

Renews Spezial

Ausgabe 59 / November 2012

Hintergrundinformation
der Agentur für Erneuerbare Energien

Intelligente Verknüpfung von Strom- und Wärmemarkt

Die Wärmepumpe als
Schlüsseltechnologie für
Lastmanagement im Haushalt

www.unendlich-viel-energie.de



Autoren:

Hedwig Gradmann, Alena Müller
Stand: Oktober 2012

Herausgegeben von:

**Agentur für Erneuerbare
Energien e. V.**

Reinhardtstr. 18
10117 Berlin
Tel.: 030-200535-3
Fax: 030-200535-51
kontakt@unendlich-viel-energie.de

ISSN 2190-3581

Unterstützer:

Bundesverband Erneuerbare Energie
Bundesverband Solarwirtschaft
Bundesverband WindEnergie
Bundesverband Wärmepumpe
GtV - Bundesverband Geothermie
Bundesverband Bioenergie
Fachverband Biogas
Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie

Gefördert durch:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Inhalt

• Einleitung	4
• Erneuerbare Energien stellen neue Anforderungen an das Stromsystem	5
– Stromerzeugung aus Wind und Sonne fluktuiert stark	5
– Wachsende Bedeutung von Energiespeichern und variablen Verbrauchern	6
• Im Smart Grid richten sich mehr Verbraucher nach der Erzeugung	7
– Maßgeschneiderte Tarife als Grundvoraussetzung für Lastmanagement	7
• Die wachsende Bedeutung des Lastmanagements	8
– Lastmanagement in der Industrie	8
– Lastmanagement durch intelligente Haustechnik	9
– Lastmanagement durch E-Mobilität	9
– Lastmanagement durch die Wärmepumpe	10
• Ausblick	12
• Das Prinzip der Wärmepumpe	13
– Die Funktionsweise im Detail	13
– Erdwärmepumpen mit Sonden	14
– Erdwärmepumpen mit Flächenkollektoren	15
– Grundwasser-Wärmepumpen	15
– Luft-Wärmepumpen	15
– Kühlen mit Wärmepumpen	16
– Der Einsatz von Wärmepumpen in der Praxis	16
– Kennwerte für Effizienz	16
• Virtuelle Kraftwerke und virtuelle Großspeicher	18
• Quellen und weitere Informationen	20

Einleitung

Vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele hat Deutschland die Energiewende beschlossen. Der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Energieversorgung wird in Zukunft weiter steigen, um eine treibhausgasarme Energieversorgung zu erreichen. Die Herausforderung dabei: Wind- und Sonnenenergie sind witterungsabhängig, so dass große Teile der regenerativen Stromerzeugung stark schwanken und nicht immer bedarfsgerecht zur Verfügung stehen. Oftmals wird in Zeiten geringer Nachfrage die Erzeugung den momentanen Verbrauch („Last“) übersteigen und umgekehrt. Daraus entstehen besondere Anforderungen an das Stromsystem. Das Ungleichgewicht muss durch Speicher sowie Lastmanagement, also die Verlagerung von Energienachfrage in wind- und sonnenintensive Zeiten, ausgeglichen werden. Daher wächst die Bedeutung von Energiespeichern und lastvariablen Verbrauchern wie „intelligenten“ Haushaltsgeräten oder steuerbaren Großverbrauchern in Industrie und Gewerbe.

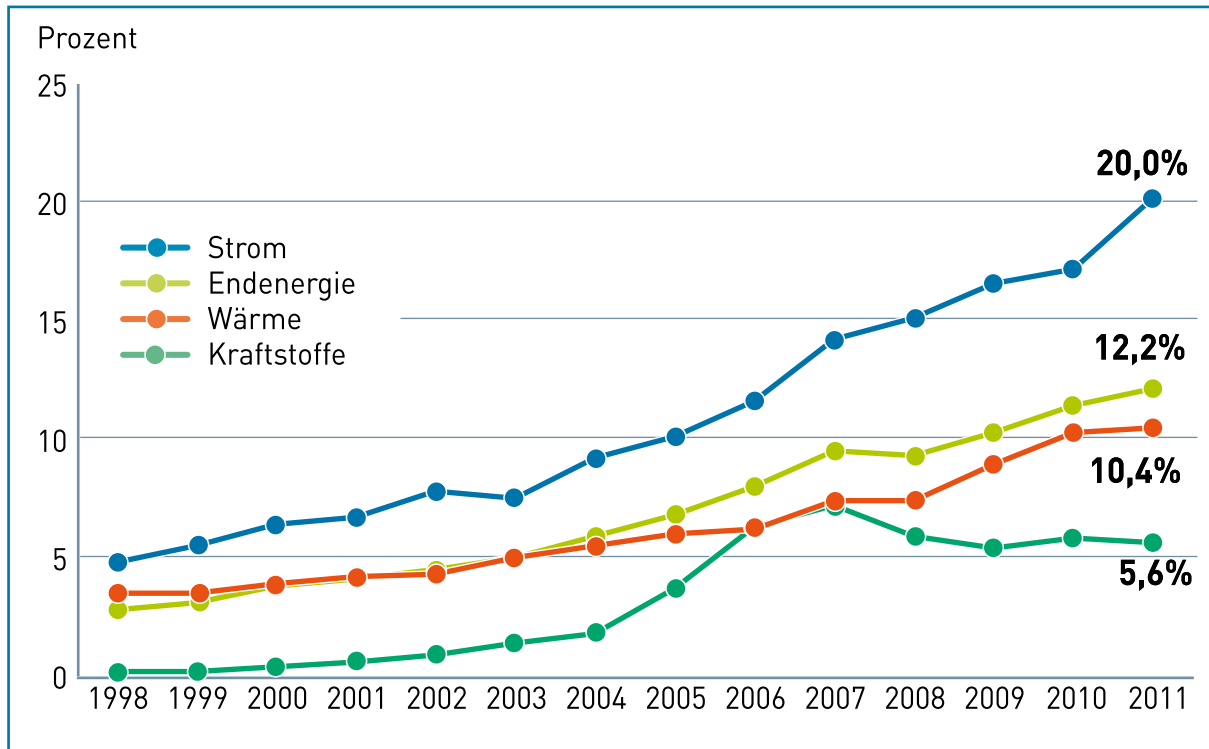
Eine besondere Bedeutung kommt dabei künftig Technologien zu, die an der Schnittstelle zweier Energiebereiche liegen, also beispielsweise elektrischen Strom in Wärme oder Kälte umwandeln (Wärmepumpen, Kühllhäuser) oder ihn für Mobilitätszwecke verwenden (Elektrofahrzeuge). Insbesondere der Wärmebereich bietet ein großes Potenzial, um die witterungsbedingten Schwankungen der Stromproduktion von Wind- und Sonnenenergieanlagen abzufedern, weil er einerseits einen hohen Anteil am Energieverbrauch hat und andererseits über einfache thermische Speichermöglichkeiten verfügt. Um das Versorgungssystem auf die Erneuerbaren Energien auszurichten, ist ein so genanntes „intelligentes Stromnetz“ (engl. Smart Grid) notwendig, das Erzeugung, Transport, Speicher und (lastvariable) Nachfrage durch moderne Informations- und Kommunikationstechnik verknüpft und eine entsprechende Steuerung ermöglicht.

Dieses Hintergrundpapier beschreibt die Herausforderungen, vor die fluktuierende Erneuerbare Energien das Energiesystem stellen. Die Themen Lastmanagement im Stromnetz bzw. die intelligente Verknüpfung von Strom- und Wärmemarkt werden am Beispiel der Wärmepumpe näher erklärt. Wärmepumpen sind bereits am Markt etabliert und bieten ein wichtiges Potenzial für die Integration Erneuerbarer Energien in den Energiemarkt. Dabei werden auch die verschiedenen Anwendungsformen der Wärmepumpe vorgestellt.

Erneuerbare Energien stellen neue Anforderungen an das Stromsystem

In Deutschland steigt der Anteil der Anlagen, die Strom aus regenerativen Quellen erzeugen, dynamisch an. Im Jahr 2011 übersprang der Ökostromanteil am deutschen Strommix erstmals die Marke von 20 Prozent. Die Bundesregierung will den Anteil von „grünem“ Strom bis 2020 auf mindestens 35 Prozent, bis 2050 sogar auf mindestens 80 Prozent steigern.

