

Forschungsbericht

**Industrielle
Großwärmepumpen -
Potenziale, Hemmnisse
und Best-Practice
Beispiele**

J. Lambauer, U. Fahl, M. Ohl,
M. Blesl, A. Voß

Industrielle Großwärmepumpen - Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice-Beispiele -

Forschungsprojekt gefördert von der Stiftung Energieforschung Baden-
Württemberg, durchgeführt in Kooperation mit Ochsner Wärmepumpen GmbH

Endbericht

J. Lambauer, U. Fahl, M. Ohl, M. Blesl, A. Voß

Juli 2008

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. A. Voß

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 2 |
| 1.1 | HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG DES FORSCHUNGSVORHABENS | 2 |
| 1.2 | DEFINITION FÜR INDUSTRIELLE GROßWÄRMEPUMPEN | 3 |
| 1.3 | STRUKTUR DES BERICHTS | 3 |
| 1.4 | STAND DER KENNTNISSE | 4 |
| 2 | TECHNISCHE GRUNDLAGEN | 6 |
| 2.1 | WÄRMEPUMPENARTEN | 6 |
| 2.2 | WÄRMEQUELLEN | 9 |
| 2.3 | KENNGRÖßEN VON WÄRMEPUMPENANLAGEN / -SYSTEMEN | 13 |
| 3 | MARKTANALYSE ZU INDUSTRIELLEN GROßWÄRMEPUMPEN..... | 16 |
| 3.1 | STAND DER TECHNIK | 16 |
| 3.2 | HERSTELLER UND INFORMATIONSTELLEN | 18 |
| 4 | BEST-PRACTICE-BEISPIELE | 20 |
| 4.1 | BESCHREIBUNG UND TECHNISCHE DATEN DER UNTERSUCHTEN ANLAGEN..... | 21 |
| 4.2 | ANALYSE DER BEST-PRACTICE-BEISPIELE | 23 |
| 4.3 | SENSITIVITÄTSANALYSE | 31 |
| 5 | HEMMNISANALYSE..... | 35 |
| 6 | IDENTIFIKATION POTENZIELLER EINSATZMÖGLICHKEITEN | 38 |
| 7 | POTENZIALE FÜR INDUSTRIELLE WÄRMEPUMPEN IN DEUTSCHLAND | 41 |
| 7.1 | GESAMTPOTENZIAL IN DER DEUTSCHEN INDUSTRIE..... | 41 |
| 7.2 | EINZELANALYSEN FÜR AUSGEWÄHLTE BRANCHEN | 44 |
| 8 | ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT | 49 |
| 9 | ANHANG | 51 |
| 10 | VERÖFFENTLICHUNG DER ERGEBNISSE | 72 |
| 11 | QUELLENVERZEICHNIS..... | 76 |
| 12 | ABBILDUNGSVERZEICHNIS..... | 79 |
| 13 | TABELLENVERZEICHNIS | 81 |

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung des Forschungsvorhabens

In Industrie und Gewerbe lassen sich Wärmepumpenanlagen vorteilhaft zur Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme sowie zur Abwärmenutzung einsetzen. Neben der Verwendung der üblichen Wärmequellen (Luft, Erdreich und Grundwasser) sind in der Industrie häufig Wärmequellen auf höherem Temperaturniveau, z. B. Abwärme von Kühlprozessen und Prozessabluft, verfügbar. Diese teilweise nicht direkt nutzbaren Wärmequellen können durch den Einsatz von Wärmepumpen sowohl innerhalb des Betriebes als auch für die Wärmeversorgung benachbarter Betriebe oder Wohngebiete genutzt werden. Darüber hinaus lassen sich Wärmepumpen vorteilhaft zur Entfeuchtung von Luft, z. B. in Trocknungsprozessen, einsetzen.

Laut /Heidelck et al. 2000/ könnten rund 50 bis 60 % des Wärmebedarfs in Industrie und Gewerbe in Deutschland durch den Wärmepumpeneinsatz bereitgestellt werden. Gemäß Angaben des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg (vgl. /Wirtschaftsministerium BW 2005/) wird das große Potenzial der günstigen Industrieabwärme jedoch bisher kaum genutzt. Dies ist möglicherweise auf eine unzureichende Information der potenziellen Anwender sowie die meist individuelle Planung und Ausführung der Anlagen zurück zu führen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es deshalb, vorteilhafte Einsatzmöglichkeiten für Wärmepumpenanlagen in Industrie und Gewerbe in Deutschland zu identifizieren und deren Potenzial abzuschätzen. Hierzu wird im Rahmen einer Marktanalyse der aktuelle Stand der Wärmepumpentechnologie untersucht sowie Angaben zu Herstellern und Informationsquellen zur Verfügung gestellt. Des Weiteren werden für ausgewählte Einsatzfälle in Betrieben unterschiedlicher Branchen Machbarkeitsstudien durchgeführt, bei denen u. a. die Wirtschaftlichkeit und die Einsparung von Endenergie, Primärenergie und CO₂-Emissionen detailliert untersucht werden. Darüber hinaus werden bestehende Hemmnisse bezüglich einer weiteren Verbreitung der Wärmepumpentechnik erfasst und Möglichkeiten zu deren Überwindung aufgezeigt. Um das Potenzial für die Nutzung von Wärmepumpen in der Industrie abschätzen zu können, werden potenzielle Einsatzmöglichkeiten analysiert und darauf aufbauend das technische Potenzial von Wärmepumpen in industriellen Prozessen ermittelt.

