechseln. Bild 20 zeigt ein Zahlenbeispiel zur Verdeutlichung des Summenzählermodells mit einem virtuellen Zählpunkt.

7.2 Wärmeberechnung bei KWK-Nutzung gemäß VDI 2077 Blatt 3.1

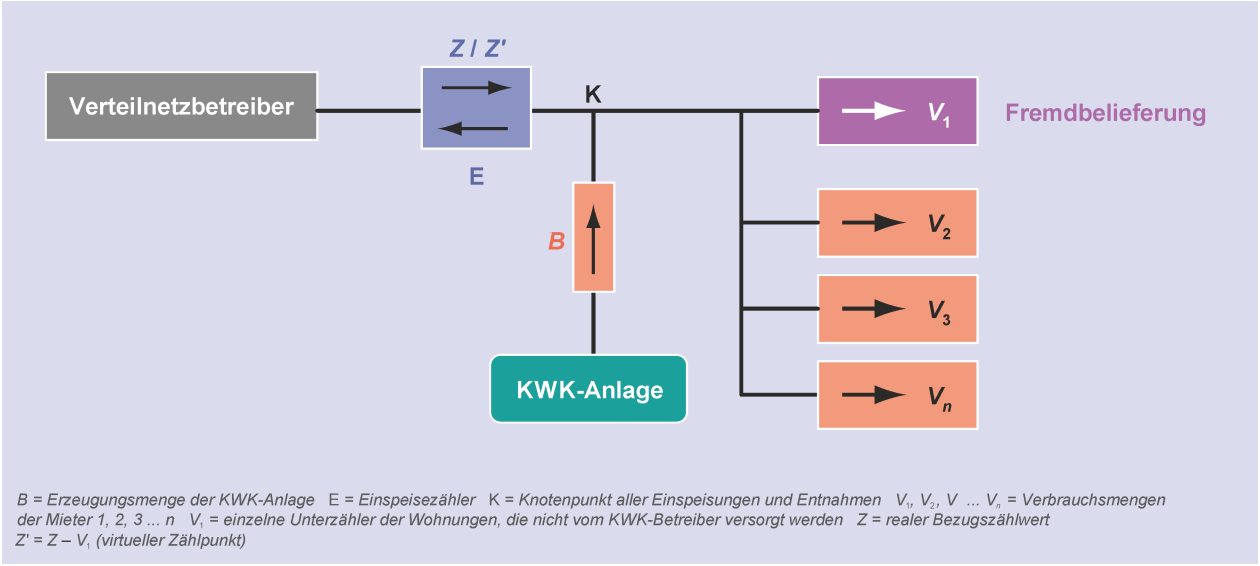
In Deutschland und anderen europäischen Ländern wird die verbrauchsabhängige Abrechnung von Heizkosten seit vielen Jahren erfolgreich praktiziert und findet heute eine breite Akzeptanz.

KWK-Geräte werden üblicherweise als Grundlastwärmeerzeuger und in der Regel gemeinsam mit einem weiteren Wärmeerzeuger betrieben. Da die KWK-Anlage sowohl der Wärme- als auch der Stromerzeugung dient, sind nicht alle anfallenden Brennstoff- und Betriebskosten eines KWK-Geräts umlagefähige Kosten im Sinne der Heizkostenverordnung (HeizkostenV). Vielmehr muss der Kostenanteil für die Stromproduktion ermittelt und von den gesamt zu verteilenden Wärmekosten abgezogen werden.

Mit der Richtlinie VDI 2077 Blatt 3.1 „Ermittlung der umlagefähigen Wärmeerzeugungskosten bei Nutzung von KWK-Anlagen“ stehen Methoden zur Bestimmung der umlagefähigen Heizkosten von KWK-Anlagen in Form einer anerkannten Regel der Technik zur Verfügung.

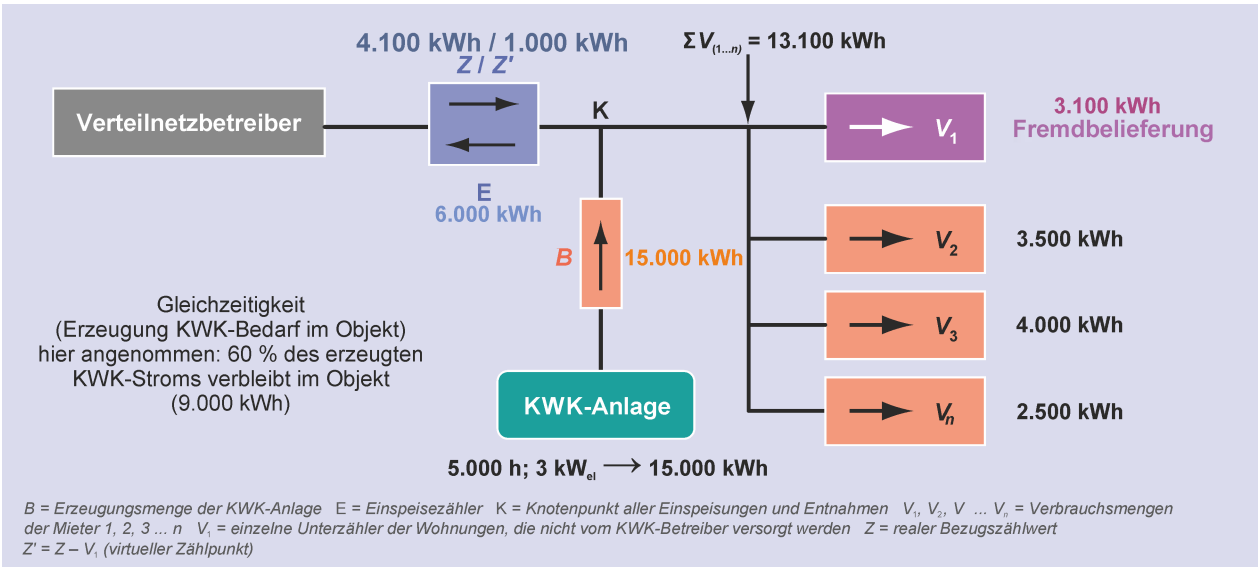
Dazu ist der abrechnungsrelevante Anteil der Brennstoffmenge α und somit die abrechnungsrelevante Brennstoffmenge B_A zu ermitteln. Die Ermittlung des abrechnungsrelevanten Brennstoffanteils α erfolgt durch $\alpha = B_A/B$.

Die abrechnungsrelevante Brennstoffmenge B_A besteht aus der Brennstoffmenge B_{ZS}, die dem Spitzenlast- oder Zusatzheizgerät zur Wärmeerzeugung zugeführt wird, sowie dem Anteil des Brennstoffs $B_{KWK,Q}$ der der Wärmeerzeugung des KWK-Geräts zugeordnet werden kann (siehe Bild 21).



B = Erzeugungsmenge der KWK-Anlage E = Einspeisezähler K = Knotenpunkt aller Einspeisungen und Entnahmen V_1, V_2, V ... V_n = Verbrauchsmengen der Mieter 1, 2, 3 ... n V_1 = einzelne Unterzähler der Wohnungen, die nicht vom KWK-Betreiber versorgt werden Z = realer Bezugszählwert Z' = Z – V_1 (virtueller Zählpunkt)

Bild 19. Summenzählermodell mit einem virtuellen Zählpunkt (in Anlehnung an BWK Bd. 62 (2010) [12])



B = Erzeugungsmenge der KWK-Anlage E = Einspeisezähler K = Knotenpunkt aller Einspeisungen und Entnahmen V_1, V_2, V ... V_n = Verbrauchsmengen der Mieter 1, 2, 3 ... n V_1 = einzelne Unterzähler der Wohnungen, die nicht vom KWK-Betreiber versorgt werden Z = realer Bezugszählwert Z' = Z – V_1 (virtueller Zählpunkt)

Bild 20. Zahlenbeispiel zur Verdeutlichung des Summenzählermodells mit einem virtuellen Zählpunkt (in Anlehnung an BWK Bd. 62 (2010) [12])

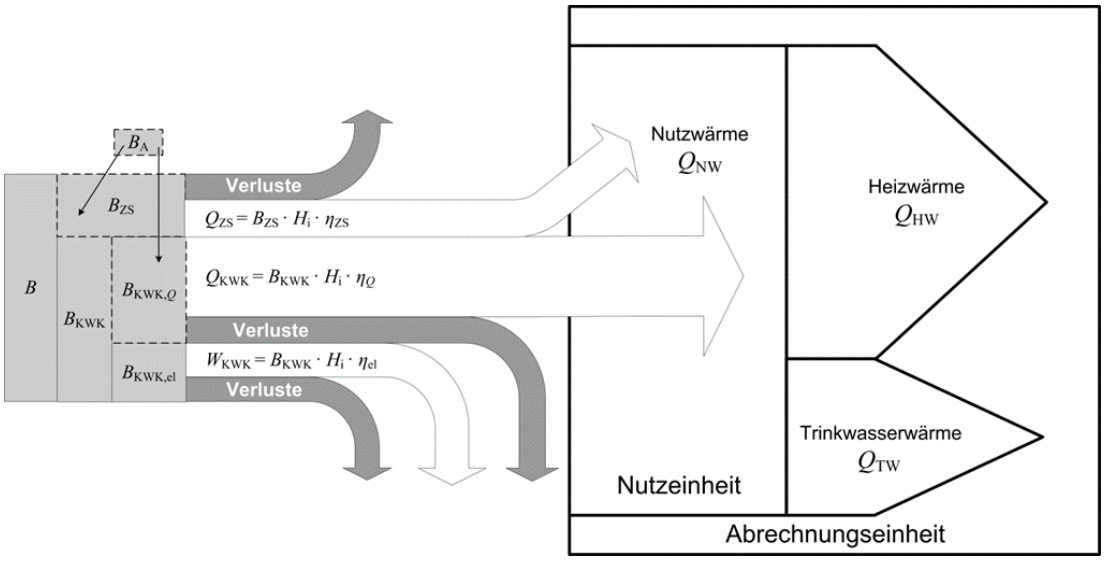


Bild 21. Brennstoff-, Wärme- und Stromfluss bei KWK-Anlagen (Quelle: VDI 2077 Blatt 3.1)

Aufgrund der technischen Gegebenheiten einer KWK-Anlage lässt sich weder die Brennstoffmenge $B_{KWK,el,}$ die im thermodynamischen Kreisprozess (Motor-KWK) oder im elektrochemischen Prozess (Brennstoffzellen-KWK) in Strom umgewandelt wird, noch die eingesetzte Brennstoffmenge, die das KWK-Gerät zur Wärmeerzeugung $B_{KWK,Q}$ benötigt, direkt messen.

In jedem Fall wird aber die elektrische Energie W_{KWK} quantifiziert, da hierfür eine Einspeisevergütung gezahlt wird. Mit diesem Messwert kann zwar die Brennstoffmenge für die Stromproduktion $B_{KWK,el}$ berechnet werden, die abrechnungsrelevante Brennstoffmenge B_A ergibt sich aber aus messtechnischen und rechnerischen Werten:

$$B_A = (B_{KWK} - B_{KWK,el}) + B_{ZS}$$

Für die Ermittlung des Brennstoffs für den KWK-Strom $B_{KWK,el}$ können grundsätzlich zwei Methoden angewandt werden:

- Messung aller erforderlichen Eingangsgrößen für die Berechnung (messtechnische Methode)
- Messung des KWK-Stroms und anschließende Berechnung (rechnerische Methode)

Soweit es technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist, sollte die messtechnische Methode bevorzugt werden. Diese setzt eine korrekte Auslegung und einen einwandfreien Einbau der Erfassungsgeräte voraus. Mit ihr kann die Nutzwärme exakter nachgewiesen werden.

Messtechnische Methoden

Bei der messtechnischen Methode empfiehlt es sich, den Brennstoffverbrauch von KWK-Einheit[5)] und Zusatzheizgerät getrennt zu erfassen, um die Unsicherheiten der Messung möglichst gering zu halten.

Bild 22 und Bild 23 zeigen zwei beispielhafte Anlagenvarianten (KWK mit Zusatzheizgerät sowie KWK mit integriertem Spitzenlastgerät) mit den erforderlichen messtechnischen Erfassungsgeräten. Nach Ermittlung der erforderlichen Eingangsgrößen lässt sich der Brennstoffanteil für KWK-Strom $B_{KWK,el}$ durch die aufgeführten Gleichungen bestimmen.

Der Brennstoffanteil für KWK-Strom $B_{KWK,el}$ für das KWK-Gerät wird folgendermaßen ermittelt:

$$\frac{B_{KWK,el}}{B_{KWK}} = \frac{W_{KWK}}{W_{KWK} + Q_{KWK}}$$

Für KWK-Einheiten mit integriertem Spitzenlastgerät wird der Brennstoffanteil am gesamten Brennstoffverbrauch folgendermaßen ermittelt:

$$\frac{B_{KWK,el}}{B} = \frac{W_{KWK}}{W_{KWK} + (Q_{KWK} + Q_{ZS})}$$

Bei konventionellen, nicht modulierenden KWK-Geräten wird bei definiertem Brennstoffeinsatz in einem festen Verhältnis elektrische und thermische Energie erzeugt. Es kann also kein Brennstoff in elektrische Energie umgewandelt werden, ohne dass dabei Wärme entsteht. Daraus ergibt sich eine Korrelation zwischen Strom- und Wärmewirkungsgrad, die sich für die weiteren Betrachtungen nutzen lässt.