Anteil Erneuerbarer Energien am Energieverbrauch in Deutschland



Quelle: BMU; Stand: 03/2012

Stromerzeugung aus Wind und Sonne fluktuiert stark

Diese Umstellung stellt neue Anforderungen an das Stromsystem. Anzahl und die räumliche Verteilung der Erzeugungsanlagen verändern sich. Statt wenigen konventionellen Großkraftwerken wird es zukünftig vor allem viele kleine, dezentrale Erzeuger wie Windräder, Photovoltaik- oder Biogasanlagen geben. Das Energieversorgungssystem steht damit vor einer entscheidenden Veränderung: Während sich bisher die Erzeugung vollständig nach dem schwankenden Bedarf auf Seiten der Verbraucher richtete, geht es in Zukunft auch darum, durch Anpassung der Nachfrage die Schwankungen auf der Angebotsseite auszugleichen. Experten sprechen vom Demand-Side-Management oder Lastmanagement, wenn es darum geht, dass sich Energieverbraucher nach der Erzeugung richten.

Windenergie- und Photovoltaikanlagen erzeugen nur dann Strom, wenn der Wind weht beziehungsweise die Sonne scheint. Nicht immer sind diese natürlichen Quellen dann vorhanden, wenn die Verbraucher besonders viel Strom benötigen. Andererseits gibt es Zeiten mit Starkwind, in denen die Stromnachfrage gering ist. Heute kommt es in solchen Situationen vermehrt dazu, dass Windenergieanlagen abgestellt werden, um die Netzstabilität nicht zu gefährden. Dann bleibt die regenerative Quelle Wind ungenutzt. Im Jahr 2010 sind auf diese Weise bis zu 150 Gigawattstunden Windstrom verloren gegangen, so eine Studie des Beratungsunternehmens ECOFYS im Auftrag des Bundesverbandes Windenergie. An insgesamt 107 Tagen haben Netzbetreiber vor allem in Nord- und

Ostdeutschland eingegriffen. Damit hat sich die Zwangsdrosselung von Windanlagen zwischen 2009 und 2010 fast verdoppelt. Mit der verloren gegangenen Strommenge könnten rund 43.000 typische Dreipersonenhaushalte ein Jahr lang mit Strom versorgt werden.

Wachsende Bedeutung von Energiespeichern und variablen Verbrauchern

Um das System auch in Zukunft dauerhaft zu stabilisieren, sind mehr Energiespeicher notwendig, die Ökostrom in Zeiten geringer Nachfrage aufnehmen und zeitversetzt wieder abgeben können. Elektrischer Strom wird dabei im ersten Schritt in eine andere, besser speicherbare Energieform – chemisch, mechanisch oder magnetisch – umgewandelt und in einem zweiten, zeitlich unabhängigen Schritt wird daraus wieder Strom gewonnen.

Derzeit sind die einzigen relevanten Großspeicher in Deutschland Pumpspeicherkraftwerke mit einer installierten Leistung von insgesamt rund 7.000 Megawatt. Dazu kommt ein Druckluftspeicherkraftwerk in Huntorf mit 290 Megawatt. Für eine umfangreichere Nutzung dieser Technologie müssten jedoch effizientere (sogenannte „adiabate“) Druckluftspeicher eingesetzt werden, die sich derzeit noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden. Der künftige Speicherbedarf könnte zwar durch verstärkte Im- und Exporte von Strom auf eine Leistung von etwa 15.000 Megawatt begrenzt werden. Das entspricht im Vergleich zu heute dennoch einer Verdoppelung der Speicherkapazitäten. Ohne einen europäischen Ausgleich müsste Deutschland laut Sachverständigenrat für Umweltfragen für eine rein regenerative Energieversorgung seine Speicherleistung verfünffachen – auf bis zu 40.000 Megawatt.

Damit ein vollständig regeneratives Energiesystem auch in der Lage ist, Windflauten von zwei bis drei Wochen zu überbrücken, sind Langzeitspeicher mit großem Speichervolumen notwendig. Hierfür gibt es bisher noch keine technisch ausgereiften und wirtschaftlichen Systeme. Denkbar ist vor allem die Speicherung von erneuerbar erzeugtem Gas. Forscher und Praktiker arbeiten daran, durch Elektrolyse mittels erneuerbarem Strom aus Wasser Wasserstoff herzustellen. Dieser Wasserstoff kann teilweise direkt ins Gasnetz eingespeist oder vorher durch Methanisierung zu synthetischem Erdgas umgewandelt werden. Auch wird darüber nachgedacht, skandinavische Pumpspeicher mittels Seekabeln an das kontinentale europäische Stromnetz anzuschließen (Super Grid), um z.B. deutschen Windstrom über längere Zeiträume speichern zu können.

Neben dem langfristigen Aufbau von Speichern ist das Lastmanagement eine sehr wichtige und kurzfristig verfügbare Option, um bei einer zunehmenden Versorgung mit regenerativen Energien die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Wichtige Elemente im regenerativen Stromnetz sind daher Energieverbraucher, die ihren Energiebedarf flexibel steuern können. Dazu zählen viele Industrie- und Gewerbebetriebe mit einem höheren Energieverbrauch. Zum Beispiel kann ein Kühlhaus während eines hohen Stromangebots viel Energie aus dem Netz aufnehmen, um seine Waren stärker herunter zu kühlen als erforderlich. Dadurch verlängert sich die Periode, in der das Kühlhaus nicht am Netz sein muss. So können angebotsschwache Zeiten überbrückt werden. Im Bereich der Haushalte sind Elektroautos, so genannte „intelligente“ Haushaltsgeräte sowie die Verknüpfung der Strom- und Wärmeversorgung von Bedeutung. Die Wärmebereitstellung bietet dank der guten und kostengünstigen Speicherbarkeit von Wärme ein großes Potenzial für die intelligente Verknüpfung mit dem Strommarkt und das Lastmanagement. Mehr als die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauchs (Strom, Wärme, Mobilität) entfallen auf das Heizen von Gebäuden und auf Prozesswärme für die Industrie. Hier besteht ein großes Potenzial, um mit Hilfe entsprechender Wärmeerzeuger zum Ausgleich des fluktuierenden Angebots Erneuerbarer Energien im Strommarkt beizutragen.

Im Smart Grid richten sich mehr Verbraucher nach der Erzeugung

Um mittels Lastmanagement die Schwankungen Erneuerbarer Energien auszugleichen, müssen Stromproduzenten und Verbraucher künftig viel mehr Informationen austauschen. Das Stromnetz muss deshalb „intelligenter“ werden, als es heute ist. Um einen Informationsfluss zwischen Energieerzeugern und -verbrauchern zu ermöglichen, wird das Energieversorgungssystem durch moderne Informations- und Kommunikationstechnik ergänzt. Der Begriff „Smart Grid“ oder „intelligentes Stromnetz“ umfasst die rechnergestützte Vernetzung aller Bestandteile des Energieversorgungssystems (Erzeugungsanlagen, Netze, Speicher und Verbraucher). Versorger und Verbraucher erhalten so mehr Informationen über die aktuelle Versorgungssituation und Einflussmöglichkeiten. Ziel ist es, Stromangebot und -nachfrage optimal aufeinander abzustimmen und den Kraftwerkspark dadurch effizient auszulasten. Im intelligenten Stromnetz gibt es mehr verantwortliche Akteure als bisher. Künftig tragen nicht nur die steuerbaren Erzeuger und die Übertragungsnetzbetreiber zur Versorgungssicherheit bei, sondern auch die Nachfrageseite. Dabei sollen intelligente Stromzähler, sogenannte Smart Meter helfen. Sie messen und informieren nicht nur über den aktuellen Stromverbrauch, sondern versorgen die Verbraucher auch mit Informationen zum aktuellen Stromangebot und -preis.