Mit diesem Bericht sollen allgemeine Informationen und technische Grundlagen über „Großwärmepumpen“ als auch Praxisbeispiele von realisierten Wärmepumpenanlagen im industriellen Bereich zur Verfügung gestellt werden. Der Bericht richtet sich an kleine und mittelständische Unternehmen (KMUs), Großunternehmen, aber auch an Städte, Stadtwerke, Energieversorgungsunternehmen und Contracting-Unternehmen, da gerade hier der Einsatz von Wärmepumpen in größerem Stil für die Raumwärmebereitstellung ein großes Potenzial bietet.

1.2 Definition für Industrielle Großwärmepumpen

Es ist keine umfassend gültige Definition von Großwärmepumpen in der Literatur und unter den entsprechenden Herstellern vorhanden. Im Folgenden werden zwei Definitionen des Bundesamts für Energie (BfE) der Schweiz dargestellt, die beide im Rahmen dieses Projektes zur Einordnung des Begriffs Großwärmepumpe Verwendung finden.

„Das maßgebende Kriterium ist nicht die Leistung, sondern der Weg bis zum Einsatz und die Anwendungen. Klein-Wärmepumpen sind einfache Anlagen, mit in Serien gefertigten Aggregaten. Klein-Wärmepumpen werden für einen bestimmten Wärmebedarf und/oder Warmwasserbedarf ausgewählt und gemäß Standardschaltungen installiert. Es gibt keine bezahlten Planungsarbeiten, der Endkunde redet nur mit dem Architekten und/oder mit dem Installateur. Groß-Wärmepumpen hingegen verlangen Berechnungen, echte Planung, Ingenieurarbeit und sogar Simulationen. Sehr oft müssen sie mehrere Bedürfnisse abdecken: Heizen und/oder Kühlen, Entfeuchtung. Die Erschließung der Wärmequelle kann nicht über einfache, standardisierte Faustregeln erfolgen. Kurz gefasst: die kleinen Wärmepumpen werden vom Installateur ausgewählt, die großen vom Ingenieur ausgelegt“ /BFE 2006/.

Eine weitere Definition gliedert die Wärmepumpenanlagen nach der Leistung.

„Kleinwärmepumpen sind serienmäßig hergestellte Wärmepumpen, die schlüsselfertig angeliefert werden und mittels Standardschaltungen ins Wärmeverteilsystem eingebunden werden. Normalerweise wird kein spezielles Engineering benötigt. Ihr Leistungsspektrum reicht bis etwa 100 kW. Wärmepumpen mittlerer Leistungsgröße, d. h. im Leistungssegment von etwa 50 kW bis 150 kW, können Serieprodukte sein, können aber von der Einbindung her bereits komplexeren Anforderungen unterworfen sein, und bedürfen einer versierten Planung. Als Großwärmepumpen betrachten wir Anlagen mit mehr als 150 kW Heizleistung. Sie unterscheiden sich nicht vorwiegend über deren Leistung von den beiden anderen Segmenten, sondern vielmehr durch die komplexeren Ansprüche, die auf das Objekt zugeschnittenen konzeptionellen Lösungen und durch kleine Losgrößen“ /BFE 2006a/.

Im Rahmen der Arbeiten bei der Durchführung dieses Projektes wurde bei der Leistung von Wärmepumpenanlagen eine Untergrenze von $100 \text{ kW}_{\text{th}}$ angelegt.

1.3 Struktur des Berichts

Nach der Darstellung der Zielsetzung des Forschungsprojektes und der Definition für Groß-Wärmepumpen wird im folgenden Abschnitt 1.4 der bisherige Wissensstand zum Einsatz von Wärmepumpen kurz dargestellt. Danach werden die technischen Grundlagen der Wärmepumpentechnologie, mögliche Wärmequellen und wichtige Kenngrößen von Wärmepumpen beschrieben. Abschnitt 3 stellt die Ergebnisse der Marktanalyse vor und enthält Informationen zu Herstellern und weiteren Informationsstellen. Im Abschnitt 4 werden acht

ausgewählte Anwendungsfälle detailliert untersucht und beschrieben. Dabei werden mögliche Einsparungen an End- und Primärenergie, CO₂-Emissionen sowie wirtschaftliche Aspekte, wie z. B. Amortisationszeiten oder Kosten der Nutzenergiebereitstellung für die Best-Practice-Beispiele im Vergleich zu konventionellen Anlagensystemen dargestellt. Hemmnisse für die weitere Verbreitung der Wärmepumpe im industriellen Bereich und Möglichkeiten zu deren Abbau werden in Abschnitt 5 beschrieben. Im Abschnitt 6 werden potenzielle Einsatzmöglichkeiten für Wärmepumpenanlagen in der Industrie untersucht, um in Abschnitt 7 das technische Potenzial für den Einsatz von Wärmepumpen in Deutschland bestimmen zu können. Abschließend werden in Abschnitt 8 die Ergebnisse zusammengefasst, der weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarf dargestellt und ein Fazit gezogen.

1.4 Stand der Kenntnisse

Bisher in Deutschland zum Wärmepumpeneinsatz durchgeführte Untersuchungen und Veröffentlichungen beziehen sich insbesondere auf die Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme in Wohngebäuden, d. h. *kleine bis mittelgroße Wärmepumpen*. Hierbei steht neben Informationsbroschüren für potenzielle Anwender (vgl. z. B. /LGA 2000/, /LGA 2003/, /Ochsner 2007/, /RWE 1998/, /IWP 1996) der Systemvergleich mit anderen Heizungssystemen im Vordergrund (vgl. z. B. /Leven et al. 2001, /Fischedick et al. 1997/, /Hoffmann et al. 1999/, /Feist, Baffia 1998/).