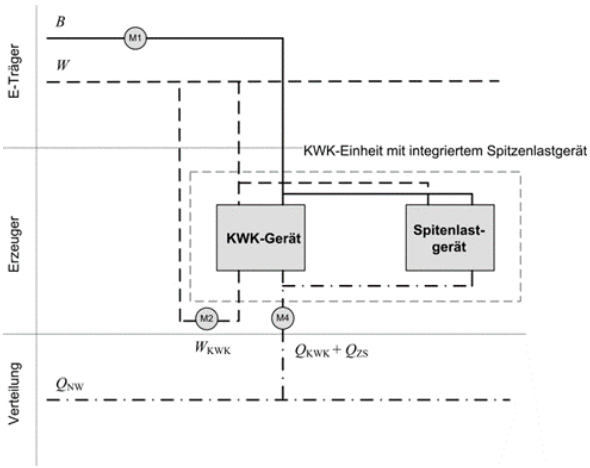


Bild 22. KWK-Einheit mit integriertem Spitzenlastgerät, Mindestausstattung für die messtechnische Methode (Quelle: VDI 2077 Blatt 3.1)

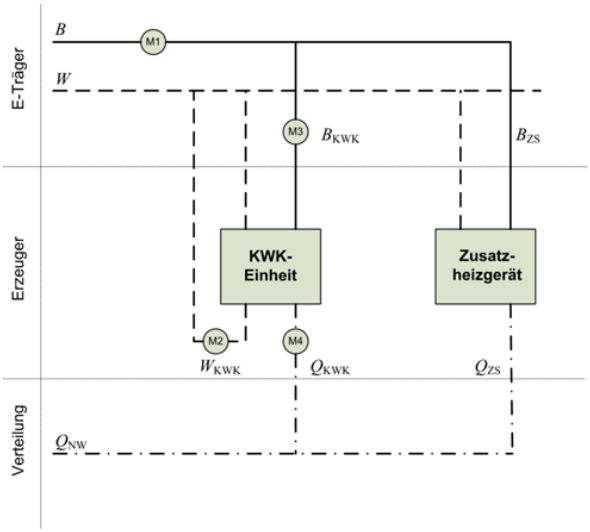


Bild 23. KWK-Einheit und Zusatzheizgerät, Mindestausstattung für die messtechnische Methode (Quelle: VDI 2077 Blatt 3.1)

[5)] Einheit aller vom Hersteller definierten Komponenten zur thermischen und elektrischen Energiebereitstellung, z. B. einem KWK-Gerät, Regelung, Pumpen und eventuell einem Spitzenlastgerät (siehe VDI 2077 Blatt 3.1)

Rechnerische Methoden

Grundlage für die Anwendung der rechnerischen Methode, die nur für geprüfte Geräte zulässig ist, sind die bei der Prüfung ermittelten Strom- und Wärmewirkungsgrade der KWK-Einheit. Diese ermöglichen mit geringem messtechnischem Aufwand die Ermittlung des abrechnungsrelevanten Brennstoffverbrauchs B_A. Bild 24 und Bild 25 zeigen im Vergleich zur messtechnischen Methode, die erforderliche messtechnische Mindestausstattung für die rechnerische Methode bei KWK-Geräten ohne Modulation. Hierbei gilt folgende Zuordnung:

- M1: Brennstoffzähler für den gesamten Brennstoff (Messung B)
- M2: Stromzähler KWK-Einheit (Messung W_{KWK})

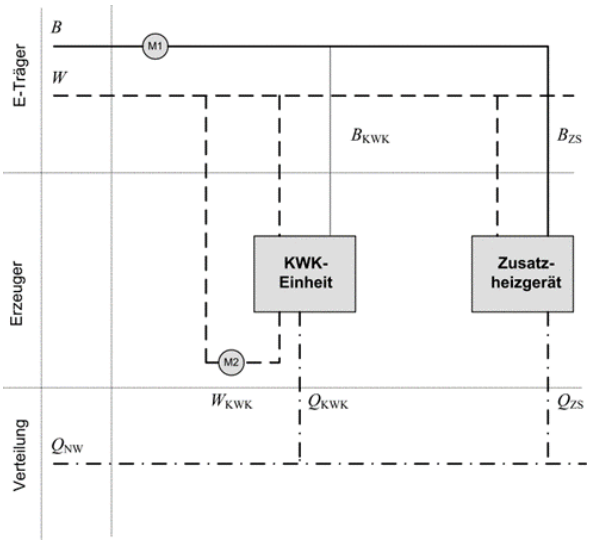


Bild 24. Geprüfte KWK-Einheit/Zusatzheizgerät, ohne Modulation, Mindestausstattung für die rechnerische Methode (Quelle: VDI 2077 Blatt 3.1)

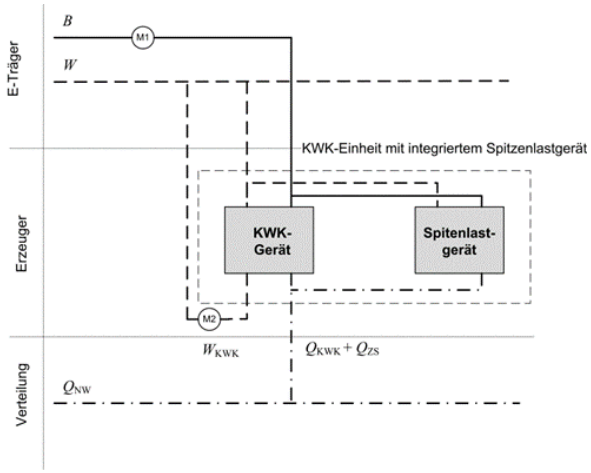


Bild 25. Geprüfte KWK-Einheit/integriertes Spitzenlastgerät, ohne Modulation, Mindestausstattung für die rechnerische Methode (Quelle: VDI 2077 Blatt 3.1)

Der Brennstoffverbrauch $B_{KWK,el}$ wird wie folgt ermittelt:

$$\frac{B_{KWK,el}}{B} = \frac{W_{KWK}}{\eta_Q \cdot 0,98 + \eta_{el}} \cdot \frac{1}{B \cdot H_i}$$

(z. B. bei nicht brennwertbezogenen Energieabrechnungen) – zusätzliche, erforderliche Angaben: elektrischer und thermischer Wirkungsgrad der KWK-Einheit (Herstellerdaten)

Zur Umrechnung der Energie in Brennstoff wird der Heizwert des jeweiligen Brennstoffs verwendet. Der erzeugte KWK-Strom W_{KWK} liegt als Messwert vor und muss mit dem KWK-Stromzähler gemessen werden. Mit dem Messwert lässt sich der Brennstoffverbrauch $B_{KWK,el}$ und der abrechnungsrelevante Brennstoffverbrauch B_A ermitteln, der damit zur weiteren Berücksichtigung in der Heizkostenabrechnung vorliegt. Dieses Verfahren erfordert keinen weiteren Messaufwand.

Bei Anwendung dieser Methode ist zwischen KWK-Geräten ohne oder mit Modulation zu differenzieren. Konventionelle KWK-Anlagen haben einen festen Betriebspunkt, das heißt, sie sind nicht modulierend, während neuere KWK-Anlagen den Strom und damit die Wärme variabel erzeugen.

Aufgrund der variablen Leistungsabgabe von modulierenden KWK-Geräten ist für die Berechnung des Brennstoffverbrauchs $B_{KWK,el}$ eine mittlere elektrische Leistung über den Abrechnungszeitraum erforderlich. Im Unterschied zum KWK-Gerät ohne Modulation ist daher ein Betriebsstundenzähler erforderlich. Zur Ermittlung des Brennstoffverbrauchs $B_{KWK,el}$ sind zunächst der mittlere Strom- und Wärmewirkungsgrad zu bestimmen. Bei marktüblichen Systemen kann mit den mittleren Wirkungsgraden gearbeitet werden, da der Verlauf der Wirkungsgrade über der elektrischen Leistung weitgehend linear ist. Die mittleren Stromwirkungsgrade werden anhand von Kennlinien oder Tabellenwerten ermittelt, die der Hersteller bereithält. Ausführliche Beispiele hierzu sind in VDI 2077 Blatt 3.1 enthalten.

Umlagefähige Kosten von KWK-Anlagen

Wie der abrechnungsrelevante Brennstoffverbrauch zu ermitteln ist, wurde in den vorangegangenen Abschnitten bereits erläutert. Nach Heizkostenverordnung bestehen die weiteren umlagefähigen Kosten aus dem Betrieb einer KWK-Anlage aus drei Blöcken:

- Kosten des abrechnungsrelevanten Brennstoffverbrauchs K_{BA}: $K_{BA} = K_B \cdot \alpha$
- weitere Betriebskosten der KWK-Einheit $\sum K_{KWK}$

- weitere Betriebskosten des Zusatzheizgeräts $\sum K_{ZS}$

Für die KWK-Einheit mit Zusatzheizgerät werden die umlagefähigen Kosten folgendermaßen ermittelt:

$$K_u = K_{BA} + f_{KWK,Q} \cdot \sum K_{KWK} + \sum K_{ZS}$$

Der Umlagefaktor $f_{KWK,Q}$ ergibt sich aus dem Strom- und Wärmewirkungsgrad des KWK-Geräts:

$$f_{KWK,Q} = \frac{\eta_Q \cdot 0,98}{\eta_{el} + \eta_Q \cdot 0,98}$$

Die Richtlinie VDI 2077 Blatt 3.1 zeigt Methoden auf, die umlagefähigen Wärmeerzeugungskosten von KWK-Anlagen zu ermitteln. Es wird eine messtechnische und eine rechnerische Methode vorgestellt, wobei das messtechnische Verfahren bei allen KWK-Anlagen anwendbar ist und das rechnerische Verfahren nur bei geprüften KWK-Einheiten, deren Strom- und Wärmewirkungsgrade bekannt sind.

7.3 Mikro-KWK als Contracting-Lösung

Das im Bereich größerer KWK-Anlagen bereits langjährig praktizierte Contracting wird von ersten Energiedienstleistern nun auch im Rahmen von Mikro-KWK-Anlagen angeboten. Der Contractor errichtet und betreibt dabei eine Mikro-KWK-Anlage im Gebäude des Kunden und stellt dem Kunden Strom und Wärme zur Verfügung. Je nach Ausgestaltung des Konzepts übernimmt der Contractor in einem Komplettpaket

- die Planung und objektspezifische Dimensionierung der KWK-Anlage,
- die Organisation aller An- und Ummeldeprozesse,
- die Beantragung von Fördermitteln,
- den Betrieb der KWK-Anlage sowie
- die Errichtung der KWK-Anlage und gegebenenfalls den Rückbau vorhandener Erzeugungsanlagen und
- die Wartung und Instandsetzung.

Meist beschreibt der Contracting-Vertrag einen – gemessen am Wert der KWK-Anlage – geringen Investitionszuschuss des Kunden sowie eine monatliche Grundgebühr. Abgerechnet wird dann zusätzlich die vom Contractor tatsächlich an den Kunden gelieferte Energie. Manche Contracting-Geber bieten über die reine Energielieferung hinaus weitere Dienstleistungen an. Dies kann beispielsweise eine transparente Visualisierung des Energieverbrauchs im Haushalt und des Zustands der Mikro-KWK-Anlage sein. Ebenfalls können viele einzelne Mikro-KWK-Anlagen vom Contractor gebündelt werden, um so Netzdienstleistungen anzubieten oder zusätzliche Vermarktungsmechanismen zu realisieren, die den wirtschaftlichen Betrieb von Mikro-KWK-Anlagen unterstützen.

Das Risiko der optimalen Planung, Dimensionierung und dem effizienten Betrieb der KWK-Anlage wird vom Kunden an den Contractor abgegeben. Auch das im Mehrfamilienhaus vorhandene Investitionsdilemma zwischen Investitionskosten aufseiten des Vermieters und dann folgenden Effizienz- und Kostenvorteilen aufseiten der Mieter wird durch eine Contracting-Lösung überwunden.

Ein wesentliches Hindernis für den Einsatz von Contracting-Lösungen besteht darin, dass Contracting-Geber auf den an Endkunden gelieferten Strom die EEG-Umlage erheben müssen. Wird die gleiche KWK-Anlage dagegen in Eigennutzung – z. B. durch den Vermieter für seinen Eigenbedarf – betrieben, fällt diese Umlage nicht an.

Das Contracting könnte einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Modernisierungsrate von Heizungsanlagen leisten und die Markteinführung von Mikro-KWK-Anlagen deutlich unterstützen. Anzustreben ist deswegen eine Gleichbehandlung von eigengenutzten und im Contracting betriebenen KWK-Anlagen.

8 Energierechtliche Rahmenbedingungen

Fakten in Kürze

Die energierechtlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb und die Förderung der KWK sind vielfältig und teils äußerst komplex. Sie umfassen:

- Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2017)
- Marktstammdatenregister
- Energiesteuergesetz
- Stromsteuergesetz
- Umsatzsteuer bei Investitionen in KWK-Anlagen
- Ertragssteuer
- Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG)
- Energieeinsparverordnung (EnEV)
- Förderinstrumente

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen energierechtlichen Rahmenbedingungen für KWK-Anlagen beschrieben. Es wird auf Fördermöglichkeiten verwiesen, die bei der Auslegung von KWK-Anlagen und beim Betrieb Vorteile bieten oder zu berücksichtigen sind. Wegen der Komplexität dieser Regelungen ist jedoch im konkreten Einzelfall bei jeder Planung einer KWK-Anlage eine genaue Analyse der zutreffenden rechtlichen Rahmenbedingungen erforderlich. Die Prüfung setzt die Definition der wichtigsten Parameter der KWK-Anlage voraus:

- Wann ist die Inbetriebnahme Dauerbetrieb?
- Welcher Brennstoff soll eingesetzt werden (fossil oder regenerativ)?
- Welche elektrische Leistung soll die Anlage haben?