Maßgeschneiderte Tarife als Grundvoraussetzung für Lastmanagement

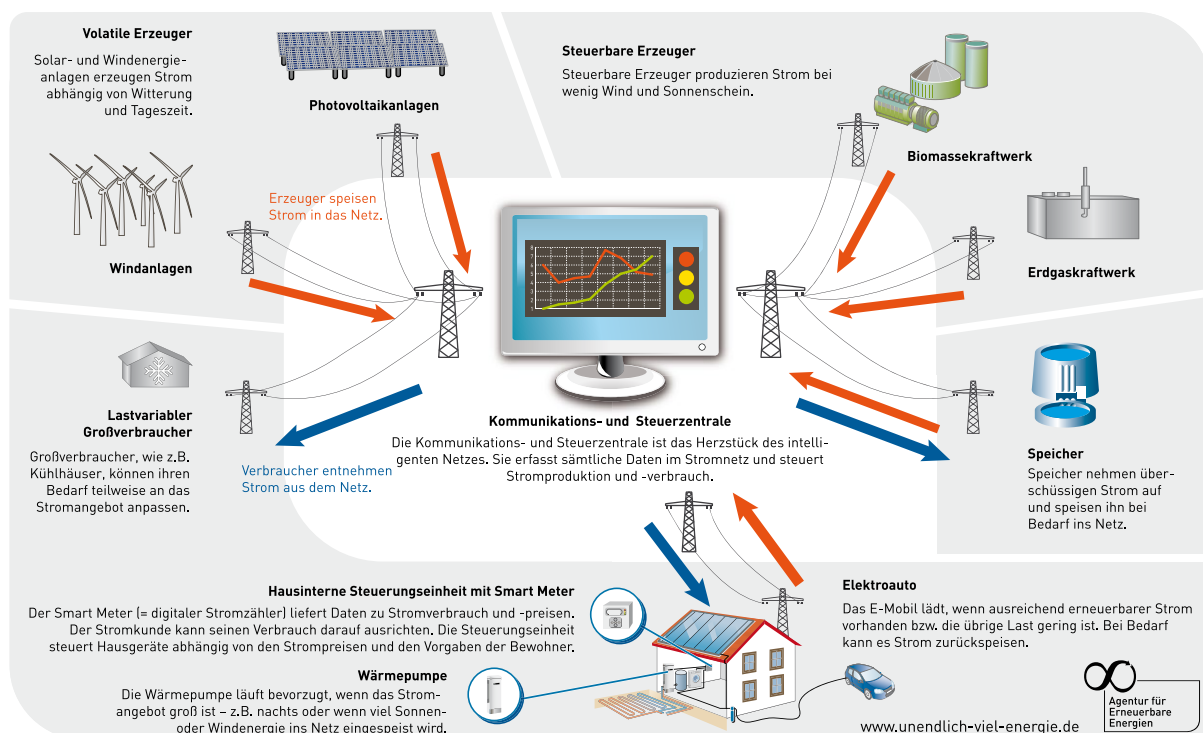
In Zukunft sollen spezielle Stromtarife klare Preissignale setzen: Bei einem vorübergehenden Überangebot von Strom aus Erneuerbaren Energien sank der Preis für den Endkunden, herrschte dagegen Stromknappheit, stieg er. Ansonsten würde der Strom zum Normaltarif angeboten.

Bereits heute existieren ähnliche Preismodelle für Industriekunden, die ihren Stromverbrauch außerhalb der Spitzenlastzeiten organisieren beziehungsweise so genannte schaltbare Lasten zur Verfügung stellen. Für Privatkunden gibt es unterschiedliche Tag-/Nachttarife, zum Beispiel für Nachtspeicheröfen. Viele Energieversorger bieten auch einen ganztägig vergünstigten Strompreis von durchschnittlich 16-17 Cent pro Kilowattstunde (ct/kWh) als speziellen Wärmepumpentarif an, da Wärmepumpen bereits heute zum Lastmanagement beitragen können. Im Gegenzug erhält der Energieversorger das Recht, die Wärmepumpe zu Spitzenlastzeiten auszuschalten. Die Abschaltzeiten betragen maximal dreimal täglich je zwei Stunden. Für den Kunden ist das in der Regel ohne Komfortverlust möglich, da die benötigte Wärme von einem Pufferspeicher vorgehalten wird. Gleichzeitig entlastet dieses Prinzip aber die Netze und spart dem Netzbetreiber damit Kosten.

Die seit Sommer 2011 geltende Novelle des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) gibt vor, dass alle Verbraucher mit einem jährlichen Bedarf von mehr als 6.000 Kilowattstunden über Smart Meter verfügen müssen. Laut EU-Vorgabe müssen bis 2022 alle 200 Millionen Haushalte in der Europäischen Union über einen intelligenten Zähler verfügen. Ihr Einsatz ist in Neubauten und bei Totalsanierungen bereits seit 2010 Pflicht. Die heute eingebauten Standardgeräte sind jedoch lediglich digitale Stromzähler, die den aktuellen Stromverbrauch visualisieren und auf den Monat beziehungsweise das Jahr hochrechnen. Die Geräte helfen Endverbrauchern, sich mit ihrer Stromrechnung auseinanderzusetzen und auf den Umgang mit der Ressource Strom bewusster zu achten. Mit einer intelligenten Steuerung des Stromverbrauchs im Sinne einer optimalen Ausnutzung der Erneuerbaren Energien haben die heutigen Smart Meter noch nichts zu tun.

Smart Meter der zweiten Generation müssen in der Lage sein, den aktuellen Strompreis darzustellen und eine Verbindung mit der intelligenten Haussteuerung einzugehen. Im Bereich der Privathaushalte haben die Netzbetreiber vor allem Interesse an einem direkten Zugriff auf Stromanschlüsse für Elektroautos und andere Verbraucher mit hoher Leistung, wie die Wärmepumpe. Hier muss es einen Ausgleich geben zwischen den Erfordernissen der Netzstabilität und dem Komfort der Kunden, jederzeit Elektroautos nutzen zu können und es behaglich warm zu haben. Die Steuerung aller anderen Geräte wird den Kunden selbst überlassen bleiben. Um hier Anreize zur Lastverlagerung zu schaffen, sind maßgeschneiderte Tarife erforderlich. Ohne diese werden sich die Kunden kaum an der intelligenten Laststeuerung beteiligen.

Das intelligente Stromnetz



Die wachsende Bedeutung des Lastmanagements

Lastmanagement in der Industrie

Einen besonders großen Beitrag für die Verschiebung von Stromverbrauch in erzeugungsstarke Zeiten kann die Industrie leisten. Dieser Sektor hat einen hohen Energiebedarf, der sich im Vergleich zum Privatsektor auf weniger einzelne Verbraucher aufteilt. Wenn also ein Unternehmen seinen Energieverbrauch an die Stromproduktion anpasst und beispielsweise seine Maschinen nachts laufen lässt, dann hat das einen größeren Effekt, als wenn die Waschmaschine einer Familie ab 23 Uhr den Waschgang startet. Dieser Unterschied zeigt sich bereits heute: Während lastvariable Tarife für Privatkunden noch selten sind und das Tarifsystem – bis auf vereinzelte Angebote von günstigerem „Nachtstrom“ – kaum ausdifferenziert ist, bieten die Energieversorger Großkunden verschiedene Tarife an.

Derzeit bereitet das Bundeswirtschaftsministerium eine Verordnung zu einer sogenannten Lastabwurfprämie vor. Die Idee dahinter: In Zeiten knappen Stromangebots könnten Industrieanlagen ferngesteuert abgeschaltet werden. Die Betreiber würden hierfür finanziell entschädigt. Bei oft nur

Minuten andauernden extremen Lastspitzen oder kurzfristigen Erzeugungsschwankungen kann die kurzzeitige Abschaltung einzelner Großverbraucher entscheidende Beiträge zur Netzstabilität leisten. Für eine begrenzte Zeit auf Strom verzichten können beispielsweise Aluminiumhersteller, Zementwerke oder Kühllhäuser. In anderen Staaten Europas – Niederlande, Spanien, Slowenien und Italien – sind solche Lastabschaltungen bereits üblich.

Lastmanagement durch intelligente Haustechnik

Schon heute ist es durch die elektronische Startzeitvorwahl möglich, dass Haushaltsgeräte zeitversetzt laufen. Damit kann man die Haushaltshelfer so programmieren, dass sie zum Beispiel im günstigeren Nachtтарif anspringen. Derzeit laufen verschiedene Feldversuche, die das Potenzial eines elektronisch gesteuerten Strommanagements für Privathaushalte untersuchen. Damit Privathaushalte flexibel auf Strompreisschwankungen reagieren können, bedarf es einer intelligenten Haussteuerung, die direkt mit dem Smart Meter kommuniziert. Haushaltsgerätehersteller arbeiten an Geräten wie zum Beispiel Geschirrspülern mit WLAN-Anschluss, die ihre Daten mit den intelligenten Zählern austauschen können und so kompatibel für das Smart Grid wären. Im modernen Haus würde der Verbraucher also eine Zeitspanne festlegen, in der die Waschmaschine anspringen soll. Wann genau, überlässt er der automatischen Steuerung, die sich in diesem zeitlichen Rahmen nach dem Strompreis richten kann. Sinkt dieser, beginnt die Waschmaschine ihren Waschgang. Vor allem Haushaltsgeräte, die mit Kälte oder Wärme arbeiten, sollen intelligenter werden: Tiefkühltruhen, Kühlschränke, Warmwasserbereiter, Klimageräte, Spülmaschinen oder Waschmaschinen. Um ihren Energieverbrauch zu beeinflussen, ist die zeitliche Verschiebung des Heiz- und Kühlvorgangs denkbar. Bei der Warmwasserbereitung ist dazu ein Pufferspeicher erforderlich. Auch können Tiefkühltruhen unter die Normtemperatur gekühlt werden, wenn gerade viel Strom günstig vorhanden ist. So verlängert sich die Zeitspanne, bis sie wieder ans Netz müssen.