Darüber hinaus gibt es auch Publikationen zum Einsatz *mittelgroßer Wärmepumpen* in kommunalen Einrichtungen (z. B. Verwaltungsgebäuden, Schwimmbädern), dem Gewerbe (z. B. Hotels, Altenheimen) und der Raumheizung von Produktions- und Büroräumen in Industriebetrieben (vgl. z. B. /LGA 1999/, /BINE 2003/, /BINE 2003a/). Hierbei werden insbesondere die üblichen Wärmequellen Erdreich (Erdsonde und Energiepfähle), Wasser (meist Grundwasser) und Luft (Außenluft und Abluft) dargestellt. Die Verwendung von Abwärmeströmen als Wärmequelle sowie die Kombination von Wärme- und Kälteprozessen werden bislang fast gar nicht behandelt (vgl. z. B. /Wirtschaftsministerium BW 2005/, /DKV 2000/, /DKV 2001/, /Weber 1995/, /Reiner 1994/, /Ziegler et al. 1994/).

Nach Angaben in /Wirtschaftsministerium BW 2005/ und in /Heidelck et al. 2000/ ist in Deutschland der Einsatz von Wärmepumpen in der Industrie und dem Gewerbe im Vergleich zu anderen Ländern (z. B. Großbritannien, USA, Spanien, Japan, China, Dänemark und Norwegen) bislang relativ gering.

Vorteilhafte Anwendungsgebiete im gewerblichen und industriellen Bereich sind demnach zum Beispiel:

- Wärmepumpen zur Heizung und Wärmerückgewinnung als Bestandteil von Großklimaanlagen in Bürogebäuden und Warenhäusern
- Wärmepumpen zum gleichzeitigen Heizen und Kühlen von Räumen
- Wärmepumpen zur Ausnutzung der Niedertemperaturabwärme von Prozessen
- Brüdenverdichter und Kochereianlagen zum Eindampfen bzw. Eindicken von Flüssigkeiten
- Wärmepumpen-Destillieranlagen zur teilweisen Wiederverwendung der eingesetzten Verdampfungsenergie
- Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) als Tandemanlage (BHKW und Wärmepumpe) zum gleichzeitigem Parallelbetrieb eines Generators mit einer Wärme- bzw. Kältemaschine

Dabei sind nach den bislang vorliegenden Untersuchungen folgende Branchen primär angesprochen:

- Metallverarbeitung
- Lebensmittelindustrie (z. B. Molkereien, Brauereien)
- Chemische Industrie
- Papier-, Holz- und Textilverarbeitung

2 Technische Grundlagen

Nach VDI 2067 Blatt 6 ist eine Wärmepumpe eine Einrichtung, die einen Wärmestrom bei niedriger Temperatur aufnimmt (kalte Seite) und unter Aufwand hochwertiger Energie bei höherer Temperatur wieder abgibt (warme Seite) /VDI 2067-6/.

Der Kältemittelkreislauf einer Wärmepumpe ermöglicht es, Wärme auf ein höheres Temperaturniveau zu „pumpen“. Dabei macht man sich die physikalische Eigenschaft zu nutze, dass Fluide bei höheren Drücken eine höhere Siedetemperatur aufweisen. Das Herzstück einer Wärmepumpe ist der durch einen Verdichter angetriebene Kältemittelkreislauf. Je nach Art der Verdichtung unterscheidet man verschiedene Wärmepumpen-Typen. Der Kältemittelkreislauf einer Wärmepumpe ist vom Aufbau her identisch mit dem eines Kühlschranks. Nur die Aufgabe ist dabei umgekehrt. Beim Kühlschrank wird dem Kühlgut Wärme entzogen und an seiner Rückseite an den Raum abgegeben. Bei der Wärmepumpe wird der Umwelt Wärme entzogen und dem Heizungssystem zugeführt.

2.1 Wärmepumpenarten

Im Rahmen dieses Berichts werden folgende Arten von Wärmepumpen unterschieden:

- Kompressionswärmepumpen
- Absorptionswärmepumpen
- Gasklimageräte
- Brüdenverdichter

2.1.1 Kompressionswärmepumpe

Die wesentlichen Bauteile einer Kompressionswärmepumpe sind Verdichter, Verdampfer, Verflüssiger und das Expansionsventil (siehe **Abbildung 2-1**). Verdampfer und Verflüssiger sind Wärmetauscher, das heißt, sie übertragen Wärme von einem Medium auf ein anderes Medium. Im Verdampfer befindet sich das flüssige Kältemittel unter niedrigem Druck. Es hat eine niedrigere Temperatur als die Wärmequelle. Dadurch fließt Wärme von der Wärmequelle an das Kältemittel, wodurch es zum Verdampfen des Kältemittels kommt. Der größte Teil der aufgenommenen Energie wird in Form der Verdampfungsenthalpie im Kältemittel gespeichert. Das nun gasförmige Kältemittel wird im Kompressor auf einen hohen Druck verdichtet und dadurch so stark erwärmt, dass die Temperatur des Kältemittels nach der Verdichtung höher ist als die Temperatur, die für die Heizung erforderlich ist. Die vom Kompressor geleistete Antriebsenergie wird in Wärme umgewandelt und fließt ebenfalls an das Kältemittel. Bei Wärmepumpen mit kleinen Leistungen wird der Kompressor in der Regel durch einen Elektromotor angetrieben, der direkt im Gehäuse des Verdichters sitzt. In diesem Fall spricht man von einer Elektrowärmepumpe /BINE 2002/. Anstatt eines Elektromotors

kann der Verdichter auch durch einen Verbrennungs-Motor angetrieben werden. Am häufigsten werden dazu Diesel- oder Gas-Motoren eingesetzt. Durch die Verwendung von Stirling-Motoren kann theoretisch jedes brennbare Material eine Kompressions-Wärmepumpe antreiben. Im Verflüssiger gibt das sehr heiße und unter hohem Druck stehende Kältemittel seine gesamte Energie, sowohl die aus der Wärmequelle aufgenommene Wärme, die aufgenommene Antriebsenergie des Kompressors, als auch die durch Kondensation wieder frei werdende Verdampfungsenthalpie an den Heizkreis ab. Das Expansionsventil reduziert den Druck des Kältemittels vom Verflüssiger- auf den Verdampferdruck, wobei das Kältemittel nochmals abkühlt. Somit ist der Kreislauf geschlossen.