8.1 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

Ziel des Gesetzes, dessen letzte umfassendere Novelle am 01.01.2016 in Kraft trat (KWKG 2016 vom 21.12.2015), ist die Erhöhung der Nettostromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und die Energieeinsparung sowie der Umwelt- und Klimaschutz. Außerdem werden modernisierte hocheffiziente KWK-Anlagen und auf KWK nachgerüstete Anlagen gefördert. Gefördert wird in KWK-Anlagen erzeugter Strom auf Basis von Abfall, Abwärme, Biomasse, gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen. Die Fördersätze des KWKG werden differenziert nach Einspeisung in Netze der allgemeinen Versorgung, Eigenverbrauch und Lieferung in Kundenanlagen. Außerdem wird Strom bestimmter KWK-Bestandsanlagen temporär gefördert. KWK-Strom, der nach dem EEG vergütet oder direkt vermarktet wird, fällt nicht in den Anwendungsbereich des KWKG.

Anlagenbetreiber erhalten für den in der KWK-Anlage produzierten Strom einen KWK-Zuschlag. Außerdem sind die Netzbetreiber verpflichtet, für in das Netz der allgemeinen Versorgung eingespeisten KWK-Strom an KWK-Anlagen bis 100 kW_{el} den sogenannten „üblichen Preis“ sowie die in den vorgelagerten Spannungsstufen durch den eingespeisten KWK-Strom vermiedenen Netznutzungsentgelte zu vergüten. Der übliche Preis wird ermittelt aus dem Durchschnittspreis für Strom (Baseload) an der Strombörse in Leipzig im jeweils zurückliegenden Quartal. Die Entwicklung des üblichen Preises ist in Bild 26 dargestellt. Diese Vermarktungsvariante bezeichnet das KWKG als „kaufmännische Abnahme“.

Für KWK-Anlagen bis 50 kW_{el} werden der übliche Preis und das vermiedene Netznutzungsentgelt auch nach Auslaufen der Zahlung des KWK-Zuschlags weiter vergütet. Für größere Anlagen (> 50 kW_{el}) endet diese Vergütung mit Auslaufen der Zuschlagszahlung.

Anstelle der kaufmännischen Abnahme durch den Netzbetreiber können Anlagenbetreiber den eingespeisten Strom auch an einen vertraglich verbundenen Dritten liefern. In diesem Fall ist der Netzbetreiber verpflichtet, dem Dritten diesen Strom zu dem mit dem Anlagenbetreiber vereinbarten Preis zuzüglich eines Durchleitungsentgelts abzugeben.

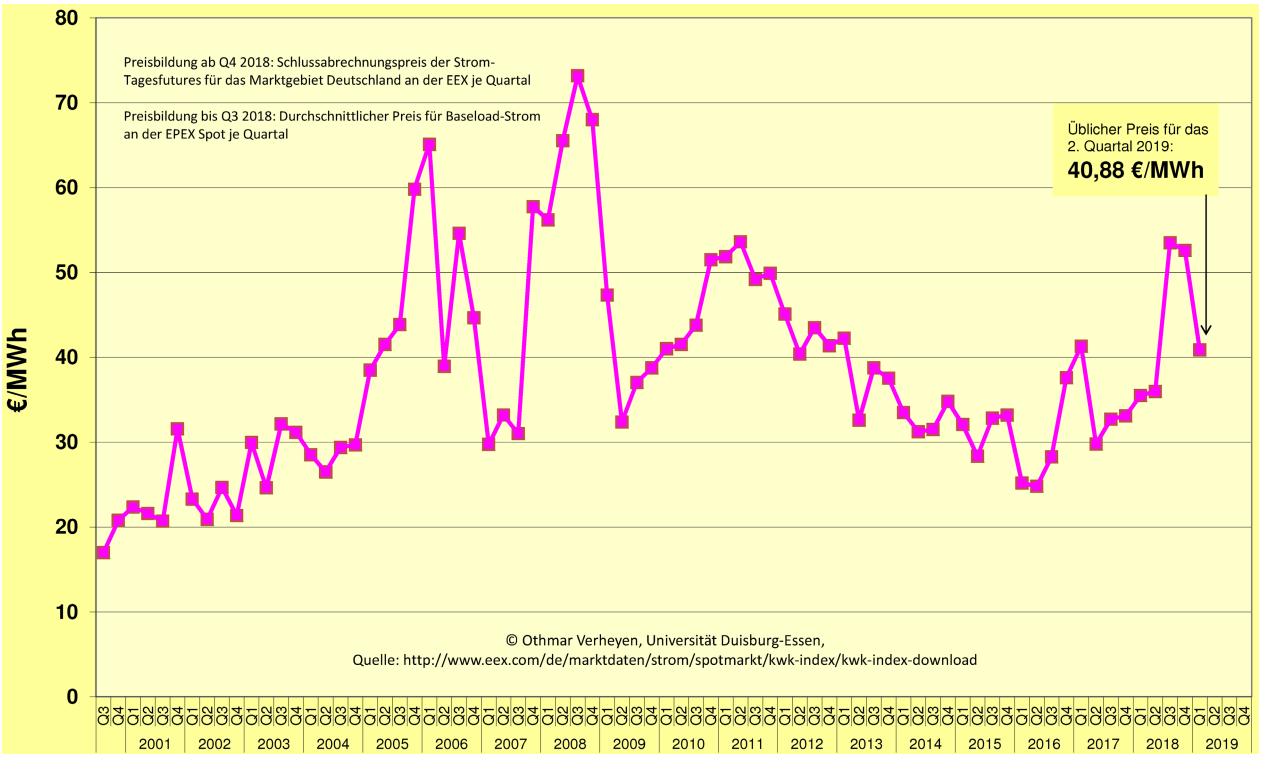


Bild 26. Entwicklung des üblichen Preises (Quelle [8])

Schließlich besteht noch die Möglichkeit, den KWK-Strom an einen Stromhändler zu liefern, der ihn im Rahmen seiner Stromprodukte einsetzt. Zahlreiche Anbieter beschäftigen sich mit dem Aufkauf von KWK-Strom und der direkten Lieferung an Endkunden. Will der Anlagenbetreiber den eingespeisten Strom selbst über Netze der allgemeinen Versorgung vermarkten, so muss er sich wie ein Stromhändler aufstellen und einen eigenen Bilanzkreis unterhalten oder aber Kunden finden, die selbst einen Bilanzkreis unterhalten, in den die Lieferung erfolgen kann.

Die Höhe der nach Anlagengröße gestaffelten KWK-Zuschläge und deren Laufzeit für Anlagen, die unter dem KWKG 2016 in Betrieb genommen werden, ist Tabelle 6 und Tabelle 7 zu entnehmen. Für ältere Anlagen, die vor Inkrafttreten des KWKG 2016 in Betrieb gegangen sind, gelten die Zuschläge nach der jeweiligen BAfA-Zulassung (Übergangsregeln beachten!).

KWK-Anlagen > 1 MW_{el} und < 50 MW_{el} müssen sich zum Erhalt von Zuschlägen an Ausschreibungen beteiligen. Der Strom der beteiligten Anlagen darf ausschließlich in Netze der allgemeinen Versorgung eingespeist werden. Diese Ausschreibungen führt die BNetzA für neue KWK-Anlagen und innovative KWK-Systeme (mit Anlagenkomponenten zur Gewinnung regenerativer Wärme aus erneuerbaren Energien) durch am 01.06. und 01.12. jeden Jahres für jeweils 200 MW installierter KWK-Leistung im betreffenden Jahr. Zulässige Höchstgebote für die Förderung sind 7 ct/kWh (für KWK-Anlagen) bzw. 12 ct/kWh (für innovative KWK-Systeme z. B. mit Power to Heat).

Tabelle 6. KWK-Zuschläge nach KWKG 2016/17 [8]

KWKG 2012 (ct/kWh)		KWKG 2016/17 (ct/kWh; jeweils gleitende Regelung, d.h. bis zum jeweiligen Leistungsanteil						
Stufe	Erzeugter KWK-Strom	Stufe KWKG 2016	Stufe KWKG 2016 novelliert?	eigengenutzter KWK-Strom			Stromlieferung an Letztverbraucher in Kundenanlage oder geschlossenem Verteilernetz	in Netz der allg. Versorgung eingespeister KWK- Strom
kW_{el}		kW_{el}	kW_{el}					(Erhöhung jeweils um 0,6 bei KWK-Strom zum Ersatz von Stein- oder Braunkohle-KWK-Strom)
				Objekt-versorgung	stromkosten-intensive Industrie	Industrie-zweig nach EEG2014 Anl. 4 (wenn VO v. BMWi erlassen)		
≤ 50	5,41	≤ 50	≤ 50	4	5,41	1. Gesamt-gestehungs-kosten > Marktpreis	4	8
		> 50 bis ≤ 100	> 50 bis ≤ 100	3	4	2. Zuschlag ≤ (Gesamt-gestehungs-kosten-Marktpreis)	3	6
> 50 bis ≤ 250	4	> 100 bis ≤ 250	> 100 bis ≤ 250	0			2	5
≤ 2000	2,4	> 250 bis ≤ 2000	> 250 bis ≤ 1000	0	2,4		1,5	4,4
> 2000	1,8	> 2000	≥ 1000 bis ≤ 50000	0	1,8 (0)		1 (0)	Ausschreibung
			> 50000		1,8		1	3,1
TEHG-pflichtig	2,1	TEHG-pflichtig	TEHG-pflichtig	0	2,1			3,4

Für Anlagen, die am Emissionshandel gemäß Treibhausgasminderungsgesetz (TEHG) ab 01.01.2013 teilnehmen, erhöhen sich die genannten Zuschläge um jeweils 0,3 ct/kWh ab diesem Datum.

Tabelle 7. Zahlungsdauer KWK-Zuschläge nach KWKG 2016 [8]

Elektrische Anschlussleistung in kW_{el}	Max. Vollbenutzungsstunden
bis 50 (und Brennstoffzellen)	60.000
über 50 bis 1.000	30.000
über 50.000	30.000

Beispiel

Bei Anlagen mit einer elektrischen Leistung über 50 kW wird für den Leistungsanteil Eigenverbrauch bis 50 kW der Zuschlag von 4,00 ct/kWh und für Einspeisung in Netze der allgemeinen Versorgung 8,00 ct/kWh, für den Leistungsanteil zwischen 50 kW und 100 kW der Zuschlag von 3,0 ct/kWh bzw. 6,00 ct/kWh (für eingespeisten Strom) etc. gezahlt (gleitende Regelung).

Zuschlagsberechtigte neu- und ausgebaute Wärme- sowie Kältenetze müssen eine Wärmeeinspeisung (Kälteeinspeisung) aus KWK-Anlagen von mindestens 75 % nachweisen. Die Zuschläge betragen für neu verlegte Wärmeleitungen mit Nenndurchmesser bis 100 mm (DN100) 100 EUR je laufendem Meter der neu verlegten Wärmeleitung (max. 40 % der ansatzfähigen Investitionskosten) und für neu verlegte Wärmeleitungen mit mittlerem Nenndurchmesser von mehr als 100 mm 30 % der ansatzfähigen Investitionskosten des Neu- oder Ausbaus. Der Zuschlag darf insgesamt 20 Mio. EUR je Projekt nicht überschreiten.

Der zuschlagsberechtigte Neu- und Ausbau von Wärme- sowie Kältespeichern gilt für Speicher mit einer Kapazität von mindestens 1 m^3 Wasseräquivalent oder mindestens 0,3 m^3/kW der installierten elektrischen Leistung der KWK-Anlage. Der Zuschlag beträgt 250 EUR/m^3 Wasseräquivalent der Wärmespeicherkapazität, bei Speichern mit einem Volumen von mehr als 50 m^3 Wasseräquivalent höchstens aber 30 % der Investitionskosten. Je Projekt darf der Zuschlag insgesamt 10 Mio. EUR nicht überschreiten.

Hocheffiziente modernisierte KWK-Anlagen erhalten die in Tabelle 6 aufgeführten KWK-Zuschläge, wenn die in Tabelle 8 dargestellten Bedingungen erfüllt sind.

Betreiber von hocheffizienten nachgerüsteten KWK-Anlagen erhalten die in Tabelle 6 bezeichneten KWK-Zuschläge, wenn die in Tabelle 9 genannten Bedingungen erfüllt sind.

Zu den Erträgen nach KWKG 2016 addieren sich noch die Erträge aus der Stromeigennutzung (siehe Abschnitt 5).

Tabelle 10 zeigt zwei Beispiele von KWK-Anlagen für Förderung nach KWKG 2016.