Lastmanagement durch E-Mobilität

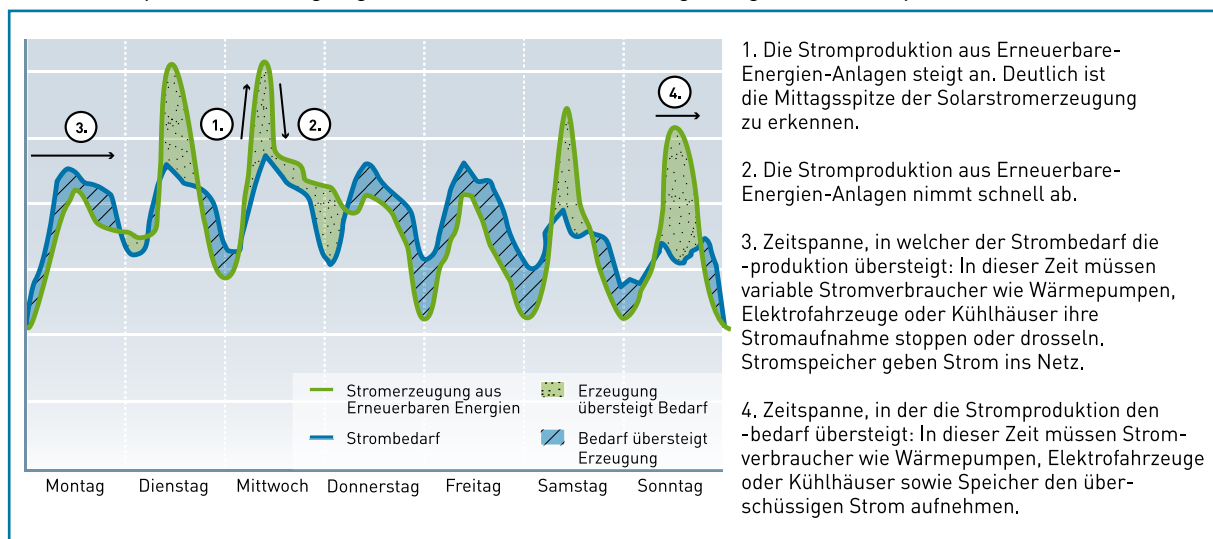
Derzeit bewegen sich zwar erst rund 4.500 Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen, nach dem Willen der Regierung soll es 2020 jedoch bereits eine Million geben; zehn Jahre später sollen es fünf Millionen sein. Damit wären rund zehn Prozent des heutigen PKW-Bestandes „elektrifiziert“. Die Bundesregierung setzt auf diesen Fahrzeugtyp, weil Elektroautos effizienter sind als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz leisten können, wenn sie mit Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden.

Zukünftig sollen die Fahrzeugbatterien von E-Mobilen auch als Speicher zum Ausgleich fluktuierender Erneuerbarer Energien genutzt werden. Elektroautos können so zum Lastmanagement beitragen und das Netz stabilisieren. Da üblicherweise nur weniger als zehn Prozent der gesamten deutschen Fahrzeugflotte gleichzeitig unterwegs ist, ist geplant, die parkenden Fahrzeuge virtuell zu einem großen Puffer zusammenzuschließen. Bei hohen Strompreisen könnten die Autos einen Teil ihres Batteriestroms in das Netz zurückgeben. Wenn Angebot und Preis wieder günstig sind, können sie erneut laden. Experten der RWTH Aachen schätzen, dass 20 Millionen Fahrzeuge eine Speicherfunktion von rund 70.000 Megawatt Leistung bieten könnten.

Gegenwärtig in Großserie produzierte Elektroautos haben Batterien mit einer Kapazität von 16 bis 24 Kilowattstunden. Ein typischer deutscher Dreipersonenhaushalt verbraucht pro Tag rund zehn Kilowattstunden Strom. Dementsprechend könnte ein E-Mobil etwa zwei Tage lang die Stromversorgung eines solchen Haushalts überbrücken – allerdings nur, wenn es in dieser Zeit lediglich als Stromspeicher genutzt wird.

Aufgaben von Lastmanagement und Speichern im Smart Grid

Die Stromerzeugung aus Wind und Sonne schwankt. Im Stromnetz der Zukunft müssen Lastmanagement und Speicher Erzeugung und Verbrauch in Einklang bringen. Ein Beispiel:



Lastmanagement durch die Wärmepumpe

Während E-Mobilität erst in fernerer Zukunft einen Beitrag zum Lastmanagement leisten kann, stehen Wärmepumpen schon heute in großer Zahl zur Verfügung und sind technisch ausgereift. Die meisten Wärmepumpen nutzen einen gewissen Anteil Strom, um so aus Umweltwärme aus dem Erdreich, dem Grundwasser oder der Umgebungsluft Heizungsenergie und Warmwasser zu erzeugen (zum Funktionsprinzip der Wärmepumpe: s. S. 13). Damit bilden sie eine Schnittstelle zwischen dem Strom- und dem Wärmemarkt. Weil der Bereich Wärme einerseits einen hohen Anteil am Energieverbrauch hat und andererseits über einfache thermische Speichermöglichkeiten verfügt, liegt hier ein enormes Ausgleichspotenzial, vor allem, wenn sich der Strombedarf der Wärmepumpen stärker an die fluktuierende regenerative Stromerzeugung anpasst.

In Deutschland sorgen heute bereits 500.000 Wärmepumpen für Raumwärme und Warmwasser. Sie haben eine elektrische Anschlussleistung von rund 1.900 Megawatt und können gezielt eingesetzt werden, um vorübergehende Überkapazitäten der Stromproduktion auf Basis erneuerbarer Quellen aufzunehmen und als Wärme in Pufferspeichern, einer Fußbodenheizung oder in der thermischen Masse des Gebäudes zu speichern. Wird Strom knapp und teuer, können sie die gespeicherte Wärme nutzen und so ohne weiteren Stromverbrauch die Behaglichkeit sicherstellen. Wärmepumpen sind damit in der Lage, den Anteil Erneuerbarer Energien im Wärmemarkt auf zwei Arten zu steigern: Einmal direkt durch die Erd- und Umweltwärme, die sie zu etwa 60 bis 80 Prozent als hauptsächliche Energiequelle nutzen. Zudem tragen Wärmepumpen mittels Lastmanagement im Strombereich dazu bei, dass mehr Energie aus erneuerbaren Quellen genutzt werden kann.

Ein großer Vorteil der Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Geräten im Haushalt ist, dass sie ohne Komfortverlust für die Bewohner zu einem gewissen Grad flexibel geschaltet werden kann. Die Überbrückung von bis zu zwei Stunden mit Stromsperren zur Kappung von Lastspitzen ist heute bereits Standard. Zudem lässt sich bei hohem Stromangebot die Raumtemperatur geringfügig über den Sollwert anheben und bei Knappheit dann etwas absenken. Dies ist ohne Komforteinbußen möglich, da der Mensch Temperaturunterschiede von 0,5 Grad nicht wahrnimmt. Auch längere Speicherzeiten sind bei gut gedämmten Häusern bzw. größeren Pufferspeichern möglich. Damit verlängert sich die Überbrückungszeit, in der die Wärmepumpe keinen Strom