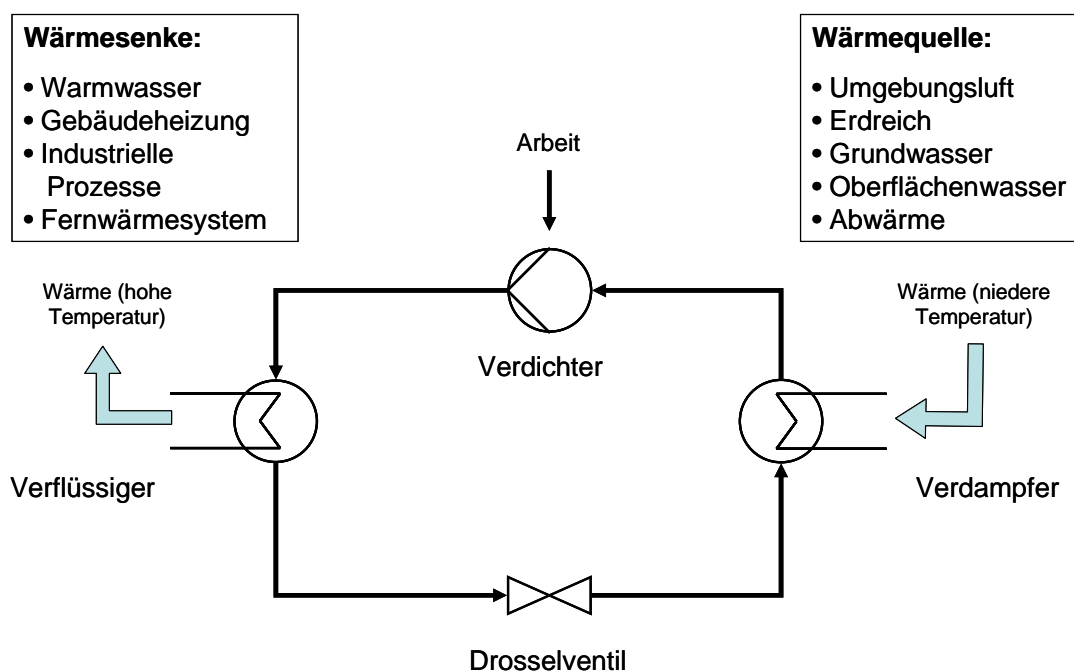


Abbildung 2-1: Funktionsschema einer Kompressionswärmepumpe

2.1.2 Absorptionswärmepumpe

Als Absorption wird das Lösen von Gasen in Flüssigkeiten bezeichnet. Die Fähigkeit einer Flüssigkeit, ein Gas zu absorbieren, hängt ab von Druck und Temperatur. Dabei handelt es sich um einen reversiblen Prozess. Das Lösen des Kältemittels im Lösungsmittel ist mit einer Abgabe von Wärmeenergie verbunden, welche im Absorber ausgekoppelt wird (siehe Wärmestrom Q_1 in **Abbildung 2-2**). Dieser Wärmestrom Q_1 deckt zusammen mit dem am Verflüssiger abgegebenen Wärmestrom Q_{ab} den Heizwärmebedarf. Um das Kältemittel im Austreiber wieder vom Lösungsmittel zu trennen, muss der reversible Prozess umgedreht und dem kältemittelreichen Lösungsmittel der Wärmestrom Q_2 zugeführt werden.

Die Lösungsmittelpumpe verbraucht im Vergleich zum Kompressorantrieb bei Kompressionswärmepumpen kaum Energie, da hier eine Flüssigkeit auf ein höheres Druckniveau gebracht wird und nicht, wie im Kompressor, ein Gas.

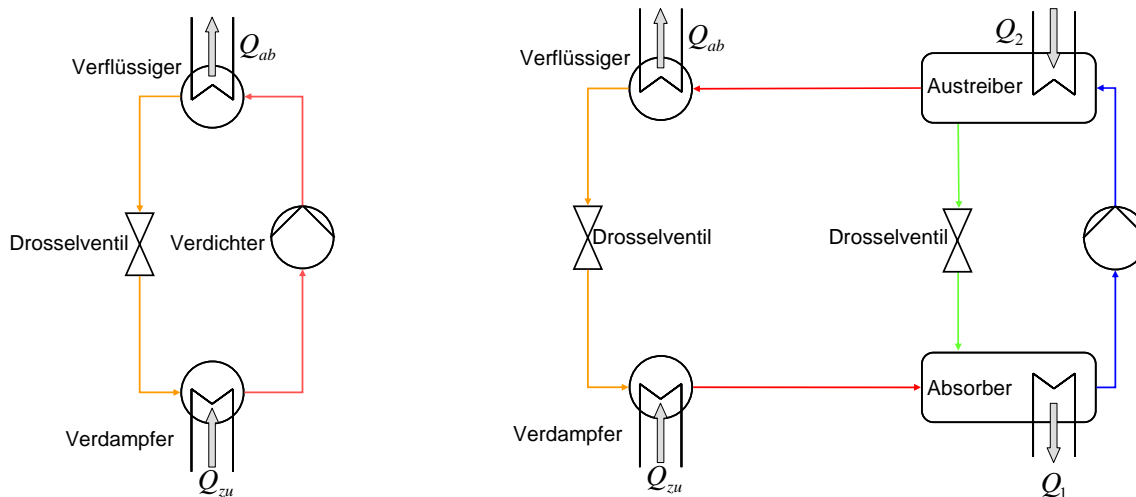


Abbildung 2-2: Vergleich Kompressions- und Absorptionswärmepumpe (rechts)