Tabelle 8. Bedingungen für hocheffiziente modernisierte Anlagen KWKG 2016

Investitionskosten für Modernisierung in % der Investitionskosten für Neuanlage	Max. Betriebsjahre seit Inbetriebnahme (INB) (Karenzzeit)	Max. Vollbenutzungsstunden
50	5	15.000
	10	30.000

Tabelle 9. Bedingungen für hocheffiziente nachgerüstete Anlagen gemäß KWKG 2016

Investitionskosten für Nachrüstung % der Investitionskosten für Neuanlage	Max. Vollbenutzungsstunden
10	10.000
25	15.000
50	30.000

Tabelle 10. Beispiele für Förderung nach KWKG 2016

Beispiel 1: 15 kW_{el}, Erdgas-KWK-Anlage			
	Einheit	Wert	Förderung
Installierte elektrische Leistung	kW	15	
Stromerzeugung (Annahme Einspeisung 30 % davon)	kWh/a	52.500	
Vollbenutzungsstunden	h/a	3.500	
Elektrischer Wirkungsgrad		0,3	
Brennstoffverbrauch (Beispiel Erdgas)	kWh/a (H_i)	175.000	
Brennstoffverbrauch	kWh/a (H_s)	192.500	
KWK-Zuschlag (Einspeisung)	ct/kWh	8,00	1.260,00
KWK-Zuschlag (Eigenverbrauch)	ct/kWh	4,00	1.470,00
Vermiedenes Netznutzungsentgelt (Beispiel)	ct/kWh	0,5	78,75

Tabelle 10. Beispiele für Förderung nach KWKG 2016 (Fortsetzung)

Beispiel 1: 15 kW_{el}, Erdgas-KWK-Anlage			
	Einheit	Wert	Förderung
Üblicher Preis (II. Quartal 2019)	ct/kWh	4,08	642,60
Summe der Erträge durch KWKG 2016/17	€/a		3.451,35
Gesamtförderung pro kWh	ct/kWh		6,57

Beispiel 2: 1 kW_{el}, Erdgas-KWK-Anlage			
	Einheit	Wert	Förderung
Installierte elektrische Leistung	kW	1	
Stromerzeugung (Annahme Einspeisung 70 % davon)	kWh/a	5.000	
Vollbenutzungsstunden	h/a	5.000	
Elektrischer Wirkungsgrad		0,24	
Brennstoffverbrauch (Beispiel Erdgas)	kWh/a (H_i)	20.833	
Brennstoffverbrauch	kWh/a (H_s)	22.917	
KWK-Zuschlag (Einspeisung)	ct/kWh	8,00	280,00
KWK-Zuschlag (Eigenverbrauch)	ct/kWh	4,00	60,00
Vermiedenes Netznutzungsentgelt (Beispiel)	ct/kWh	0,5	17,50
Üblicher Preis (II. Quartal 2019)	ct/kWh	4,08	142,80
Summe der Erträge durch KWKG 2016/17	€/a		500,30
Gesamtförderung pro kWh	ct/kWh		10,01

8.2 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2017)

Gemäß des EEG 2017 werden u. a. KWK-Anlagen gefördert, wenn diese Strom aus gasförmiger oder fester Biomasse erzeugen (z. B. Biogas, Biomethan, Holz, Pellets). Für ältere Biomasse-KWK-Anlagen gelten die Vergütungsvorschriften der Vorgängergesetze EEG 2004, EEG 2009, EEG 2012 bzw. EEG 2014 weiter.

Für Biomasseanlagen gemäß EEG 2017 muss der anzulegende Preis zur Förderung wettbewerblich in Ausschreibungen ermittelt werden. Übergangsweise (nur für Anlagen < 150 kW) gilt der gesetzlich festgelegte anzulegende Preis. Die geförderten Anlagen dürfen kein vermiedenes Netznutzungsentgelt in Anspruch nehmen. Die Höhe der Förderung (Marktprämie) ergibt sich aus dem anzulegenden Wert abzüglich des Marktwerts des Stroms (Börsenpreis).

Die im Rahmen des EEG 2014 und 2017 bei der Stromerzeugung in KWK-Anlagen erzielbaren Vergütungen sind in Tabelle 11 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass sich die höhere Förderung gemäß EEG – verglichen mit der Förderung gemäß KWKG – auch durch höhere Brennstoffkosten, z. B. für Biomethan, begründet.

8.2.1 Fördersätze

Die Förderung wird gezahlt für 20 Jahre bei vollständiger Einspeisung des erzeugten Stroms in das öffentliche Netz, gerechnet ab dem Zeitpunkt der Erstinbetriebnahme des Generators der KWK-Anlage.

Tabelle 11. Vergütung gemäß EEG 2017 bei Einsatz von Biomethan

A) Direktvermarktung mit Marktprämie				
		EEG 2014	EEG 2017	
	Bemessungsleistung in kW	Anzulegender Wert (AW) in ct/kWh	Anzulegender Wert (AW) in ct/kWh	seit 01.04.2019
Strom aus Biomasse	bis 150	13,66	13,32	12,99
	bis 500	11,78	11,49	11,21
	bis 1.000		10,29	10,04
	bis 5.000	10,55	10,29	10,04
	bis 20.000	5,85	5,71	5,57
Vergärung von Bioabfällen	bis 500	15,26	14,88	14,51
	bis 1.000			
	bis 20.000	13,38	13,05	12,73
Vergärung von Gülle (80 % Massenanteil; Stromerzeugung am Standort Biogasanlage)	installierte Leistung max. 75 kW	23,73	23,14	22,57
B) Einspeisevergütung mit Einspeisebonus				
	Nur für Anlagen mit:	Einspeisevergütung in ct/kWh		
Inbetriebnahme vor 01.01.2016	installierter Leistung bis 500 kW	um 0,2 ct/kWh verminderter anzulegender Wert (AW) gemäß A)	nur für Anlagen ‹100 kW_{el} (ab Inkrafttreten des Gesetzes)	
Inbetriebnahme nach 31.12.2015	installierter Leistung bis 100 kW			
Förderbegrenzungen				
Förderung für Anlagen › 100 kW installierter Leistung nur bis zu einem Anteil der Strommenge, der der Bemessungsleistung der Anlage von 50 % der installierten Leistung entspricht				
Für darüber hinausgehende Strommengen gilt:				
a) Marktprämie (MP) = 0 bei Direktvermarktung gemäß A)		b) Einspeisebonus = Monatsmarktwert bei Einspeisevergütung gemäß B)		

8.2.2 Marktprämienmodell

Der KWK-Anlagenbetreiber erhält zuzüglich zum erzielten Marktpreis vom Netzbetreiber eine Marktprämie. Diese orientiert sich am anzulegenden Wert und wird korrigiert um den Marktwert EPEX (European Power Exchange/Europäische Strombörse).

Im Falle der Inanspruchnahme der Marktprämie kann der Anlagenbetreiber unter besonderen Voraussetzungen zusätzlich eine Flexibilitätsprämie erhalten.

Ermittlung der Marktprämie (MP):

MP = anzulegender Wert (AW) – Marktwert (MW)

Finanziert werden die EEG-Zuschläge durch eine Umlage, die alle Letztverbraucher von Strom zahlen müssen. Diese wird durch die Übertragungsnetzbetreiber jährlich saldiert und ausgeglichen. Auch Dritte (z. B. Contractoren), die Strom in KWK-Anlagen produzieren und den Strom unmittelbar an Kunden in räumlicher Nähe liefern, müssen diese EEG-Umlage auf den Strompreis aufschlagen. Dies führt zur Verteuerung der Stromerzeugung in Contracting-Anlagen gegenüber der Eigenversorgung durch den Letztverbraucher selbst.

In Tabelle 12 ist ein Beispiel einer 15-kW_{el}-Biomethan-KWK-Anlage zur Verdeutlichung des Marktprämienmodells aufgenommen.

8.2.3 EEG-Umlage

Die EU-Kommission hat am 22.08.2018 den Beihilfebescheid zur EEG-Umlage für neue KWK-Eigenerzeugungsanlagen gemäß § 61 b Nr. 2 EEG veröffentlicht. Der Bescheid stellt die Anschlussregelung für die am 31.12.2017 ausgelaufene vorläufige Beihilfegenehmigung dar. Insofern ist die Gültigkeit der Regelungen ab 01.01.2018 impliziert.

Diese Regelungen wurden mit dem Energiesammelgesetz vom 17.12.2018 in deutsches Recht umgesetzt. § 61 c EEG sieht für KWK-Anlagen bis 1 MW_{el} und über 10 MW_{el}, bei denen die Eigenversorgung ab dem 01.01.2018 erfolgt, die bisherige Ermäßigung der EEG-Umlage auf 40 % bei Eigenversorgung vor. Für Anlagen größer 1 MW_{el} und kleiner 10 MW_{el} sieht § 61 c EEG vor, dass nur bis zu einer Vollbenutzungsdauer von 3.500 Stunden die EEG-Umlage auf 40 % reduziert ist. Für jede Vollbenutzungsstunde darüber reduziert sich die Entlastung entsprechend, sodass ab 7.000 Vollbenutzungsstunden für den gesamten Strom 100 % EEG-Umlage zu zahlen sind. Besondere Regelungen gibt es in § 61 d EEG für KWK-Anlagen, bei

Tabelle 12. Beispiel für Marktprämienmodell

Beispiel 3: 15 kW_{el}, Biomethan-KWK (Marktprämie EEG 2017)			
	Einheit		Förderung
Installierte elektrische Leistung	kW	15	
Stromerzeugung (Annahme Einspeisung 100 % davon)	kWh/a	52.500	
Vollbenutzungsstunden	h/a	3.500	
Elektrischer Wirkungsgrad		0,3	
Bemessungsleistung	kW_{el}	5,99	
Brennstoffverbrauch (Beispiel Erdgas)	kWh/a (H_i)	175.000	
Brennstoffverbrauch	kWh/a (H_s)	192.500	
anzulegender Wert (AW) (EEG 2017)	ct/kWh	13,32	
anzulegender Wert 01.04.19 (korrigiert um 0,5 % per 1.4. und 1.10.)	ct/kWh	12,99	
Marktwert (MW) EPEX (Annahme)	ct/kWh	4	
Marktprämie (MP=AW-MW)	ct/kWh	8,99	
Summe Förderung durch EEG 2017	€/a		4.719,75
Spezifische Förderung pro kWh	ct/kWh		8,99

denen die Eigenversorgung nach dem 31.07.2014 und vor dem 31.12.2017 begann. Kurz zusammengefasst führen diese Regelungen dazu, dass für diese Anlagen die reduzierte EEG-Umlage für maximal vier Jahre in Anspruch genommen werden kann. Danach ist der Eigenversorgungsstrom mit 100 % EEG-Umlage belastet.

8.3 Marktstammdatenregister

Folgende Marktakteure müssen sich im Register über die elektronische Plattform der BNetzA registrieren: Betreiber von Einheiten, Betreiber von organisierten Marktplätzen, Bilanzkreisverantwortliche, Messstellenbetreiber, Netzbetreiber, Stromlieferanten und Transportkunden. Das gilt für Neu- und Bestandsanlagen. Wird die Registrierung nicht, nicht richtig, nicht in der vorgeschriebenen Weise oder nicht rechtzeitig vorgenommen, gilt dies als Ordnungswidrigkeit. Betreiber müssen übernommene Bestandsdaten überprüfen, ergänzen und bestätigen.

Das Web-Portal der BNetzA steht zur Verfügung (https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR). Aber es ist für Neuanlagen auf die geltenden klaren Fristen zu achten, die unabhängig vom Web-Portal eingehalten werden müssen – unter Nutzung der von der BNetzA im Internet bereitgestellten Formulare (Anmeldung der Anlagen). Andernfalls wird dies durch Verminderung der Förderung geahndet.

8.4 Energiesteuergesetz

Nach dem Energiesteuergesetz sind Energieträger, die in ortsfesten Anlagen eingesetzt werden und ausschließlich der Erzeugung von Kraft und Wärme dienen, steuerbegünstigt, sofern die KWK-Anlagen einen Jahresnutzungsgrad von mindestens 70 % erreichen. Als ortsfest gelten auch solche Anlagen, die nicht ganzjährig am gleichen Standort betrieben werden, die aber während des Betriebs, das heißt während der Erzeugung von Kraft und Wärme bzw. Strom und Wärme, ihren Standort nicht verändern (z. B. mobile KWK-Anlagen, die im Sommer zur Beheizung von Freibädern und im Winter zur Beheizung von Gebäuden eingesetzt werden und sich deshalb in transportierbaren Containern befinden). Die ermäßigten Steuersätze für einige Energieträger sind in Tabelle 13 dargestellt. Hier gilt noch eine Besonderheit für Unternehmen des produzierenden Gewerbes, die eine weitere Steuervergünstigung erhalten.

Kleine KWK-Anlagen (dies sind gemäß KWKG Anlagen mit bis zu 2 MW_{el}) werden außerdem nach dem Energiesteuergesetz von der Energiesteuer entlastet, das heißt ihnen wird auf Antrag beim Hauptzollamt die gezahlte Energiesteuer für den Einsatz in KWK-Anlagen erstattet. Die Voraussetzungen für diese Energiesteuerentlastung sind gemäß Gesetz zur Änderung des Energiesteuer- und Stromsteuergesetzes vom 27.08.2017:

- Die Anlage ist hocheffizient im Sinne von Anhang III der EU-KWK-Richtlinie (Richtlinie 2004/2008 EG) bzw. deren Fortschreibung in der EU-Energieeffizienz-Richtlinie (Richtlinie 2012/27/EU vom 25.10.2012).
- Der Nutzungsgrad der KWK-Anlage für den Entlastungszeitraum beträgt mindestens 70 %.
- Die vollständige Steuerentlastung wird nur für die Zeit gewährt, in der sich die Hauptbestandteile der KWK-Anlage in der Abschreibungsphase entsprechend den Vorgaben des § 7 des EStG befinden (dies sind für KWK-Anlagen in der Regel zehn Jahre). Werden Hauptbestandteile erneuert und betragen die Kosten der Erneuerung nachweislich mehr als 50 % der Kosten für die Neuerrichtung der Anlage, verlängert sich die Frist um den Abschreibungszeitraum der erneuerten Teile.