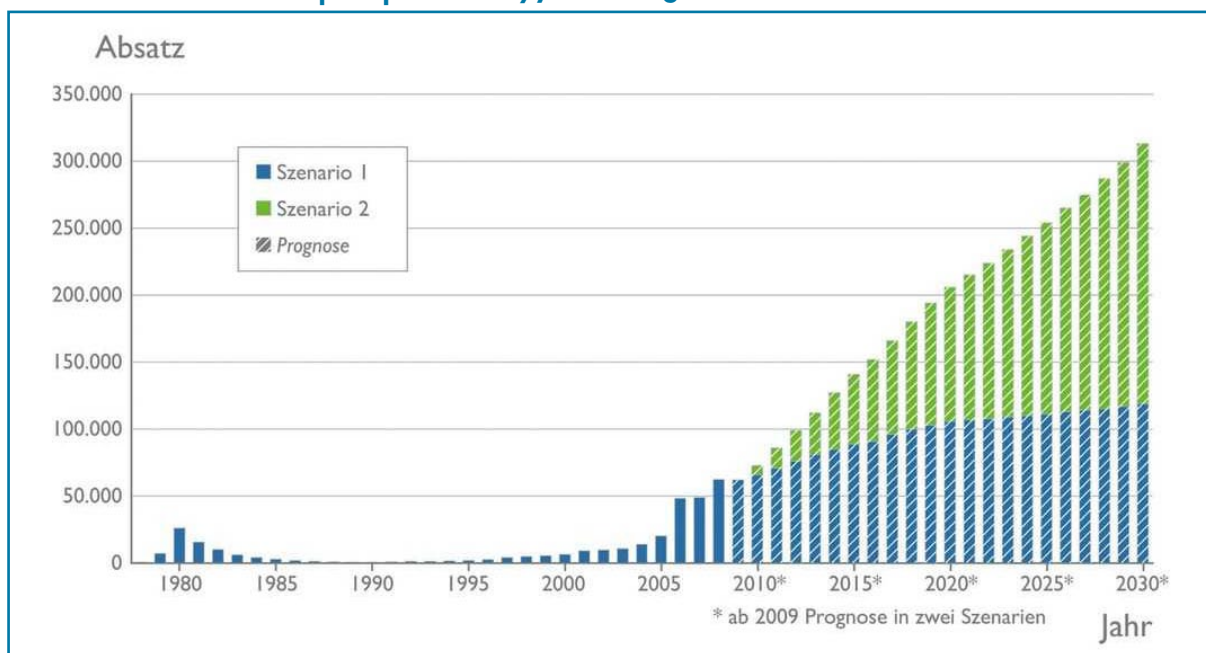
benötigt, und ihr Nutzen für das Lastmanagement steigt. Geräte, die sich für den Einsatz in einem intelligenten Stromnetz eignen, also regelbar sind, werden ab 2013 für Kunden an einem neuen Logo einfacher erkennbar sein.

In einem Energiesystem, das immer stärker auf regenerativen Quellen beruht, kann die Wärmepumpe die Aufgaben übernehmen, vornehmlich dann Strom aufzunehmen, wenn dieser als Überschuss von Wind- und Sonnenergieanlagen erzeugt wird. Die Wärmepumpe erzeugt dann aus diesem Strom Wärme („power to heat“), die in einem thermischen Speicher zwischengespeichert wird, wenn sie nicht zeitgleich vor Ort genutzt werden kann. Es kann also sinnvoll sein, dass eine Wärmepumpe bei akutem Stromüberschuss und drohender Abschaltung von erneuerbaren Stromerzeugern den Pufferspeicher „überlädt“. Durch die höheren Temperaturen im Speicher erhöhen sich zwar die Speicherverluste und die Anlageneffizienz sinkt geringfügig – doch bleibt die Gesamtbilanz im Vergleich zur Abschaltung weiterhin positiv. Schon heute gibt es Warmwasser-Wärmepumpen, die Hersteller als „Komplettpaket“ zusammen mit einer Photovoltaik-Anlage anbieten. Während diese Kombilösungen heute vor allem auf den Verbrauch von Solarstrom vor Ort abzielen, steigt in Zukunft die Bedeutung des Wärmepumpeneinsatzes für die Netzstabilität.

Wärmepumpen werden vor allem zum Heizen genutzt. Sie laufen also in der Winterzeit auf Hochtouren. Im gleichen Zeitraum ist aber auch erfahrungsgemäß die Winterernte am Größten. Die dabei zu erwartenden Spitzenzeiten bei der Windstromproduktion können also durch den erhöhten Strombedarf ausgeglichen werden. In den Abendstunden, in denen häufig Lastspitzen auftreten, können Wärmepumpen für eine Zeit lang abgeschaltet werden. Die verwendeten Speicher reichen, um die hohen Heizlasten im Winter für mehrere Stunden abzapfen zu können.

Derzeit benötigen die in Deutschland installierten Wärmepumpen rund 3,6 Milliarden Kilowattstunden Strom pro Jahr. Die Branche schätzt, dass bei gleichbleibenden politischen Rahmenbedingungen der Wärmepumpen-Absatz bis 2030 auf über 120.000 Stück pro Jahr steigen kann. 2030 wären dann zwei Millionen Wärmepumpen installiert mit einer Anschlussleistung von knapp 5700 Megawatt.

Absatzzahlen Wärmepumpen von 1978 bis 2030



Quelle: Bundesverband Wärmepumpe

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) haben die Institute Ecofys und Prognos 2011 in einer Studie das Potenzial der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strommarkt und zur Netzintegration Erneuerbarer Energien untersucht. Das Ergebnis: Stromgeführte Wärmepumpen mit Pufferspeicher können im erheblichem Umfang zur Lastverlagerung im Strommarkt beitragen, den Kraftwerkseinsatz optimieren und die Abregelung von Strom-erzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Quellen minimieren. Das nutzbare Potenzial der Wärmepumpen lässt sich in den untersuchten Ausbauszenarien etwa mit der Größenordnung eines großen Pumpspeicherwerks mit 1,4 Millionen Kilowatt vergleichen. Der Vorteil der Wärmepumpe: Ihre Flexibilitätspotenziale sind verfügbar, sobald die erforderlichen kommunikationstechnischen und regulatorischen Voraussetzungen dafür geschaffen sind. Hingegen würde die Anbindung eines norwegischen (Pump-) Speicherkraftwerks erhebliche Investitionen für den Bau der erforderlichen Verbindungskabel sowie den Ausbau des deutschen und des norwegischen Stromnetzes nach sich ziehen.

Ausblick

Der Energieerzeugungssektor differenziert sich in Zukunft immer mehr aus: Künftig produziert eine steigende Anzahl an dezentralen, kleineren Anlagen Strom und Wärme. Insbesondere die Erzeugung durch Wind- und Sonnenenergieanlagen ist starken Schwankungen unterworfen. Die Komplexität nimmt auch dadurch noch zu, dass Akteure gleichzeitig Erzeuger und Konsument sind. So wächst der Bedarf an Lastverlagerung. Volatile Erzeugung und flexible Nachfrage auf den Punkt zu bringen, ist eine neue, energielogistische Herausforderung für das System. Intelligente Zähler und ein intelligentes Netz sind Voraussetzung, damit dieses System funktioniert.

Um die Entwicklung voranzubringen, laufen innerhalb des gemeinsamen Forschungsprogramms „E-Energy - IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft“ von Bundeswirtschaftsministerium und Bundesumweltministerium Pilotprojekte, die verschiedene Strategien für das Smart Grid testen. In den Modellprojekten wird untersucht, wie das Lastmanagement Schwankungen der erneuerbaren Erzeugung ausgleichen kann. Zudem werden Ideen für standardisierte Schnittstellen verschiedener Verbraucher wie Elektroautos oder Wärmepumpen entwickelt, um die einheitliche Steuerung von Anlagen verschiedener Hersteller zu ermöglichen. Viele notwendige Neuerungen stecken noch in den Kinderschuhen: Intelligente Haushaltsgeräte und Elektroautos sind noch selten bei den Endverbrauchern im Einsatz. Viele Fragen – zum Beispiel zum Datenschutz oder zum Aufbau von Standards – sind auf dem Weg zum Smart Grid noch zu klären.

Alle Bestandteile müssen jedoch nicht neu entwickelt werden. Dank der Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz gibt es am Markt bereits leistungsfähige Technologien zur Erzeugung regenerativer Energie. Weiterhin sind lastvariable Anlagen wie die Wärmepumpen auf dem Markt etabliert und haben zusammen mit anderen flexiblen Verbrauchern wie Kühllhäusern oder Blockheizkraftwerken das entsprechende Potenzial, die natürlichen Schwankungen der Erneuerbaren Energien auszugleichen. Damit sind wichtige Schlüsseltechnologien für eine intelligente Verknüpfung von Strom und Wärmemarkt vorhanden.