Kompressions- und Absorptionswärmepumpen unterscheiden sich nur durch den Verdichter (siehe **Abbildung 2-2**). Den so genannten „thermischen Verdichter“ bei der Absorptionswärmepumpe bildet ein Lösungsmittelkreislauf. Dieser wiederum wird aus dem Absorber, der Lösungsmittelpumpe, dem Austreiber und dem Lösungsmittelventil gebildet. Als Arbeitsstoffpaar wird, je nach Einzelfall, hauptsächlich Ammoniak/Wasser oder Wasser/Lithiumbromid verwendet. Die erforderliche Wärme am Austreiber kann mit allen Arten von thermischer Energie auf entsprechendem Temperaturniveau (ca. 85 °C bis 160 °C) aufgebracht werden. Da außer der Lösungsmittelpumpe keine bewegten Teile zum Einsatz kommen, zeichnet sich die Absorptions-Wärmepumpe durch einen sehr wartungsarmen Betrieb aus, was sie im besonderen Maße für die Industrie interessant macht /BINE 2002/. Des Weiteren wird sie meist eingesetzt, wenn Abwärme direkt genutzt werden kann, da in solchen Fällen kein weiterer Brennstoff verbraucht wird.

2.1.3 Gas-Klimageräte

Eine alternative Möglichkeit zur getrennten Erzeugung von Wärme und Kälte bei Heiz- und Kühlsystemen sind sogenannte Gas-Klimageräte. Diese Geräte arbeiten nach dem Prinzip einer Gasmotorwärmepumpe. In der Heizfunktion nutzen sie die Umgebungswärme und die Abwärme des Motors als Wärmequelle. Einsatzbereiche für diese Geräte zur Klimatisierung (Heizen und Kühlen) stellen Hotels, Restaurants, Büro- und Verwaltungsgebäude, Gewerbe-

betriebe, Ausstellungsräume etc. dar. Wärme und Kälte werden vom häufig außen aufgestellten Gas-Klimagerät über ein Kältemittelrohrsystem nach dem VRF-Prinzip (Variable Refrigerant Flow) in die Innengeräte transportiert. Dort erfolgt die Übertragung der Wärme bzw. Kälte in den Raum. Alternativ kann die Verteilung auch über Wasserkreisläufe erfolgen. In diesem Fall wird ein Wärmetauscher zwischengeschaltet /ASUE 2006/. Gas-Klimageräte arbeiten ähnlich wie Kompressionskälteanlagen mit Kältemitteln (z. B. R 410a), die im Kreislauf geführt werden. Gemäß /ASUE 2006/ sind z. B. von folgenden Herstellern Anlagen auf dem deutschen Markt verfügbar:

- Aisin
- Mitsubishi Heavy Industries
- Sanyo

2.1.4 Brüdenverdichter

Als Brüden wird in der Verfahrenstechnik der Dampf einer Flüssigkeit bezeichnet. Der Begriff Brüden wird im Wesentlichen im Zusammenhang mit der

- • Destillation,
- • dem Eindicken und
- • dem Kochen von Produkten (Flüssigkeiten)

verwendet.

Die Brüdenverdichtung ist ein offener Wärmepumpenprozess, weil der Brüden die Wärmepumpe nur einmal durchläuft und dann an die Umgebung abgegeben wird. Anwendungsmöglichkeiten für die Brüdenkompression ergeben sich vielfach in der Nahrungsmittelindustrie zur Eindickung von Produkten wie z. B. Milch, Fruchtsäften usw. Dabei ist es oft notwendig, die Verdampfung bei niedrigen Temperaturen (Vakuumverdampfung bei ca. 30 bis 50 °C) vorzunehmen, um die Qualität des Produktes nicht zu mindern. Durch das tiefe Temperaturniveau sind konkurrierende Maßnahmen zur Energieeinsparung, z. B. Abwärmenutzung zur Gebäudebeheizung, stark eingeschränkt, so dass die Brüdenverdichtung das optimale System zur Energiekostensenkung ist. Dadurch, dass der Brüden auch das Arbeitsmedium darstellt, ist man bei der Anwendung nicht an den Einsatztemperaturbereich (Stabilitätsprobleme) üblicher Kältemittel gebunden. Möglich ist der Einsatz der Brüdenverdichtung für die Destillation und Eindampfung der verschiedensten Produkte für Temperaturen bis über 200 °C /Enersys 2/

2.2 Wärmequellen

Die Wärmequelle ist ein essentieller Bestandteil einer Wärmepumpenanlage. Im Gegensatz zu konventionellen Heizungssystemen wird durch die Erschließung einer Wärmequelle regenerative Wärme nutzbar gemacht. Diese Erschließung resultiert in den meisten Fällen in zu-

sätzlichen Investition bei der Anschaffung, dafür steht aber die Umweltwärme beim Betrieb der Anlage kostenlos zur Verfügung bzw. im Fall der Abwärmenutzung entfallen bzw. verringern sich die Kosten der „Wärmeentsorgung“. Für den Einsatz im industriellen Bereich schließt sich die Nutzung von Außenluft aufgrund der ungenügend erreichbaren Leistung aus. Mögliche Quellen sind:

- Erdwärme
- Grundwasser
- Industrielle Abwärme (Luft und Flüssigkeiten)
- Abwasser (siehe Exkurs)

Exkurs Abwassernutzung

Ein bis heute noch unterschätztes Abwärmepotenzial liegt im weit verzweigten Kanalisationsnetz. Die Wärme im Abwasser stammt aus Abwärme von Industrie und Privathaushalten, sodass auch im Winter Temperaturen von 10 °C bis 15 °C erreicht werden. Dank des günstigen Temperaturniveaus im Winter ist im Vergleich zu herkömmlichen Wärmepumpensystemen mit den Wärmequellen Luft, Erdreich oder Grundwasser ein effizienterer Betrieb möglich. So erreichen Abwasser-Wärmepumpen bei Neubauten Jahresarbeitszahlen von bis zu 5. Ein weiterer Vorteil der Abwasserwärmenutzung liegt im beständigen und reichlichen Wärmeangebot sowie in der geeigneten Abnehmerstruktur in der Nähe der Wärmequelle /DBU 2005/.