Tabelle 13. Energiesteuersätze

Energieerzeugnis	Ermäßigter Steuersatz für Heizstoffe	Ermäßigter Steuersatz
Leichtes Heizöl (Diesel)	61,35 €/1000 ℓ	0,62 ct/kWh (bei 11,8 kWh/kg und 839,99 kg/ℓ)
Erdgas	5,50 €/MWh	0,55 ct/kWh (H_s)
Flüssiggas	60,60 €/1000 kg	0,47 ct/kWh (H_i) (bei 12,8 kWh/kg)
Kohle	0,33 €/GJ	0,118 ct/kWh (H_i)

Tabelle 14. Mindeststeuersätze gemäß EU-Energiesteuer-Richtlinie

Energieerzeugnis	Mindeststeuersatz für Heizstoffe	Mindeststeuersatz für Heizstoffe (umgerechnet)
Leichtes Heizöl	21,0 €/1000 ℓ	0,227 ct/kWh (bei 11,8 kWh/kg und 839,99 kg/ℓ)
Erdgas	1,08 €/MWh	0,108 ct/kWh
Flüssiggas	0 €/1000 kg	0, ct/kWh

Der vollständigen Entlastung von der Energiesteuer werden gemäß Auskunft der Generalzolldirektion alle seit 01.04.2012 gewährten Zuschüsse gegengerechnet (z. B. Investitionsbeihilfe gemäß Mini-KWK-Richtlinie usw.).

KWK-Anlagen bis 2 MW_{el}, die entweder nicht das Kriterium der Hocheffizienz oder deren Abschreibungszeitraum bereits abgelaufen ist, deren Nutzungsgrad jedoch mindestens 70 % beträgt, werden immer noch bis zum Mindeststeuersatz gemäß EU-Steuer-Richtlinie teilentlastet (ohne Gegenrechnung von Zuschüssen), siehe Tabelle 14.

Der Anlagenbetreiber muss bei der Antragstellung beim Hauptzollamt entscheiden, ob er die vollständige oder die Teilentlastung beantragen will. Das sollte mithilfe der Gegenrechnung (s.o.) abgewogen werden.

8.5 Stromsteuergesetz

Die Stromsteuer wird erhoben auf erzeugten Strom, unabhängig vom verwendeten Brennstoff.

Nach dem Stromsteuergesetz ist Strom aus kleinen Stromerzeugungsanlagen mit einer Nennleistung bis zu 2 MW_{el} von der Stromsteuer befreit, wenn der Strom vom Erzeuger in räumlichem Zusammenhang zur Stromerzeugungsanlage zum Selbstverbrauch entnommen wird oder vom Betreiber der Anlage an Letztverbraucher geliefert wird. Der Stromsteuersatz beträgt derzeit 2,05 ct/kWh.

Der Begriff „räumlicher Zusammenhang“ ist anzunehmen bis zu einer Entfernung von 4,5 km, jedoch wird in regelmäßiger Rechtsauslegung angenommen, dass die Anlage und der Verbraucher sich auf dem gleichen Grundstück oder benachbarten Grundstücken befinden müssen. Im Einzelfall ist dies jedoch mit dem Hauptzollamt zu klären.

Mit der Änderung zur Stromsteuerverordnung im Jahr 2011 wurde festgelegt, dass einzelne Stromerzeugungseinheiten, die zentral gesteuert werden, als „eine Anlage“ zur Stromerzeugung gelten, sofern der Strom zumindest teilweise in ein Netz der allgemeinen Versorgung eingespeist wird. Dies bedeutet, dass sie bezüglich ihrer elektrischen Leistung zur Festlegung der Stromsteuerermittlung addiert werden müssen. Dies kann dazu führen, dass die Summe mehrerer kleiner Anlagen unter 2 MW_{el} zur Überschreitung dieses Grenzwerts führt und damit zur Steuerpflichtigkeit der jetzt als eine Einheit zu betrachtenden KWK-Anlage.

Allerdings hat das Bundesministerium für Finanzen (BMF) per Erlass verschiedene Einschränkungen und Ausnahmemöglichkeiten beschrieben, in denen von der Addition der Einzelkapazitäten Abstand genommen werden darf. Insbesondere bei der Errichtung virtueller Kraftwerke oder Pools von KWK-Anlagen sollte dieser Rechtstatbestand vorab sorgfältig vom Betreiber geprüft werden.

8.6 Umsatzsteuer

Grundsätzlich ist der Betreiber einer KWK-Anlage ein Unternehmer im umsatzsteuerlichen Sinn. Ob für die Investitions- und Betriebskosten, wie Brennstoff und Wartung, ein Vorsteuerabzug geltend gemacht werden kann, hängt von der umsatzsteuerlichen Behandlung der mit der KWK-Anlage erzielten Umsätze ab.

Bei kleineren Umsätzen bis 17.500 € im Jahr kann die sogenannte Kleinunternehmerregelung gewählt werden. In diesem Falle muss keine Umsatzsteuererklärung abgegeben werden. Es entfällt aber der Vorteil der Vorsteuer-Rückerstattung. Ebenso wird vom Netzbetreiber keine Umsatzsteuer auf die Einspeisevergütungen gezahlt.

Wird die KWK-Anlage im selbst genutzten Einfamilienhaus betrieben, ist in der Regel ein voller Vorsteuerabzug möglich, wenn die unternehmerische Nutzung mindestens 10 % beträgt. Hierzu zählt die Einspeisung in das öffentliche Stromnetz. Als Gegenleistung für den Vorsteuerabzug sind der selbst verbrauchte Strom und die selbst verbrauchte Wärme der Umsatzsteuer zu unterwerfen. Gängig ist eine anteilige Aufteilung zwischen privater und gewerblicher Nutzung. So wird z. B. unterstellt, dass der Leistungsanteil der Stromerzeugung dem Gewerbe zugeordnet

wird und der Leistungsanteil der Wärmeerzeugung privat eingeordnet wird.

Anders verhält es sich, wenn der Betreiber der KWK-Anlage sein Mietshaus mit der KWK-Wärme und dem KWK-Strom versorgt. Hier teilt die Wärme- und Stromlieferung an die Mieter als umsatzsteuerliche Nebenleistung das Schicksal der umsatzsteuerfreien Hauptleistung der Wohnungsvermietung. Wärme- und Stromlieferung aus der KWK-Anlage sind also umsatzsteuerbefreit, insoweit entfällt auch der Vorsteuerabzug für die Investitionskosten.

8.7 Ertragsteuer

Der Betreiber einer KWK-Anlage erzielt Einkünfte aus einem Gewerbebetrieb. Die Gewinnermittlung erfolgt in der Regel durch Einnahmen-Überschuss-Rechnung. Bei der Vermietung von Wohnraum sind die Einnahmen aus Wärme und Strom keine Einnahmen aus Vermietung und Verpachtung, sondern Betriebseinnahmen des Gewerbebetriebs. Im Gegenzug sind die Ausgaben für Brennstoff und Wartung Betriebsausgaben.

Während die gewerbliche Tätigkeit bei einem privaten Vermieter in der Regel keine Probleme bereitet, ist bei vermietenden Personengesellschaften, aber auch bei Wohnungseigentümergemeinschaften Vorsicht geboten. Hier bedarf es dringend einer steuerlichen Beratung. Hier können die gewerblichen KWK-Einkünfte eine Auswirkung auf die Vermietungseinkünfte haben und diese ebenfalls zu gewerblichen Einkünften umqualifizieren. Wohnungsgenossenschaften und Wohnungs(bau)gesellschaften können so durch den Betrieb einer KWK-Anlage ihre körperschaftsteuerlichen und gewerbesteuerlichen Privilegien verlieren. Vorhandene Lösungsansätze sollten mit einem Steuerberater geklärt werden.

Im Hinblick auf die Abschreibung sind KWK-Anlagen als selbstständige bewegliche Wirtschaftsgüter zu behandeln. Die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer beträgt 10 Jahre, sodass sich jährliche lineare Abschreibungen von 10 % ergeben. Unter bestimmten Voraussetzungen sind Sonderabschreibungen in Höhe von 20 % und ein Investitionsabzugsbetrag von bis zu 40 % im Jahr vor der KWK-Anlagen-Investition möglich. In einigen Fällen werden KWK-Anlagen aber auch als Gebäudebestandteile über 50 Jahre abgeschrieben.

8.8 Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG)

Nach dem EEWärmeG sind alle Eigentümer von Gebäuden, die neu errichtet werden, verpflichtet, den Wärmebedarf ihres Gebäudes durch die anteilige Nutzung von erneuerbaren Energien zu decken. Alternativ können sie ihre Nutzungspflicht auch erfüllen, wenn sie mindestens 50 % Wärme für Heizung, Warmwasser und Kühlung mit Kraft-Wärme-Kopplung erzeugen.

Dies gilt für Neubauten, die ab dem 01.01.2009 errichtet worden sind (Ausnahme: Bauantrag wurde vor dem 01.01.2009 bereits gestellt). Die Bundesländer sind ermächtigt, diese Nutzungspflicht für den Einsatz erneuerbarer Energien zur Gebäudebeheizung auch auf Bestandsbauten auszudehnen. Dies ist z. B. heute schon in Baden-Württemberg so geregelt. Im Falle der Nichteinhaltung dieser Nutzungspflicht, die für alle Neubauten mit einer Nutzfläche größer als 50 m^2 gilt, ist ein Bußgeld zu zahlen.

Die Nutzungspflicht nach dem EEWärmeG kann erfüllt werden, z. B. durch den Einsatz gasförmiger Biomasse, unter der Voraussetzung, dass

- mindestens 30 % des Wärmeenergiebedarfs durch diese gasförmige Biomasse gedeckt werden und
- diese gasförmige Biomasse ausschließlich in KWK-Anlagen eingesetzt wird.

Als „Ersatzmaßnahme“ zur Erfüllung des EEWärmeG gilt auch die Deckung des Wärmebedarfs des Gebäudes zu mindestens 50 % unmittelbar aus hocheffizienten KWK-Anlagen oder Anlagen zur Nutzung von Abwärme. Ebenfalls zugelassen als Ersatzmaßnahme ist die Deckung des Wärmebedarfs aus Nah- oder Fernwärmenetzen, unter der Voraussetzung, dass die Wärmeenergie in diesen Netzen zu einem wesentlichen Teil aus erneuerbaren Energien erzeugt wird oder dass zumindest 50 % der Wärmeenergie aus hocheffizienten KWK-Anlagen bzw. Abwärme stammen.

8.9 Energieeinsparverordnung (EnEV)

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) soll dazu beitragen, einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand bis zum Jahr 2050 zu erreichen. Des Weiteren bildet die EnEV auch die Grundlage für die Erstellung von Gebäudeenergieausweisen. Hierzu definiert sie Grenzwerte für den Jahresprimärenergieverbrauch und den Wärmeverlust des neu zu errichtenden Gebäudes. Neben dem Neubau müssen auch im Rahmen einer Gebäudesanierung gegebenenfalls die Anforderungen der EnEV eingehalten werden. Die Berech-

nung des Primarenergieverbrauchs und des Wärmeverlusts eines Gebäudes erfolgen anhand der DIN V 18599 (Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude) oder alternativ über DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10 (Wohngebäude). Eine wichtige Rolle spielt hierbei der sogenannte Primärenergiefaktor des eingesetzten Energieträgers. Mithilfe dieses Faktors wird der energetische Aufwand der vorgelagerten Prozessketten (Gewinnung, Umwandlung und Verteilung) des eingesetzten Energieträgers mit in die Berechnungen einbezogen und somit vom Endenergiebedarf auf den Primärenergiebedarf des Gebäudes umgerechnet. Je niedriger der Primärenergiefaktor ist, desto ökologischer ist der eingesetzte Energieträger.

In der Regel bewegen sich die Primärenergiefaktoren von Mikro-KWK-Anlagen zwischen 0,3 und 0,5. Liegt kein Gutachten vor, kann für die KWK standardmäßig 0,7 angesetzt werden.

8.10 Förderinstrumente

Neben den genannten gesetzlichen Förderungen für KWK-Anlagen existiert eine Reihe weiterer Fördermöglichkeiten, von denen einige wesentliche im Folgenden dargestellt werden.

8.10.1 Mini-KWK-Förderrichtlinie

Das Bundesministerium für Umwelt, Reaktorschutz und Emissionsschutz (BMU) hat am 15.12.2014 die neue Richtlinie zum Förderprogramm für Mini-KWK-Anlagen in Kraft gesetzt. Dieses Förderprogramm gilt für KWK-Anlagen bis 20 kW_{el}. Die Fördervoraussetzungen und Antragsunterlagen stehen auf der Website des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAfA) zum Download bereit.

Der nach diesem Förderprogramm gezahlte einmalige Investitionszuschuss ist gestaffelt nach der elektrischen Leistung der KWK-Anlage – z. B. erhalten Anlagen mit 1 kW_{el} 1.900 EUR, große Anlagen mit 20 kW_{el} hingegen 3.500 EUR. Hinzu kommt ein Bonus für Wärmeeffizienz sowie für Stromeffizienz, wenn die Anlage weiterführende Kriterien erfüllt.