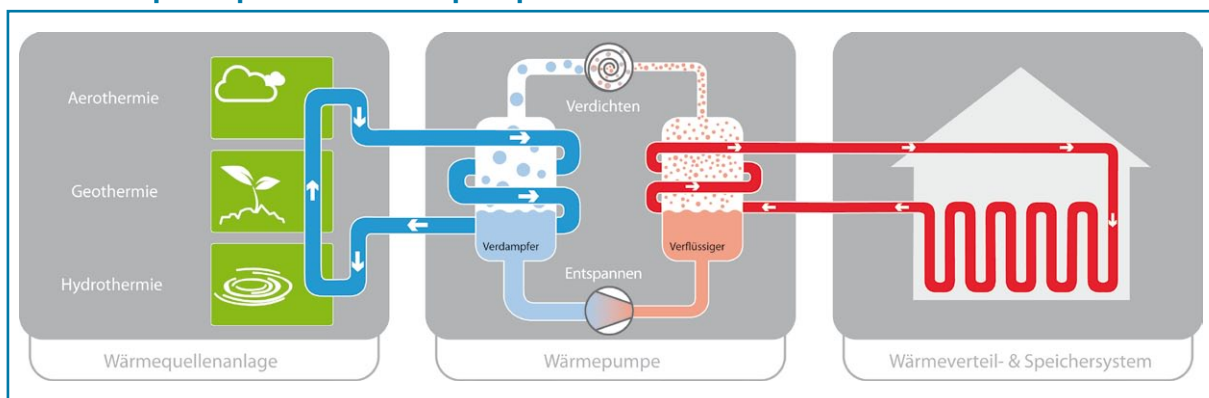
Das Prinzip der Wärmepumpe

Die Wärmepumpe funktioniert wie ein Kühlschrank nach dem Carnot-Prinzip, sie nutzt das Prinzip nur umgekehrt. Hierbei wird der Umgebung Wärme entzogen, durch Kompression auf ein höheres Temperaturniveau gehoben und in Nutzwärme umgewandelt. Durch Umkehrung dieses Kreislaufprozesses oder die besonders energiesparende Passivkühlung können Wärmepumpen auch zum Kühlen eingesetzt werden.

Die Funktionsweise im Detail

Eine Wärmepumpenanlage besteht aus der Wärmequelle, der eigentlichen Wärmepumpe und der Wärmeverteilung. Zunächst erwärmt etwa das Erdreich (= Wärmequelle) ein Wärmeüberträgermittel (meist Wasser mit Frostschutzmittel) in der Sonde bzw. dem Kollektor. Das Wärmeüberträgermittel bzw. die Luft oder das Grundwasser übertragen über einen Verdampfer die Wärme des Quellenkreises an das Kältemittel im Innern der Wärmepumpe. Das flüssige Kältemittel, welches im Kältekreis zirkuliert, wird erwärmt und verdampft. Anschließend verdichtet der Kompressor das Gas, was die Temperatur auf das benötigte Niveau anhebt. Die dabei erzeugte Wärme wird über den zweiten Wärmeüberträger, den Verflüssiger, vom Kältekreis an die Heizungsanlage abgegeben. Dabei kondensiert das Kältemittel; es wird wieder flüssig. Im Expansionsventil wird der Druck, der im Kompressor erzeugt wurde, abgebaut. Das Kältemittel kann nun erneut durch die Umweltwärme erwärmt werden und der Kreislauf beginnt von vorn.

Funktionsprinzip einer Wärmepumpe

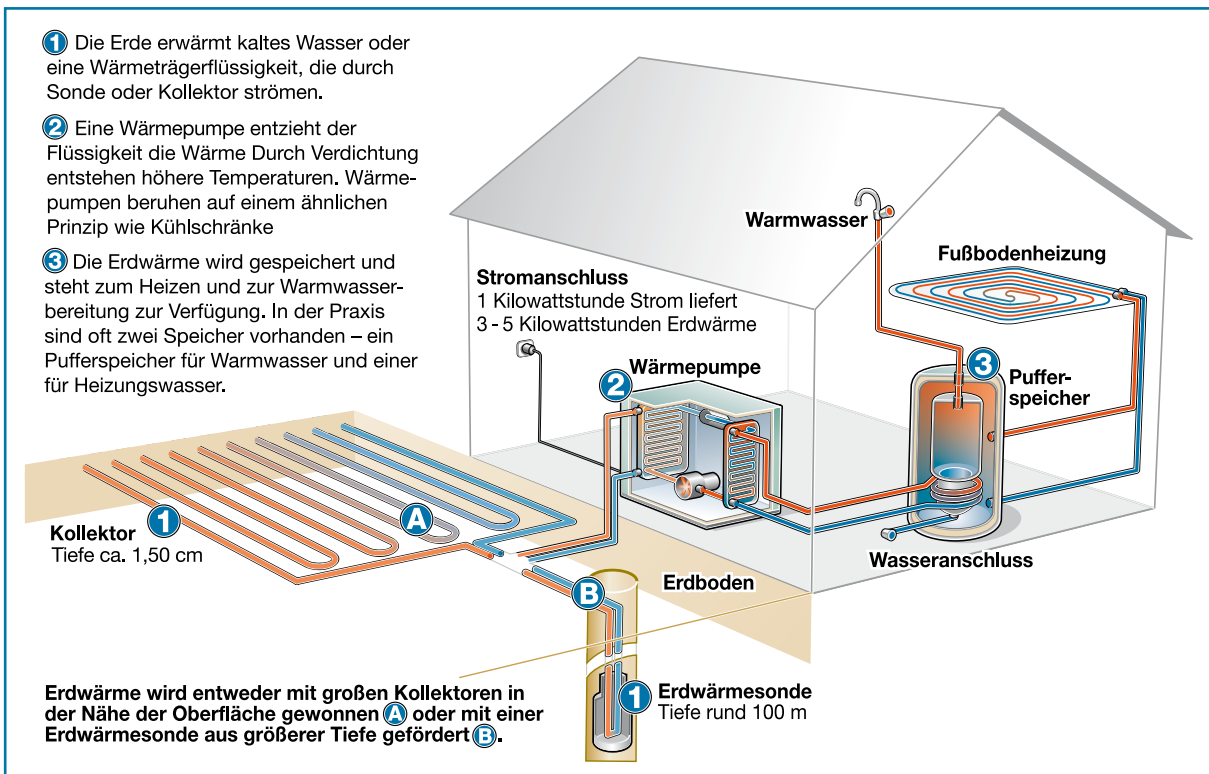


Quelle: Bundesverband Wärmepumpe.

Die Wärmepumpe wird in der Regel zum Heizen und zur Warmwasserbereitung eingesetzt. Wird der Kreislaufprozess umgangen („passive Kühlung“) oder – für höhere Kühllasten – umgekehrt („aktive Kühlung“), kann sie aber auch sehr effizient kühlen.

Eine möglichst kleine Temperaturdifferenz zwischen Quelltemperatur und Heizungs-
vorlauftemperatur ist wichtig für die Effizienz von Wärmepumpen. Eine Fußbodenheizung ist
von daher empfehlenswerter als Heizkörper, da hier in der Regel um 10 Grad Kelvin niedrigere
Vorlauftemperaturen benötigt werden, um die gleiche Raumtemperatur zu erzielen.

Wie man mit Erd- und Umweltwärme heizen kann



Quelle: Agentur für Erneuerbare Erneuerbare Energien

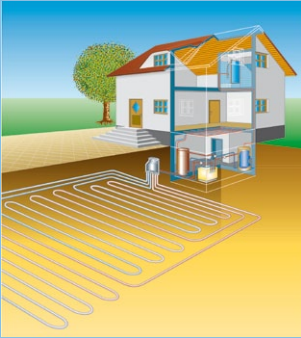
Erdwärmepumpen mit Sonden



Eine Erdwärmepumpe nutzt die Wärme des Erdbodens. Auf der Wärmequellenseite zirkuliert ein Frostschutzgemisch als Wärmeträger in einem geschlossenen Kreislauf. Eine vertikal gebohrte Erdwärmesonde erschließt die mit zunehmender Tiefe an steigenden Durchschnittstemperaturen im Erdreich, die bereits ab einer Tiefe von 10 bis 15 Metern relativ konstant bei rund 10°C liegen. Durchschnittliche Sonden weisen eine Länge von bis zu 100 Metern auf. In das Bohrloch werden in der Regel U-förmige Rohre aus Polyethylen eingesetzt, durch welche die Wärmeträgerflüssigkeit zirkuliert. Anschließend wird das Bohrloch mit einem wärmeleitenden Betongemisch verfüllt. Die Wärmeträgerflüssigkeit nimmt die Erdwärme an und gibt sie an die Wärme-

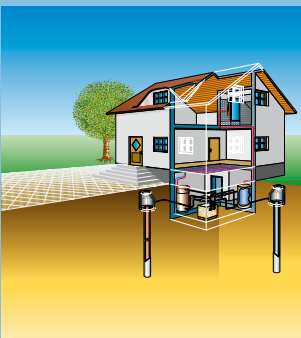
pumpe ab. Anschließend wird die abgekühlte Trägerflüssigkeit wieder zurück in die Erde geleitet, wo sie sich erneut auf das Temperaturniveau des Erdreichs erwärmt. Der Platzbedarf ist dabei gering: Eine Sonde hat etwa den Durchmesser von 15-16 cm.