Potenzial

Pro 1 m³ kann dem Abwasser pro Kelvin Abkühlung 1,16 kW Wärme entzogen werden. Bei einer angenommenen Leistungsziffer von 4 kann eine Wärmepumpe damit 1,55 kW produzieren. Je nach Auslegung der Wärmepumpe kann die Gesamtanlage eine Wärmeleistung von insgesamt 2 bis 5 kW pro Kelvin Abkühlung und pro m³/h Abwasser zur Verfügung stellen. Die Abwasserwärme reicht vom Angebot her aus, um 10 % aller an eine Kläranlage angeschlossenen Gebäude versorgen zu können. Damit könnte in Deutschland theoretisch der Heizbedarf von vergleichsweise rund 10 Mio. Einwohnern gedeckt werden, sei es in Wohn-, Dienstleistungs-, Industrie- oder Gewerbebauten /Kobel 2004/, /Müller 2004/.

Randbedingungen

Die Einsatzmöglichkeit einer Abwasserwärmepumpe setzt bestimmte Anforderungen an Kanal, Abnehmerstruktur und Kläranlage voraus, welche nachfolgend kurz beschrieben werden (vgl./DBU 2005/, /Kobel 2004/, /Müller 2004/)

1) Kanäle

Kanäle müssen einen Minimaldurchmesser von 80 cm aufweisen, um einerseits ausreichend Raum für die Installation der Wärmetauscher bereitzustellen; andererseits verfügen Kanäle mit diesem Mindestdurchmesser in der Regel über ein ausreichendes Wärmeangebot im Abwasser, das von einer benötigten durchschnittlichen Mindestabwassermenge von 15 l/s geführt wird. Diese Abwassermenge fällt für gewöhnlich in Gemeinden ab 5.000 – 10.000 Einwohnern an. Hierbei gilt: Je höher die Bebauungsdichte, desto wirtschaftlicher ist ein Betrieb der Anlage möglich /DBU 2005/. Weiterhin sollte für einen optimalen Einsatz des Wärmepumpensystems die Wärmetauscherlänge 20 bis max. 200 m aufweisen. Die Kanallänge zum Verbraucher sollte aus Gründen des Wärmeverlustes keine 200 m in bebauten und 300 m in unbebauten Gebieten übersteigen. Die Vorlauftemperatur auf Verbraucherseite beträgt dabei max. 70 °C. Darüber hinaus reduziert eine gute Zugänglichkeit zum Abwasserkanal die Kosten für Installation und Wartung der Wärmetauscher in den Kanälen. Praktischerweise sollte der Einbau der Wärmetauscherelemente mit einer ohnehin notwendigen Sanierung eines Kanals verbunden werden.

2) Abnehmerstruktur

Günstige Voraussetzungen herrschen überall dort, wo in der Nähe von großen Abwasserkanälen oder Kläranlagen ein hoher Wärmeleistungsbedarf von mindestens 150 kW (entspricht dem Bedarf von etwa 50 Wohneinheiten) besteht, wie z. B. bei Verwaltungsgebäuden, Wohnsiedlungen, Gewerbe- und Industriebauten, Schulhäuser, Heime, Sportanlagen und Schwimmbäder. Die spezifischen Kosten für die Installation für die Wärmeentnahme sinken bei größeren Abnehmern deutlich. Nicht geeignet als Abnehmer sind daher einzelne Einfamilienhäuser. Auch Prozesswärmeverbraucher mit industriellen Prozessen, die sehr hohe Temperaturen benötigen, sind für eine Abwasserwärmenutzung ungeeignet. Ein weiteres Kriterium für die Wirtschaftlichkeit der Anlage ist neben dem Wärmebedarf der Abnehmer auch die Distanz zwischen Wärmequelle und -verbraucher. Für Siedlungsgebiete sind hierbei 100 bis 300 m möglich.

3) Auswirkung der Wärmeentnahme auf den Betrieb einer Kläranlage

Aufgrund des Wärmeentzugs kühlt sich das Abwasser ab und beeinflusst die nachgeschaltete Abwasserreinigungsanlage. Betroffen sind hierbei vor allem die Prozesse der Nitrifikation und Denitrifikation, da der Wirkungsgrad der Stickstoffelimination von einer Abkühlung des Abwassers aufgrund der Verminderung der Wachstumsgeschwindigkeit der Mikroorganismen abhängt.

Eine Temperaturabnahme in der Biologie führt generell zu einer Verminderung der Nitrifikationsleistung und Erhöhung der NH_4 -Konzentration. Eine Wärmeentnahme ist jedoch ohne jede Prüfung zulässig, solange die Durchschnittstemperatur im Kläranlagen-Zulauf in den Wintermonaten $10\text{ }^\circ\text{C}$ nicht unterschreitet und die resultierende Abkühlung im Zulauf $\leq 0,5\text{ K}$ ist. Die Temperatur in Fließgewässern darf sich durch Wärmeentzug zudem nicht um mehr als $1,5\text{ K}$ verändern /DBU 2005/.