Die Investitionsförderung ist geknüpft an eine Reihe von Anforderungen. Die Anlagen dürfen nicht in einem Gebiet mit Anschluss- und Benutzungsgebot für Fernwärme liegen und müssen in einem Wartungsvertrag betreut werden. Die Primäreinsparung für Anlagen < 10 kW_{el} muss mindestens 15 % und für Anlagen von 10 kW_{el} bis 20 kW_{el} mindestens 20 % betragen. Diese Primärenergieeinsparung ist zu ermitteln nach den Vorschriften der EU-KWK-Richtlinie 2004/8/EG. Weitere Voraussetzung ist das Vorhandensein eines Wärmespeichers mit einem Energiegehalt von mindestens 1,6 kWh_{th} pro installiertem kW thermischer Leistung sowie einer Steuerung und Regelung für eine wärmegeführte bzw. stromorientierte Betriebsweise inklusive eines intelligenten Wärmespeichermanagements und eines Messsystems zur Bestimmung des aktuellen Strombedarfs (Smart-Meter) für Anlagen ab 3 kW_{el}. Fördervoraussetzung ist zudem, dass die KWK-Anlage in der Liste der förderfähigen Anlagen des BAfA enthalten ist (siehe www.bafa.de).

Anträge für diese Investitionsförderung sind vor Maßnahmenbeginn beim BAfA per Formblatt zu stellen.

8.10.2 KfW-Förderprogramm

Im Rahmen der KfW-Förderung werden günstige Kredite teilweise auch für Projekte mit KWK-Anlagen vergeben. Detaillierte Informationen hierzu müssen bezogen auf das jeweilige KWK-Projekt bei der zuständigen Hausbank im Hinblick auf das KfW-Programm erfragt oder bei der KfW selbst im Internet oder per Anfrage recherchiert werden. Teilweise sind diese Kredite zu den übrigen Fördermaßnahmen zusätzlich einsetzbar.

8.10.3 Förderprogramm von Bundesländern, Kommunen und Unternehmen

In verschiedenen Bundesländern sind neben den bundesweiten Förderungen auch landespezifische Fördermaßnahmen für KWK-Anlagen aufgelegt worden. Beispielsweise gibt es besondere Förderprogramme in Sachsen sowie Nordrhein-Westfalen, und auch in Hessen ist ein derartiges Förderprogramm in Vorbereitung.

Darüber hinaus legen auch Energieversorgungsunternehmen teilweise Förderprogramme zur Entwicklung der KWK-Anlagen auf. Hier lohnt eine Nachfrage bei örtlichen oder auch überregionalen Energieversorgern. Auskünfte zu besonderen Fördermaßnahmen sind beispielsweise erhältlich bei den Energieagenturen der Länder, über besondere Energieberater oder Energieförderportale im Internet sowie bei Verbänden (z. B. B.KWK).

9 Aktuelle Ansätze und Perspektiven

Fakten in Kürze

- Die Energieversorgungsstruktur wird zukünftig vermehrt dezentral und auf Basis erneuerbarer Energien stattfinden.
- Im Smart Grid als Energienetzwerk soll das Verbrauchs- und Einspeiseverhalten aller Marktteilnehmer integriert werden.
- Mithilfe der kommunikationstechnischen Bündelung einer hohen Anzahl von Mikro-KWK-Anlagen könnten diese entsprechende technische Aufgaben im Niederspannungsnetz übernehmen.
- Energieversorger werden die Betreiber von nicht direkt steuerbaren Mikro-KWK-Anlagen durch variable Tarife motivieren, Strom bedarfsgerecht zu erzeugen. Über Wärme- und Kältespeicher, die mit der KWK-Anlage installiert werden, kann (insbesondere in den Sommermonaten) die Stromerzeugung vom Wärmebedarf zeitlich entkoppelt werden.
- Die Kombination von Geschäftsmodellen (Energielieferung, Beschaffungsoptimierung, Netzlastmanagement, Regelenergiebereitstellung und Systemdienstleistungen) wird die Komplexität für Mikro-KWK-Steuerungen zwar erhöhen, aber die Ertragschancen verbessern. Dazu müssen Energiemanagementsysteme entwickelt und etabliert werden.

Die von der Bundesregierung vorgegebenen Klimaschutzziele forcieren den Ausbau erneuerbarer Energien und führen zu großen Herausforderungen bei der Integration von stark volatilen erneuerbaren Energien in das Stromnetz. Neben dem massiven Ausbau der Stromnetze gibt es unterschiedliche Ansätze mithilfe von KWK-Anlagen kritische Netzlasten auszugleichen und gleichzeitig die Effizienz von KWK-Anlagen zu erhöhen. Nachfolgend werden einige der derzeit wichtigsten Ansätze erläutert.

Durch dezentrale KWK-Anlagen wird Energie dort bereitgestellt, wo sie benötigt wird. Der Eigenverbrauch des KWK-Stroms durch den Betreiber entlastet das bestehende Stromversorgungssystem, was sowohl Leitungsverluste verringert als auch die Notwendigkeit zum massiven Ausbau des Stromnetzes reduziert.

Die gezielte Ansteuerung von KWK-Anlagen im Rahmen von virtuellen Kraftwerken – also von einer großen Anzahl kleinerer Anlagen, die über ein Managementsystem miteinander kommunizieren und entsprechend gesteuert werden können – kann ebenfalls Lastspitzen im Stromnetz verringern.

Bild 27 zeigt ein mögliches Szenario für das Energiesystem der Zukunft.

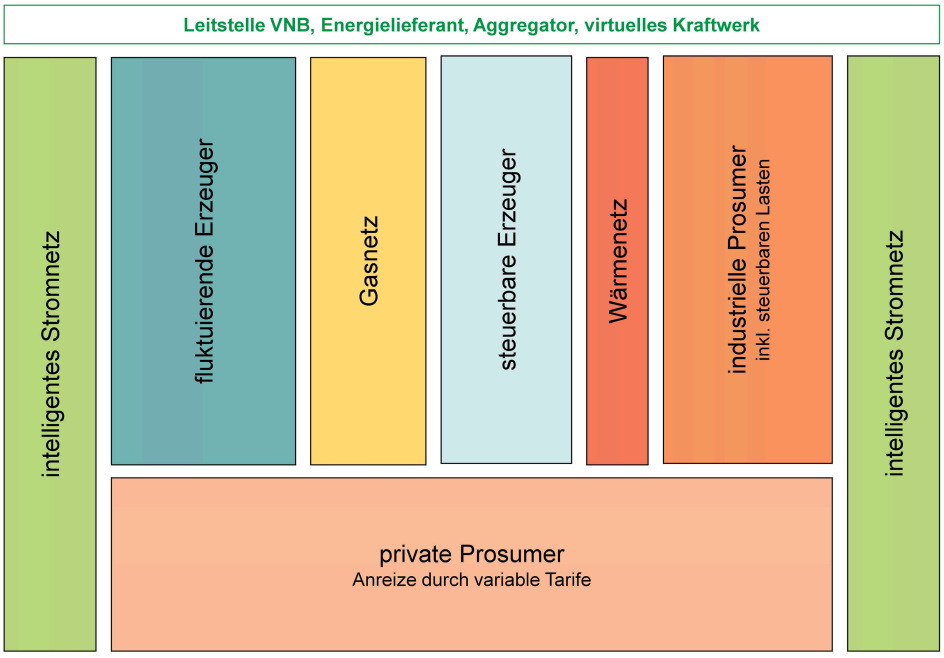


Bild 27. Vision eines nachhaltig zukunftsorientierten Energiesystems

Mit dem zunehmenden Anteil an regenerativ erzeugtem Strom im deutschen Strommix machen sich schwankende Anteile des Ökostroms im Netz massiv bemerkbar. In Fällen einer geringen oder zu hohen Wind- und Solarleistung können die damit im Stromnetz entstandenen Unter- bzw. Überdeckungen über KWK-Anlagen je nach Ausbaugrad ausgeglichen werden.

Da bei dem Einsatz einer KWK-Anlage gleichzeitig Strom als auch Wärme produziert wird, gilt diese Aussage insbesondere in den Jahreszeiten mit ausreichendem Wärmebedarf. In den Sommermonaten kann über Wärme- und Kältespeicher, die mit der KWK-Anlage installiert werden, die Stromerzeugung vom Wärmebedarf zeitlich entkoppelt werden, um den Regelumfang der KWK-Anlage noch weiter zu steigern und so den Strom bedarfsgerecht zu erzeugen.

9.1 Smart Grid

„Ein Smart Grid ist ein Energienetzwerk, welches das Verbrauchs- und Einspeiseverhalten aller Marktteilnehmer, die mit ihm verbunden sind, integriert. Es sichert ein ökonomisch effizientes, nachhaltiges Versorgungssystem mit niedrigen Verlusten und hoher Verfügbarkeit“ (Definition BDEW).

Die Struktur des elektrischen Netzes ist historisch bedingt auf eine Erzeugung elektrischer Energie in zentralen, regelbaren Großkraftwerken mit einer Einspeisung in der Höchst- und Hochspannungsebene (380 kV, 220 kV und 110 kV) ausgelegt. Die weiträumige Übertragung der Energie erfolgt ebenfalls in dieser Höchst- und Hochspannungsebene. Die anschließende Verteilung in Verbrauchszentren wird über die Verteilnetze (110 kV, 20 kV, 10 kV) realisiert. Industrieller und großgewerblicher Verbrauch findet durch eine Anbindung an das Verteilnetz statt. Privatverbraucher und kleine Gewerbebetriebe werden an das Niederspannungsnetz (0,4 kV) angebunden. Der Leistungsfluss ist somit grundlegend von den hohen zu den niedrigen Spannungsebenen ausgelegt.

Die Elemente des Übertragungsnetzes und mit geringerer Dichte auch Elemente des Verteilnetzes sind kommunikationstechnisch (uni- oder bidirektional) an eine zentrale Netzleitstelle angebunden. Dadurch sind die Zustände der genannten Elemente in der Netzleitstelle bekannt und können zu einer zentralen Bewertung (und bei bidirektionaler Anbindung auch zur Regelung) des Gesamtsystems herangezogen werden.

Erneuerbare Energien werden seit einigen Jahren intensiv in das elektrische Netz einbezogen. Die Einspeisung der elektrischen Energie geschieht dabei je nach Technologie und Aggregation auf unterschiedlichen Spannungsebenen. Während größte Windparks an das Hochspannungsnetz angebunden werden, geschieht die Einspeisung von kleineren Wind- oder Fotovoltaikparks auf Mittelspannungsebene. Einzelne Windkraftanlagen sowie kleinere PV-Anlagen werden an das Niederspannungsnetz angebunden. Der oben beschriebene Leistungsfluss von der hohen zur niedrigen Spannungsebene – auf den die Komponenten des Netzes ausgelegt wurden – kann somit nicht mehr permanent eingehalten werden.

Um die technische Stabilität des elektrischen Netzes trotz der stark gestiegenen Komplexität weiterhin sicherstellen zu können, soll zukünftig eine Vielzahl von Elementen der Verteil- und Niederspannungsnetze in Systemdienstleistungen verknüpft und gegebenenfalls in eine übergeordnete Netzleittechnik integriert werden. Diese kommunikations- und regelungstechnische Integration vieler Einzelelemente wird oft vereinfachend mit dem Begriff „Smart Grid“ bezeichnet.

Die zukünftige Struktur des Smart Grid wird in einer Vielzahl von Forschungsprojekten untersucht. Stellvertretend ist derzeit insbesondere das vom Bund unterstützte Förderprogramm „SINTEG – Schaufenster intelligente Energie“ zu nennen (www.sinteg.de).

9.2 Power-to-Gas

Mit dem Energiekonzept aus 2011 hat die Bundesregierung die Energieversorgung bis 2050 vorgezeichnet. Wesentliche Voraussetzungen sind die Versorgungssicherheit, die Unabhängigkeit von Energieimporten, Umwelt- und Klimaschutz sowie wirtschaftliche Tragfähigkeit. Der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch soll bis 2050 auf 80 % gesteigert und eine Verminderung des Primärenergieverbrauchs um 50 % in 2050 gegenüber 2008 erreicht werden.

Daraus resultiert die Notwendigkeit, zum Teil nicht kontinuierlich verfügbare erneuerbare Energien und eine mögliche Lastverschiebung von der zentralen zur dezentralen Energieerzeugung umzusetzen. Makroskopisch liegt eine Lösungsstrategie im intelligenten „Zusammenwachsen“ der Strom- und Gasnetze. Dazu gehört auch die verfügbarkeits- und bedarfsgesteuerte Umwandlung oder Speicherung von Strom aus Windkraft und Fotovoltaik im Erdgasnetz. Insgesamt kann aus diesem Ansatz eine Vielzahl von Verwendungspfaden herausgearbeitet werden, die flexible Lösungen für die Integration erneuerbarer Energien liefern. In Bild 28 ist der globale Zusammenhang dargestellt. Ein wichtiger Bestandteil in diesem System sind KWK-Anlagen und insbesondere Mikro-KWK-Anlagen. Es gilt allerdings zu betonen, dass das gesamte

Konzept des Power-to-Gas mit Rückverstromung durch KWK noch erforscht wird und erst Pilotanlagen erprobt wurden.

Bei der Power-to-Gas-Technologie wird der überschüssige elektrische Strom aus erneuerbaren Energien wie Wind- oder Fotovoltaikstrom nicht wie bisher zu niedrigen oder gar negativen Preisen an der Leipziger Strombörse ins Ausland verkauft, sondern über eine hocheffiziente Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt. Der erzeugte Wasserstoff kann direkt oder über Methanisierung ins Erdgasnetz eingespeist und gespeichert werden. Im Bedarfsfall kann der im Erdgasnetz gespeicherte Wasserstoff über dezentrale und zentrale intelligent gesteuerte Mikro-KWK-Anlagen hocheffizient rückverstromt werden. Die dabei anfallende Wärme wird über innovative Speicherlösungen zur Gebäudebeheizung und Trinkwassererwärmung genutzt.