Erdwärmepumpen mit Flächenkollektoren



Bei horizontalen Erdwärmekollektoren wird ca. 1,50 Meter unter der Erdoberfläche ein Rohrsystem in Schlangen verlegt – ähnlich wie bei einer Fußbodenheizung. Die Flächen, unter denen die Kollektoren liegen, dürfen nicht bebaut, versiegelt oder überdacht werden, damit Sonnenstrahlen und Regen den Boden erwärmen können. Das Temperaturniveau der Wärmequelle liegt im Jahresverlauf zwischen +0 bis +10 Grad Celsius (°C). Diese Variante ist eine sehr wirtschaftliche Möglichkeit zur Erschließung einer Wärmequelle. Hier können Bauherren auch Eigenleistungen erbringen

Grundwasser-Wärmepumpen



Grundwasser hat das ganze Jahr über eine konstante Temperatur von meist 8 bis 10°C. Das Grundwasser wird mit zwei Brunnen für die Wärmegegewinnung erschlossen: Die Tauchpumpe entnimmt Grundwasser aus einem Förderbrunnen, der Schluckbrunnen führt dieses nach der Wärmeabgabe an den Wärmetauscher in der Maschine wieder zurück. Voraussetzung ist, dass Grundwasser in geringer Tiefe vorhanden ist und sich gemäß einer chemischen Analyse für den Einsatz in einer Wärmepumpe eignet. Dabei spielen u.a. die Eisen- und Manganwerte sowie die elektrische Leitfähigkeit eine Rolle.

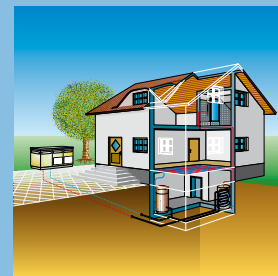
Aufgrund der ganzjährig hohen Quellentemperaturen arbeiten Grundwasserwärmepumpen besonders effizient. Wegen des höheren Planungsaufwandes werden sie hauptsächlich in größeren Objekten wie Mehrfamilienhäusern und gewerblichen Gebäuden eingesetzt.

Luft- Wärmepumpen

Luft-Wärmepumpen nutzen die Umgebungsluft als Wärmequelle, die sie über einen Ventilator ansaugen. Die Wärme wird an das Wasser im Heizsystem weitergegeben (Luft/Wasser- Wärmepumpen) Auch bei -20° C Außentemperatur können moderne Luft/Wasser-Wärmepumpen noch die Umwelt-„Wärme“ als Wärmequelle nutzen. Damit entfällt die aufwändige Erschließung einer erdgekoppelten Wärmequelle.



Luft-Wärmepumpen können sowohl im Freien als auch innerhalb des Gebäudes aufgestellt werden. Bei so genannten Split-Wärmepumpen ist die Wärmepumpe in ein Innen- und Außengerät aufgeteilt. Das Außengerät ist dann besonders kompakt. Der Marktanteil der Luft-Wärmepumpen ist in den letzten Jahren stark gestiegen und übertrifft seit 2010 den Marktanteil der erdgekoppelten Systeme.



Kühlen mit Wärmepumpen

Aufgrund des steigenden Dämmstandards im Gebäudebereich führt Sonneneinstrahlung rasch zu einem Kühlbedarf. Die Abwärme aus Hausgeräten und Computern trägt ihren Teil dazu bei. In der Folge steigt der Kühlbedarf – auch bei Wohngebäuden. Wärmepumpen können nicht nur heizen, sondern auch sehr energiesparend kühlen. Dabei können in der Regel die vorhandenen Heizflächen zur Kühlung eingesetzt werden, so dass sich schon in der Installation erhebliche Kosten sparen lassen. Bei der passiven Kühlung wird Wärme aus dem Gebäude ins Erdreich übertragen, ohne dass der Kältekreis läuft. Damit lässt sich die Raumtemperatur um bis zu 3 bis 5°C absenken. Dies ist besonders wirtschaftlich und ökologisch, da der Verdichter als größter Energieverbraucher der Wärmepumpe nicht in Betrieb ist. Höhere Kühlleistungen lassen sich mit einer aktiven Kühlung – einer Umkehrung des Kältekreises - erzielen. Bei diesem Vorgang ist der Verdichter in Betrieb, was einen höheren Stromverbrauch zur Folge hat. Weil der höchste Kühlbedarf im Sommer mit den Stromproduktionsspitzen aus Photovoltaik zusammenfällt, ist von einem besonders hohen regenerativen Stromanteil auszugehen. Hier kann die aktive Kühlung gerade wegen ihres höheren Stromverbrauchs gezielt auch regional zur Netzentlastung eingesetzt werden.

Der Einsatz von Wärmepumpen in der Praxis

Die Wärmequellen für eine Wärmepumpe bieten jeweils unterschiedliche Bedingungen, die man individuell abwägen sollte. Außerdem muss man die Gegebenheiten vor Ort berücksichtigen, wenn man das Erdreich als Wärmequelle nutzen will. Die Geologischen Landesämter stellen für die Planung Informationen über Grundwasser, Geologie und Bodenbeschaffenheit bereit. In so genannten Ampelkarten wird dargestellt, an welchen Standorten Bohrungen prinzipiell unbedenklich, individuell zu beurteilen oder nicht zulässig sind.

Kennwerte für Effizienz

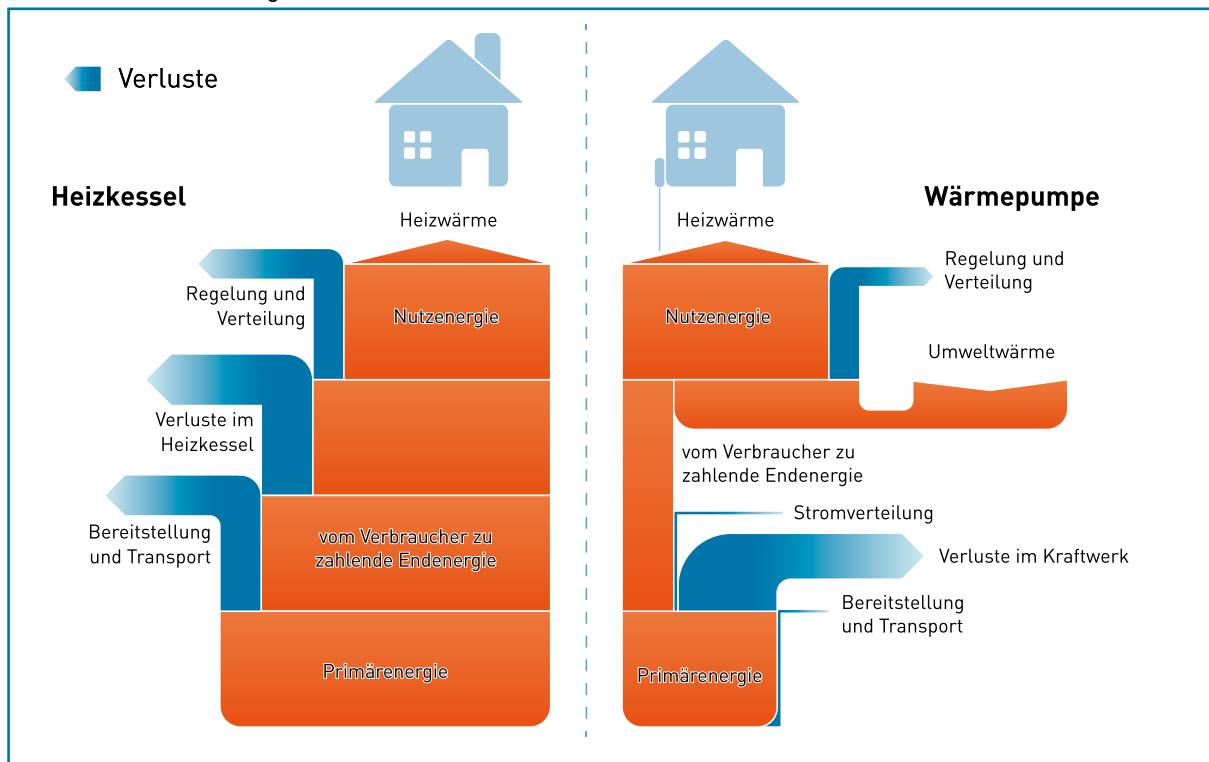
Zwei Kenngrößen geben Auskunft über die Effizienz einer Wärmepumpe: die Leistungszahl und die Jahresarbeitszahl. Die Leistungszahl - englisch: Coefficient of Performance (COP) - einer Wärmepumpe teilt die abgegebene Wärmeleistung durch die elektrisch aufgenommene Leistung. Die Leistungszahl einer Wärmepumpe wird unter Normbedingungen am Teststand ermittelt. Mit ihrer Hilfe kann die Effizienz von verschiedenen Wärmepumpen-Modellen verglichen werden. Auch die Jahresarbeitszahl (JAZ) teilt die Nutzwärme durch den Stromverbrauch. Allerdings handelt es sich hier um einen in der Praxis gemessenen Wert. Die JAZ zeigt an, wie effizient die Wärmepumpe im Alltagseinsatz ist – ähnlich dem tatsächlichen Spritverbrauch bei einem Auto, den man auf die gefahrenen Kilometer umrechnet. Ebenfalls als Jahresarbeitszahl bezeichnet man allerdings auch einen nach einer Norm (VDI 4650) errechneten Effizienzwert. Grundlage dafür ist die Leistungszahl (COP) sowie weitere Angaben zur geplanten Anlage. Ähnlich wie bei dem nach Normbedingungen ermittelten Durchschnittsverbrauch eines Autos kann der tatsächliche Verbrauch (die gemessene JAZ) aber je nach Nutzerverhalten, klimatischen Schwankungen o.Ä. davon abweichen. Je höher die Jahresarbeitszahl, desto weniger Strom verbraucht die Wärmepumpe.