Kosten

Die Kosten für die Installation und den Betrieb einer Wärmepumpenanlage mit Wärmerückgewinnung aus Abwasser sind in starkem Maße abhängig von den Stromkosten sowie den Kosten für die Versorgungsleitungen. Gegenwärtig geht man von ca. 330 bis 500 EUR pro kW angeschlossene Nutzleistung aus. Dies entspricht etwa 1.170 bis 1.620 EUR pro angeschlossene Wohneinheit /DBU 2005/.

Beispiele der Abwassernutzung in der Schweiz

Die Nutzung von Abwärme aus Abwasser ist in der Schweiz im Rahmen des Programms „EnergieSchweiz für Infrastrukturanlagen“ verstärkt untersucht worden. An rund 60 realisierten Anlagen wurde dabei die Tauglichkeit und Zuverlässigkeit dieser Systeme getestet. Im Folgenden werden zwei Beispiele zur Abwärmenutzung des Abwassers in der Schweiz kurz dargestellt.

Binningen - Wärmeentzug aus dem Abwasser in der Kanalisation

In Binningen, einem Vorort von Basel mit etwa 14.000 Einwohnern, wurde im Jahr 2001 eine Wärmepumpenanlage mit Nutzung von Abwärme aus der Kanalisation realisiert. Hierzu wurde in die bestehende Kanalisationsleitung ein ca. 140 m langer Wärmetauscher eingebaut. Das Abwasser weist einen relativ konstanten Durchfluss von 200 l/s sowie eine Mindesttemperatur von $+10\text{ }^\circ\text{C}$ auf. Mit dieser Abwärme wird der Bedarf von etwa 300 Wohnungen (Raumheizung und Warmwasser) gedeckt. Für den Kanalisationsbetreiber ergibt sich seit Inbetriebnahme kaum zusätzlicher Aufwand. So konnte keine Verschmutzung des Rinnen-Wärmetauschers und somit keine Leistungsverminderung festgestellt werden /WBA 2001/.

Technische Daten der Wärmepumpenanlage /WBA 2001/:

| | |
|--|-------------|
| thermische Leistung Wärmetauscher: | ca. 230 kW |
| elektrische Aufnahmeleistung Wärmepumpe: | ca. 90 kW |
| thermische Leistung Wärmepumpe: | ca. 320 kW |
| Arbeitsmittel Wärmepumpe: | R134a |
| gesamte Jahreswärmeproduktion WP: | 1.800 MWh/a |
| Jahresarbeitszahl: | 3,5 |

Muri - Wärmeentnahme nach der Kläranlage

Bei der Entnahme von Abwasserwärme nach der Kläranlage wird die Wärme zunächst über Nahwärmenetze zu den Abnehmern transportiert. Für die Versorgung von nahe gelegenen Gebäuden (bis 1 km von der Kläranlage) kann die Wärmepumpe direkt in der Heizzentrale der Kläranlage installiert werden. Vorteil des Wärmeentzuges nach der Kläranlage ist es, dass das Abwasser soweit wie technisch machbar abgekühlt werden kann, da die Aktivität der Mikroorganismen in der biologischen Reinigung nicht mehr berücksichtigt werden muss.

Die Anlage in der Gemeinde Muri im Kanton Aargau mit 7.000 Einwohnern versorgt auf diese Weise mittels Wärmeverbund von 3,2 km Länge 7 größere dezentrale Heizanlagen. In jeder dieser Heizzentrale wird die „kalte“ Fernwärme über installierte Wärmepumpen auf das benötigte Temperaturniveau zur Erzeugung von Grundlastwärme angehoben. Die Anlage versorgt seit 1994 rund 200 Wohnungen und kann laut Betreiber die Wärme zu wirtschaftlich konkurrenzfähigen Preisen anbieten /Kobel 2004/.

Technische Daten der Wärmepumpenanlage /Kobel 2004/:

| | |
|---|---------------|
| Gesamtleistung der installierten Wärmepumpen: | 1.700 kW |
| gesamte Jahreswärmeproduktion WP: | 2.400 MWh/a |
| Jahresarbeitszahl: | 3,1 |
| Gesamtinvestition: | 2,63 Mio. EUR |
| Wärmepreis: | 5,6 ct/kWh |

2.3 Kenngrößen von Wärmepumpenanlagen / -systemen

Um die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe beurteilen zu können, wird, wie auch bei anderen Energiesystemen, das Verhältnis von nutzbarem Wärmestrom zu aufgewendeter Energie gebildet.

Bei elektrisch betriebenen Wärmepumpen spricht man von der so genannten Leistungszahl ε beziehungsweise von dem COP-Wert (coefficient of performance). Die beiden Größen unterscheiden sich dahingehend, dass bei dem COP-Wert nach DIN EN 255 nicht nur die Leistungsaufnahme des Kompressors in die Berechnung der Leistungsaufnahme der Wärmepumpe eingeht, sondern auch die möglichen Hilfsenergien wie zum Beispiel die Leistungsaufnahme der Wärmequellen- und Heizkreispumpen und der Regelung. Somit berechnen sich diese Werte nach folgenden Gleichungen (2.1) und (2.2):

$$\varepsilon = \frac{Q_{ab}}{P_{zu,verd}} \quad (2.1)$$

$$COP = \frac{Q_{ab}}{P_{zu,verd} + P_{zu,hilf}} \quad (2.2)$$

mit

Q_{ab} : abgegebene Heizwärmeleistung am Kondensator in [W]

$P_{zu,verd}$: Leistungsaufnahme des Verdichters in [W]

$P_{zu,hilf}$: benötigte Hilfsenergie in [W]

Überschlägig kann die Leistungszahl einer Wärmepumpe auch mit Gleichung (2.3) berechnet werden:

$$\varepsilon = 0,5 \cdot \frac{T}{T - T_0} = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T} \quad (\text{mit } \Delta T = T - T_0) \quad (2.3)$$

mit

T : absolute Temperatur der Wärmesenke in [K]