In ersten Großprojekten, z. B. „Hybride“ mit Beteiligung von Übertragungsnetzbetreibern aus dem Bereich „Strom und Gas“, wird aktuell die großtechnische Herstellung von Wasserstoff mittels Strom aus erneuerbaren Energien realisiert. Elektrische Leistungen liegen hier im Bereich von 100 MW.

9.3 Virtuelle Kraftwerke

Die Konzeption des virtuellen Kraftwerks beruht auf dem Einsatz mehrerer dezentraler, steuerbarer Stromerzeuger durch ein zentral organisiertes Energiemanagementsystem. Mögliche Optimierungsziele sind z. B. die Einhaltung eines vorgegebenen Gesamtleistungsprofils trotz der Nutzung fluktuierender Primärenergiequellen, die Minimierung von Netzverlusten oder die Spitzenlastreduzierung im betrachteten Netzgebiet. Dies ermöglicht wirtschaftliche Vorteile für den Betreiber des virtuellen Kraftwerks sowie gegebenenfalls für den Netzbetreiber und die dezentralen Erzeuger, insbesondere auch KWK-Anlagen. Ergebnis der Optimierung sind Fahrpläne für die beteiligten KWK-Anlagen, die von der Zentrale berechnet und an die einzelnen Geräte versandt werden.

Vorteilhaft bei diesem Konzept ist die direkte Kontrollmöglichkeit der KWK-Anlagen durch die Zentrale und die Aggregation einer relevanten Energiemenge. Dadurch lassen sich vielfältige Geschäftsmodelle realisieren:

- Erzielen eines vorhersagbaren Bilanzfahrplans für Wirk- und/oder Blindleistung
- Unterstützung des Netzlastmanagements
- Teilnahme am Regelenergiemarkt

Schwierig wird die Umsetzung des virtuellen Kraftwerks, wenn eine große Zahl von Geräten einbezogen werden sollen, die sich im Besitz mehrerer Parteien befinden. Denn die von der Zentrale benötigte Datenbasis sowie die Komplexität des Optimierungsproblems wachsen mit der Anzahl der beteiligten Geräte deutlich.

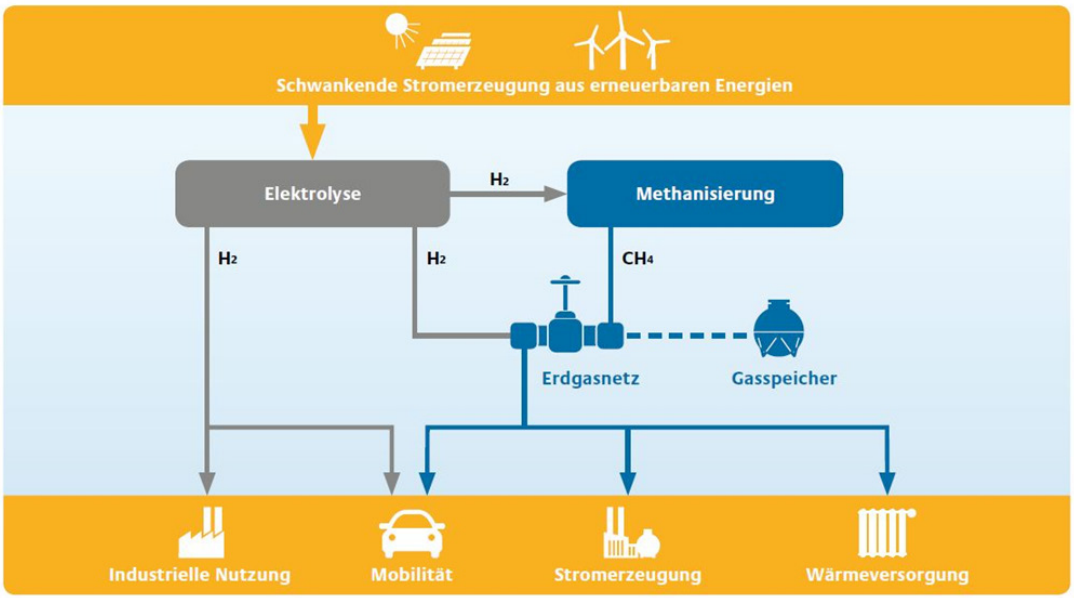


Bild 28. Power-to-Gas in einem zukünftigen fluktuierten Energieversorgungssystem (Quelle: dena)

Hier setzt das „Konzept der dezentralen Entscheidung“ an. Es dient zur technischen und wirtschaftlichen Integration von vielen (1.000 oder mehr) kleinen (< 100 kW_{el}) dezentralen, steuerbaren Erzeugungs- und Verbrauchsgeräten im Niederspannungsnetz. Hierbei wird die Entscheidung über den optimalen Betrieb der KWK-Geräte unmittelbar am Netzanschlusspunkt getroffen, wobei dort verfügbare lokale Informationen sowie relevante zentrale Informationen verwendet werden. Die wichtigsten zentralen Informationen sind dabei zeitabhängige Stromtarife, die von der Leitstelle generiert und als Tarifprofile versendet werden. Die Tarifprofile sind dabei jeweils für den Folgetag gültig.

An jedem Anschlusspunkt im Niederspannungsnetz wird ein Energiemanagementsystem zugeordnet, das die einbezogenen Geräte automatisch steuert. Die variablen Stromtarife werden von einer übergeordneten Instanz berechnet, welche die relevanten Daten von der Netzleitstelle des Verteilnetzbetreibers und der Energiebörse EEX erhält. Diese Instanz können der Verteilnetzbetreiber, der Energielieferant, ein Aggregator oder ein unabhängiger Dienstleister sein.

Direkte und indirekte Steuerungsinstrumente

Das Smart Grid wird als intelligent bezeichnet, weil es erkennt, wann die Gefahr besteht, dass kritische Netzzustände entstehen können und dann den beteiligten Akteuren rechtzeitig Signale sendet, um die Gefahrensituation zu beherrschen. Dies bedeutet konkret, dass steuerbare Erzeuger und Verbraucher aufgefordert werden, sich in der jeweiligen Situation ein- bzw. auszuschalten.

Hierzu werden zumeist direkte Steuerungsinstrumente wie Sperrzeiten verwendet. Auch indirekte Steuerungsinstrumente wie variable Tarife und variable Netzentgelte werden aktuell für das Smart Grid diskutiert. Variable Tarife sollen den Stromkunden dazu motivieren, den Stromverbrauch von kostenintensiven in günstige Zeiten zu verlagern. Der Kunde entscheidet, wann er seine Verbraucher in Betrieb nimmt.

Ein indirektes Steuerungsinstrument ist also kein Steuerungskreis, der über ein Stellglied Preise so lange anpasst, bis die Kunden die gewünschte Menge Strom abnehmen. Die Steuerungswirkung ist nur begrenzt und eventuell nimmt ein Kunde sogar höhere Stromkosten in Kauf, um seine Geräte wie gewohnt zu betreiben. Variable Tarife bewirken so aber Verursachungsgerechtigkeit. Kunden, die sich nach den Tarifen richten, zahlen weniger als Kunden, die dieses nicht tun.

Direkte Steuerungssysteme besitzen gegenüber variablen Tarifen den klaren Vorteil, dass durch zentrale Abschaltungen der steuerbaren Verbraucher oder Erzeuger die beabsichtigten Grenzwerte und Ziele nach jetzigem Kenntnisstand viel besser erreicht werden können. Allerdings ist die Allokation von Kapazitäten (bilaterale Verträge mit Nutzern von abschaltbaren Verbrauchern) sehr zeitaufwendig. Deshalb werden derzeit nur Anlagen ab einer bestimmten Leistung (ca. 100 kW_{el}) unter Vertrag genommen. Eventuell werden in Zukunft lokale Regelenergiemärkte weitgehend automatisiert die Allokation entsprechender Kapazitäten ermöglichen.

Im Falle der Mikro-KWK ist zu berücksichtigen, dass die Betreiber Prosumer, also gleichzeitig Stromkunde und Stromerzeuger sind. Der Prosumer wird immer versuchen, primär die Stromerzeugung in die Zeiten des eigenen Stromverbrauchs zu legen. Hier können variable Tarife einen Beitrag zur Netzstabilität in Form von variablen Netzentgelten leisten und auch die Interessen von Energielieferanten können durch variable Energielieferpreise unterstützt werden.

Smart-Meter-Gateway und Energiemanagement-Gateway

In Zukunft sollen auch Privathaushalte Akteure des Smart Grid werden. Die natürliche Schnittstelle zwischen dem Energieversorger und den Privatkunden ist der Stromzähler. Dieser soll ergänzt werden um ein Smart-Meter-Gateway, das Zählerdaten hoch aufgelöst in mindestens 15-minütigen Intervallen online an den Messstellenbetreiber sendet. Dies ist die Grundlage dafür, dass auch Privathaushalte als Akteure am Smart Grid teilnehmen und an den vielfältigen Smart-Grid-Geschäftsmodellen partizipieren oder von diesen profitieren können. Das Smart-Meter-Gateway unterliegt sowohl dem Eichrecht als auch hohen Sicherheitsauflagen, die vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) vorgegeben werden. Der erste Hersteller eines Smart-Meter-Gateways wurde Ende 2018 vom BSI zertifiziert. Der Rollout des Systems wird starten, sobald das BSI eine Einbauverpflichtung ausspricht. Die erste Marktanalyse dazu wurde Ende Januar 2019 erstellt. Das BSI kam dabei zu dem Ergebnis, dass zurzeit eine Einbauverpflichtung nicht ausgesprochen werden kann. Mit weiteren zertifizierten Smart-Meter-Gateways ist noch 2019 zu rechnen. Für alle KWK-Anlagen ab 7 kW_{el} wird dann der Einbau eines Smart-Meter-Gateways verpflichtend sein, wenn drei unabhängige Hersteller ein zertifiziertes Gerät am Markt platziert haben. Zusätzlich muss gewährleistet sein, dass die Schaltung auch ohne Smart-Meter-Gateway durchgeführt werden kann. Auch kleinere Anlagen können das System auf

Wunsch erhalten. Ansprechpartner ist jeweils der verantwortliche Messstellenbetreiber, siehe auch [9].

Als Schnittstelle zwischen dem Smarthome und dem Smart Grid werden derzeit von verschiedenen Herstellern Energiemanagementsysteme angeboten, welche als Plattform für ein ganzheitliches Energiemanagement im Haushalt dienen und die Interessen des Kunden wahrnehmen sollen. Über diese Schnittstelle sollen alle relevanten Daten für das Energiemanagement von variablen Tarifen über diverse Prognosezeitreihen bis hin zu direkten Steuerungssignalen an den Kunden gesendet werden. Entsprechende Systeme werden von Anlagenherstellern, Dienstleistern und Energieversorgern angeboten. Eine solche Schnittstelle soll zukünftig über den CLS-Kanal (CLS = Controllable Local System) des Smart-Meter-Gateways abgesichert werden.

Das Energiemanagement sammelt und interpretiert, dabei die Daten aller im Haushalt existierender Geräte, von fluktuierenden Erzeugern bis hin zu steuerbaren Verbrauchern und Erzeugern. Es optimiert den Gerätebetrieb in einem ganzheitlichen Energiemanagement.

Derzeit sind diverse Aktivitäten in der Entwicklung, um Datenmodelle, Kommunikationstreiber und Service-Dienste für Energiemanagement-Software zu standardisieren.

9.4 Zukünftige Geschäftsmodelle

Langfristig wird die von der Politik beschlossene Umstellung hin zu einem nachhaltigen Energiesystem dafür sorgen, dass in Zukunft Mikro-KWK insbesondere dann rentabel betrieben werden können, wenn sie intelligent gesteuert werden. Die Bundesregierung hat diesen Umstand erkannt und deshalb die Instrumente „Markt- und Flexibilitätsprämie“ im EEG zur bedarfsgerechten Stromeinspeisung ergänzt. Nachfolgend werden mögliche Geschäftsmodelle für eine nachhaltige Energiebereitstellung durch steuerbare Erzeuger vorgestellt. Abschließend werden Besonderheiten von Mikro-KWK-Anlagen und den sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Geschäftsmodellentwicklung erläutert.

Geschäftsmodellbereiche

Geschäftsmodellbereiche für Biogasanlagen in einem nachhaltigen Energiesystem wurden wissenschaftlich schon ausgiebig betrachtet (vgl. z. B. [10]). Mögliche Geschäftsmodellbereiche für Mikro-KWK-Anlagen ergeben sich aus den in Tabelle 15 dargestellten existierenden und zukünftigen Märkten, Anreizsystemen, Strategieansätzen sowie Einflussfaktoren und Nebenbedingungen.