Zwei mehrjährige Feldtests des Fraunhofer Instituts für solare Energiesysteme (ISE) an ca. 200 Wärmepumpen haben im Neubau Durchschnitts-JAZ zwischen 3 und 4 ermittelt. Das bedeutet, mit einer Kilowattstunde Strom wurden drei bis vier Kilowattstunden Wärme produziert. Einzelne Anlagen erzielten auch deutlich höhere Werte. Voraussetzung dafür ist eine sorgfältige Planung

und Installation. Ein Fazit der Studie: Die beste Effizienz erreichen einfache Anlagen, die sorgfältig geplant und installiert wurden und über gut abgestimmte Komponenten verfügen. Besonders gut schnitten erdgekoppelte Wärmepumpen mit niedrigen Vorlauftemperaturen wie zum Beispiel mit einer Fußbodenheizung ab. Die Effizienz einer Wärmepumpe in der Praxis basiert auf der ausgereiften, geprüften Technik sowie einer fachgerechten Planung und Installation. Das EHPA-Gütesiegel zeichnet qualitativ hochwertige Wärmepumpen aus, die unter anderem eine bestimmte Mindesteffizienz nachweisen müssen. Gut ausgebildete Installateure sind ebenfalls eine wesentliche Voraussetzung für effiziente Wärmepumpen-Anlagen. Fachkräfte können sich über eine Schulung als „EU-Zertifizierter Wärmepumpeninstallateur“ qualifizieren. Bei Geothermie-Bohrern sollten Bauherren ebenfalls auf zertifizierte Qualität achten.

Heizungsvergleich: Wärmepumpen sparen Primärenergie

Die Gesamteffizienz der Wärmepumpe ist höher, als die von dezentralen Wärmeerzeugern auf der Basis fossiler Brennstoffe. Dies zeigt das Verhältnis der eingesetzten Primärenergie zur erhaltenen Nutzenergie.



Quelle: Agentur für Erneuerbare Energien

Wärmepumpen für die Heizung und Warmwasserbereitung spielen aber nicht nur wegen ihrer Bedeutung für das Lastmanagement bei der Energiewende im Wärmemarkt eine Rolle. Denn die Gesamteffizienz der Wärmepumpe liegt höher als die von dezentralen Wärmeerzeugern auf der Basis fossiler Brennstoffe. Ein Rechenbeispiel: Bei einem neuen Einfamilienhaus erzeugt eine Erd-Wärmepumpe mit 3.750 Kilowattstunden Strom den jährlichen Wärmebedarf von 15.000 Kilowattstunden (Jahresarbeitszahl von 4,0). Im Vergleich dazu müssten beispielsweise bei einem Gasbrennwertkessel Brennstoff mit einer Wärmemenge von 15.300 Kilowattstunden zugeführt werden.

Bezieht die Wärmepumpe Strom aus dem öffentlichen Stromnetz, spart eine Erdwärmepumpe laut einer Studie der TU München beim Strommix des Jahres 2011 gegenüber einer Gasheizung mit solarer Trinkwasserunterstützung im Neubau 28 Prozent des Kohlendioxids (CO₂) ein. Je stärker der Anteil der Erneuerbaren Energien am Strommix wächst, desto geringer ist der CO₂-Ausstoß aus dem Betrieb der Wärmepumpe. So steigen die Einsparungen bis 2020 bereits auf 53 Prozent, bis 2030 sogar auf 63 Prozent der von der Gasheizung verursachten Emissionen.

Virtuelle Kraftwerke und virtuelle Großspeicher

Die nutzbaren Leistungen sowie die Zeitintervalle können weiter vergrößert werden, wenn viele Anlagen zu einem virtuellen Großspeicher gebündelt werden. Ein solches System erprobt der Energiekonzern Vattenfall derzeit in Berlin und Hamburg. Dort werden 90.000 Wohneinheiten über ein virtuelles Kraftwerk versorgt. In diesem Verbund schaltet der Versorger stromverbrauchende Wärmepumpen und stromerzeugende Blockheizkraftwerke (BHKW) zusammen. Ein BHKW ist dezentral und erzeugt gleichzeitig Strom und Wärme. Der Strom fließt ins Netz und kann z.B. ausbleibenden erneuerbaren Strom ersetzen. Die Heizenergie wird ins Wärmenetz oder in Speicher eingespeist. Von einer zentralen Leitwarte aus werden diese dezentralen Anlagen gesteuert und überwacht. Ist viel regenerativer Strom im Netz, bekommen die Wärmepumpen über Funk das Signal, Heizenergie zu erzeugen. Diese kann, wenn sie nicht sofort genutzt wird, in einem Speicher gepuffert werden. So lässt sich Wind- oder Solarstrom als Wärme zwischenspeichern. Der Konzern plant, 2013 eine elektrische Leistung von 200 Megawatt bereitzustellen und 200.000 Wohneinheiten mit Wärme zu versorgen.

Quellen und weitere Informationen

Brandenburgische Energie Technologie Initiative (ETI): Nutzung von Erdwärme in Brandenburg. Potsdam, 2009.

Bund für Umwelt und Naturschutz e.V. (BUND): Die elektrische Wärmepumpe: Eine verkappte Kohleheizung. April 2008.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (bafa): Basis- und Bonusförderung Wärmepumpe. 15. März 2011.

Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V.: Positionspapier Smart Grid: Der Beitrag der Wärmepumpe zum Lastmanagement in intelligenten Stromnetzen. September 2010.

DEENET: Chancen der oberflächennahen Geothermie für die erneuerbare Wärmeversorgung. Kassel, 2011.

Ecofys: Abschätzung der Bedeutung des Einspeisemanagements nach EEG 2009. Auswirkungen auf die Windenergieerzeugung in den Jahren 2009 und 2010. Berlin, Oktober 2011.

Ecofys / Prognos: Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strom und zur Netzintegration erneuerbarer Energien. Berlin, Oktober 2011.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Wärmepumpen Effizienz. Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. Freiburg, Mai 2011.

GeothermieZentrum Bochum (GZB): Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes – Bestandsaufnahme und Trends. Bochum, März 2010.

ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie: MINI-Technologiefolgenabschätzung Gas-Wärmepumpe. Heidelberg, Wuppertal, Mai 2008.

Leuschner, Udo: Wärmepumpen helfen Primärenergie sparen. August 2011.

Regierungspräsidium Freiburg: Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i.Br. – Kurzfassung. Staufen, 22. Februar 2010.

Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU): Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten. Berlin, Januar 2011.

TU München: Energiewirtschaftliche Bewertung der Wärmepumpe in der Gebäudeheizung. Studie im Auftrag des Bundesverbands Wärmepumpe e.V. München, November 2012 (noch unveröffentlicht).

Umweltministerium Baden-Württemberg: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmekollektoren. Stuttgart 2008.

Anbieter von Wärmepumpenstrom im Preisvergleich. Online unter: www.heizungsfinder.de/waermepumpe/service/preisvergleich-waermepumpenstrom (Abrufdatum: 25. Oktober 2012)

Süddeutsche Zeitung: Öfter mal abschalten. September 2012.

**Agentur für Erneuerbare
Energien e.V.**

Reinhardtstr. 18

10117 Berlin

Tel.: 030-200535-3

Fax: 030-200535-51

kontakt@unendlich-viel-energie.de

ISSN 2190-3581

www.unendlich-viel-energie.de