Folgend werden fünf Geschäftsmodellbereiche kurz erläutert, bei denen der Mikro-KWK-Anlagenbetreiber immer der initiierende Akteur ist, der mit anderen Akteuren in Interaktion tritt. Er wendet Zusatzkosten

Tabelle 15. Märkte, Anreizsysteme und Einflussfaktoren für Geschäftsmodelle

Energiemärkte Strom, Gas und Wärme	Anreizsysteme und Strategieansätze	Einflussfaktoren und Nebenbedingungen
■ Terminmarkt ■ Spotmarkt ■ Ausgleichsenergie(-markt) ■ Regelenergiemarkt ■ lokale Strommärkte [a)] ■ lokale Regelenergiemärkte [b)]	■ variable Energielieferpreise ■ variable Netzentgelte ■ vermiedene Netzentgelte ■ Eigenstromoptimierung ■ Spitzenlastoptimierung	■ Anlagencharakteristika (Anfahr-/Abfahrverhalten etc.) ■ Wetter-, Verbrauchs- und Erzeugungsprognosen ■ wärme- oder stromgeführt ■ Verbund- oder Inselnetz

a) Lokale Strommärkte werden in verschiedenen Projekten, z. B. „Designnetz - Verbunden mit kreativer Energie“ (www.designetz.de) dargestellt, entwickelt und getestet.

b) Ein lokaler Regelenergiemarkt wäre für den Verteilnetzbetreiber eine Möglichkeit, Kapazitäten in einem Auktionsverfahren (ähnlich der Minutenreserve) zu allokieren, die direkt nach dessen Zielvorstellungen (Spannungshaltung, Netzspitzenlastoptimierung etc.) gesteuert werden könnten. Derzeit gibt es noch keine lokalen Regelenergiemärkte.

auf, die durch Einsparungen und Zusatzerträge mindestens kompensiert werden müssen. Die Geschäftsmodellbereiche sind als Baukastensysteme zu verstehen, aus denen das individuell optimale Geschäftsmodell zu entwickeln ist. Derzeit verhindern teilweise noch regulatorische und ökonomische Barrieren eine erfolgreiche Umsetzung der Geschäftsmodelle.

Energielieferung

Derzeit sind Verteilnetzbetreiber verpflichtet, den Strom aus EEG- und KWK-Anlagen abzunehmen, gesetzlich vereinbart zu vergüten und an den Übertragungsnetzbetreiber weiterzuleiten, der die Strommengen am Spotmarkt verkauft. Dieses Geschäftsmodell heißt Netzeinspeisung und ist eine Variation des Geschäftsmodellbereichs „Energielieferung“. Mit Energielieferung ist hier die Lieferung von Energie an einen Dritten ohne Eigennutzung gemeint. Der Anlagenbetreiber tritt als Energielieferant auf, der Strom an einen Kunden oder einen Händler verkauft. In Zukunft werden die Preise an allen Märkten vermutlich volatiler werden und dadurch die Attraktivität dieser Direktvermarktung verbessern. Damit werden künftig auch Prognosewerkzeuge benötigt, um zu ermitteln, zu welchem Zeitpunkt an welchem Markt (Dayahead, Intraday, Ausgleichsenergie) der erzeugte Strom am profitabelsten verkauft werden kann. Diese Aufgaben und auch die Vermarktung des Stroms selbst könnten durch Dienstleister erbracht werden, wie dies im heutigen Geschäftsmodell „Netzeinspeisung“ der Verteilnetzbetreiber übernimmt. In Pilotprojekten werden entsprechende Aktivitäten aktuell auch in der Blockchain-Technologie erprobt, siehe [15].

Beschaffungsoptimierung

Da die Haushaltsstrompreise über der garantierten Einspeisevergütung liegen, existiert bereits aktuell das Geschäftsmodell „Eigenstromoptimierung“, das eine Variante des Geschäftsmodellbereichs „Beschaffungsoptimierung“ darstellt. Mit Beschaffungsoptimierung ist hier allgemein die Einsparung von Strombeschaffungskosten eines Endkunden gemeint. Der Anlagenbetreiber nutzt den erzeugten Strom zur Reduzierung der eigenen Strombezugskosten. Hier werden auch die Wärmeerzeugungskosten berücksichtigt. Es gibt verschiedene Strategien, die Quote des selbst genutzten KWK-Stroms zu optimieren. Man kann die KWK-Anlage nach einem Standardlastprofil „fahren“, historische Stromverbrauchslastgänge berücksichtigen oder Prognosen berechnen, wann Strom verbraucht wird. In Zukunft könnten sich auch steuerbare Verbraucher nach der Stromerzeugung der KWK-Anlage richten.

Systemdienstleistungen

Bei diesem Geschäftsmodellbereich bietet der Anlagenbetreiber, z. B. dem Übertragungsnetzbetreiber, dem Verteilnetzbetreiber oder auch Endkunden diverse Systemdienstleistungen an. Dies sind beispielsweise Notstromversorgung, Blindleistungsbereitstellung und Versorgungswiederaufbau. Dieser Geschäftsmodellbereich kann nur ergänzend zu anderen Geschäftsmodellbereichen Erträge liefern und ist für sich allein genommen nicht profitabel. Dieses Geschäftsmodell könnte zukünftig im Rahmen des oben bereits genannten Smart-Meter-Rollouts über die Rolle der externen Marktteilnehmer realisiert werden.

Netzlastmanagement

Der Anlagenbetreiber passt bei diesem Geschäftsmodellbereich sein Einspeiseverhalten den Anforderungen des Verteilnetzbetreibers an. Die Regelung der Anlage erfolgt direkt durch den Verteilnetzbetreiber oder indirekt durch diverse Anreizsysteme. So kann der Verteilnetzbetreiber Netzspitzenlastkosten, Netzverlustkosten und eventuell auch Netzausbaukosten einsparen. Als Barrieren sind hier neben dem fehlenden Angebot variabler Netzentgelte die intransparente Berechnung der vermiedenen Netzentgelte und das Fehlen eines lokalen Regelenergiemarkts zu nennen. Außerdem kann der Verteilnetzbetreiber von erzielten Einsparungen nicht profitieren, sondern muss entsprechend die Netzentgelte für die Netzkunden senken. Hier besteht noch regulatorischer Anpassungsbedarf seitens des Gesetzgebers.

Regelenergiebereitstellung

Der Geschäftsmodellbereich „Regelenergiebereitstellung“ ähnelt dem „Netzlastmanagement“. Der Anlagenbetreiber stellt hier dem Übertragungsnetzbetreiber positive und/oder negative Regelkapazitäten zur Verfügung und liefert diese, sobald die Anfrage erfolgt. Die Auktion von Regelenergie ist aufgeteilt in die drei Segmente Primär-, Sekundär- und Tertiär-Regelenergie. Besonders attraktiv für kleine Anlagenbetreiber ist die Tertiär-Regelenergie, die auch Minutenreserve genannt wird. Hier werden nur geringe Präqualifikationsanforderungen gestellt. Für die Bereitstellung von Regelenergie kann es jedoch erforderlich sein, dass gegebenenfalls mehrere Anlagen zu einem virtuellen Kraftwerk gebündelt werden. Die Bereitstellung von Regelenergie als Pool ist aber bereits nach heutiger Rechtslage möglich. Die Auktion für Regelenergie erfolgt einen Tag vor der Lieferung und die Anlagenbetreiber geben Angebote für Leistungs- und Arbeitspreis ab. Die Auswahl der Kapazitäten erfolgt nach den günstigsten Leistungspreisen. Die Abfrage der Regelenergie erfolgt nach den jeweils günstigsten Arbeitspreisen der kontraktierten Kapazitäten.

Auch dieses Geschäftsmodell könnte zukünftig im Rahmen des oben bereits genannten Smart-Meter-Rollouts über die Rolle der externen Marktteilnehmer realisiert werden.

Kombination von Geschäftsmodellbereichen

Energiemanagement-Gateways werden zukünftig als Schnittstelle zwischen dem Smarthome und dem Smart Grid den optimalen Einsatz der Mikro-KWK-Anlage koordinieren. Zumindest werden sie dabei die notwendigen Daten, wie variable Tarife, variable Netzentgelte, Außentemperaturprognosen, Solarertragsprognosen, für die Mikro-KWK-Anlagen zur Verfügung stellen. Es ist davon auszugehen, dass nur die intelligente Steuerung und die Ausnutzung aller existierenden Märkte, Strategieansätze sowie Anreizsysteme in einem nachhaltigen Energiesystem den betriebswirtschaftlich sinnvollen Betrieb von steuerbaren Erzeugern, also auch Mikro-KWK-Anlagen, sicherstellen werden. Der wirtschaftliche Erfolg einer Anlage wird umso größer ausfallen je intelligenter die vorgestellten Geschäftsmodellbereiche miteinander kombiniert werden.

Schrifttum

Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften

Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG (ABl EU, 2004, Nr. L 52, S. 50–60). Zurückgezogen 2014-06. Nachfolgedokument Richtlinie 2012/27/EU

Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG (ABl EU, 2012, Nr. L 315, S. 1–56)

Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2014) vom 21. Juli 2014 (BGBl I, 2014, Nr. 33, S. 1066–1132)

Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) vom 07. August 2008 (BGBl I, 2008, Nr. 36, S. 1658–1665)

Energiesteuergesetz (EnergieStG) vom 15. Juli 2006 (BGBl I, 2006, Nr. 33, S. 1534–1561)

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 24. Juli 2007 (BGBl I, 2007, Nr. 34, S. 1519–1563)

Einkommensteuergesetz (EStG) vom 08.Oktober 2009 (BGBl. I S. 3366, 3862)

Verordnung über die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heiz- und Warmwasserkosten (Verordnung über Heizkostenabrechnung – HeizkostenV) vom 05. Oktober 2009 (BGBl I, 2009, Nr. 66, S. 3251–3255)

Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz – KWKG) vom 21. Dezember 2015 (BGBl I, 2015, Nr. 55, S. 2498–2516)

Stromsteuergesetz (StromStG) vom 24. März 1999 (BGBl I, 1999, Nr. 14, S. 378–384)

Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen (Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz – TEHG) vom 21. Juli 2011 (BGBl I, 2011, Nr. 38, S. 1475–1502)

Technische Regeln

DIN EN 50465*VDE 0130-310:2015-06 Gasgeräte; Geräte zur Kraft-Wärme-Kopplung mit einer Nennwärmebelastung kleiner oder gleich 70 kW; Deutsche Fassung EN 50465:2015. Berlin: Beuth Verlag

DIN V 4108-6:2003-06 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. Berlin: Beuth Verlag

DIN V 4701-10:2003-08 Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen; Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Berlin: Beuth Verlag

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Berlin: Beuth Verlag

VDI 2077 Blatt 3.1:2012-11 Verbrauchskostenerfassung für die Technische Gebäudeausrüstung; Ermittlung der umlagefähigen Wärmeerzeugungskosten von KWK-Anlagen. Berlin: Beuth Verlag

VDI 4655:2008-05 Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen. Berlin: Beuth Verlag

VDI 4656:2013-09 Planung und Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen. Berlin: Beuth Verlag

VDE-AR-N 4105:2018-11 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz; Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. Berlin: Beuth Verlag

Literatur

[1] BMU: Richtlinie zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW_{el} (Mini-KWK-Richtlinie) vom 15.12.2014

[2] Delegierte Verordnung (EU) 2015/2402 der Kommission vom 12. Oktober 2015 zur Überarbeitung der harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme gemäß der Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung des Durchführungsbeschlusses 2011/877/EU der Kommission (ABl EU, 2015, Nr. L 333, S. 54–61)

[3] http://de.wikipedia.org/wiki/Zeitreihe_der_Lufttemperatur_in_Deutschland (abgerufen am 08.08.2019)

[4] Institut Wohnen und Umwelt (IWU): Kumulierter Energieaufwand und CO_2-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und -versorgungen. Darmstadt, 14.01.2009

[5] Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2017, UBA, Climate Change, 11/2018

[6] Prognos AG: Studie zur „Zwischenüberprüfung zum Gesetz zur Förderung der Kraft-Kraft-Wärme-Kopplung“ im Auftrag des BMWi, 08.08.2011

[7] Wünsch, M. (Prognos AG): Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014, Endbericht, 01.10.2014

[8] Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. (B.KWK) (www.bkwk.de/aktuelles/ueblicher-preis)

[9] https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/DigitaleGesellschaft/SmartMeter/SmartMeterGateway/smartmeter-gateway_node.html (abgerufen am 08.08.2019)

[10] Selzam, P.: Beitrag Biogas-Workshop 2011 „Überblick über mögliche Geschäftsmodelle für Biomasseanlagen“, 2011; http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-410914.html (abgerufen am 08.08.2019)

[11] www.stromerzeugende-heizung.de (abgerufen am 08.08.2019)

[12] Stromabrechnungsvarianten – Stromerzeugung an KWK-Anlagen in Mehrfamilienhäusern, BWK, Bd. 62 (2010), S. 47–51

[13] Kraft-Wärme-Kopplung im Mehrfamilienhaus. Teil 2, HLH Bd. 64 (2013) Nr. 4

[14] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE): „BHKW-Kenndaten 2014/2015“, Berlin, 2014, https://asue.de/blockheizkraftwerke/broschueren/309754_bhkw-kenndaten_2014-15

[15] https://www.next-kraftwerke.de/wissen/strommarkt/blockchain (abgerufen am 08.08.2019)

[16] https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter/chart/power-generation

[17] Shell BDH Hauswärmestudie, Klimaschutz im Wohnungssektor, wie heizen wir morgen? Fakten, Trends und Perspektiven für Heizungstechniken bis 2030, Mai 2013

Der VDI

Sprecher, Gestalter, Netzwerker

Die Faszination für Technik treibt uns voran: Seit 160 Jahren gibt der VDI Verein Deutscher Ingenieure wichtige Impulse für neue Technologien und technische Lösungen für mehr Lebensqualität, eine bessere Umwelt und mehr Wohlstand. Mit rund 145.000 persönlichen Mitgliedern ist der VDI der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Als Sprecher der Ingenieure und der Technik gestalten wir die Zukunft aktiv mit. Mehr als 12.000 ehrenamtliche Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Als drittgrößter technischer Regelsetzer ist der VDI Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt
Dr.-Ing. Eleni Konstantinidou
Tel. +49 211 6214-219
geu@vdi.de
www.vdi.de