T_0 : absolute Temperatur der Wärmequelle in [K]

ΔT : Differenz zwischen absoluter Wärmesenken- und Wärmequellentemperatur in [K]

Aus Gleichung (2.3) wird ersichtlich, dass eine Wärmepumpe umso wirtschaftlicher betrieben werden kann, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke und je größer die Temperatur der Wärmequelle ist. Zum Beispiel bedeutet eine Leistungszahl von 3, dass aus 2 Teilen Umweltenergie und einem Teil Antriebsenergie 3 Teile Heizwärme bereitgestellt werden. Bei elektrisch betriebenen Wärmepumpen ist die Wärmepumpe erst ab dieser Größe der Leistungszahl energetisch sinnvoll, wenn man einen Wirkungsgrad bei der Stromerzeugung von durchschnittlich 33 % zugrunde legt /BINE2002/.

Weiter ist für einen günstigen Einsatz von Wärmepumpen darauf zu achten, dass die Wärmequelle leicht zu erschließen ist und wenig Hilfsenergie verbraucht. Auch ist es für eine

ideale Auslegung der Wärmepumpenanlage günstiger, wenn Wärmequellen und –senken möglichst konstante Temperaturen aufweisen.

Wird die Wärmepumpe mit einem Verbrennungsmotor betrieben, spricht man anstelle der Leistungszahl von der Heizzahl ζ (zeta).

$$\zeta = \frac{\dot{Q}_{ab}}{H_u \cdot \dot{m}_{Br}} \quad (2.4)$$

mit

H_u : Heizwert des Brennstoffs

\dot{m}_{Br} : Brennstoffmassenstrom

Da die Leistungszahl aber nur eine Momentaufnahme bei speziell definierten Bedingungen darstellt, der Betrieb aber Schwankungen unterliegt, wie zum Beispiel eine veränderliche Quellentemperatur, verwendet man zur gemittelten Bewertung der Wärmepumpe über ein Jahr die Jahresarbeitszahl β (engl. seasonal performance factor).

$$\beta = \frac{\text{abgegebene Heizwärme pro Jahr } \dot{Q}_{ab}}{\text{aufgenommene Antriebsenergie pro Jahr } W_{zu}} \quad (2.5)$$

Wird eine Wärmepumpe auch zur Kühlung eingesetzt, so kommt eine weitere Kenngröße zum Einsatz, der EER (energy efficiency ratio).

$$EER = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Leistungsaufnahme}} \quad (2.6)$$

3 Marktanalyse zu industriellen Großwärmepumpen

Zunächst wird eine angebotsseitige Marktanalyse zu großen Wärmepumpenanlagen durchgeführt. Ziel ist es, den Stand der Technik darzustellen, die anfallenden Investitions- und Betriebskosten zu ermitteln und Informationen über Hersteller, Fachfirmen und sonstigen Informationsstellen zusammen zu stellen. Zudem werden aktuelle Informationen über notwendige Randbedingungen (z. B. geeignetes Temperaturniveau der Wärmequelle, etc.) für den sinnvollen Einsatz von Großwärmepumpen im industriellen Bereich dargestellt. Zahlen zum Bestand an industriellen Wärmepumpen in Deutschland oder in Europa sind nicht verfügbar.

3.1 Stand der Technik

Hinsichtlich des Standes der Technik deckt die angebotene thermische Leistung einen Bereich von $100 \text{ kW}_{\text{th}}$ bis ca. $1.500 \text{ kW}_{\text{th}}$ ab (ein Hersteller bis ca. $34 \text{ MW}_{\text{th}}$). Hinsichtlich der Energieausnutzung bieten diese Anlagen einen möglichen COP (engl.: Coefficient Of Performance (Leistungszahl), entspricht dem Quotienten aus Nutzenergie und eingesetzter Energie - siehe Abschnitt 2.3) im Bereich von 2,4 bis 5,3 mit einem Maximum bei der aktuellen Wärmepumpentechnologie von ca. 6 bis 7. Das erreichbare Temperaturniveau kommerziell verfügbarer industrieller Wärmepumpen liegt im Moment im einstufigen Betrieb bei ca. 65 °C bis 75 °C und bei ca. 80 °C im zweistufigen Betrieb (Reihenschaltung von 2 Wärmepumpenanlagen). Diese Temperaturniveaus sind mit den im Moment verfügbaren Kältemitteln (z. B. R 134a, R 407c) Standard. Es sind Beispielanlagen verfügbar, die in der Lage sind, bis ca. 90 °C bei einer thermischen Leistung von ca. $300 \text{ kW}_{\text{th}}$ zu produzieren. Diese Anlagen sind jedoch individuell geplante und gefertigte Sonderanfertigungen. Bei den Wärmetauschern werden für Flüssigkeiten in einem Leistungsbereich von 5 bis 500 kW Plattenwärmetauscher eingesetzt. Im Bereich von 50 bis 2.000 kW werden Bündelrohrwärmetauscher bevorzugt. Für Gase kommen im Leistungsbereich von 5 bis 500 kW Lamellenwärmetauscher zum Einsatz. Gemäß dieser Analyse lässt sich feststellen, dass derzeit die Hauptanwendung von Wärmepumpen im industriellen Bereich die Abwärmenutzung zur Brauchwarmwasser- und Raumwärmebereitstellung darstellt.

Neben der Abwärmenutzung zeigt die Nutzung von Abwasser als Wärmequelle wachsende Bedeutung (vgl. /BWP 2005/, /DBU 2005/). Vor allem in der Schweiz sind auf diesem Gebiet bereits eine Vielzahl von Projekten erfolgreich realisiert worden. Eine weitere noch relativ neue Anwendung sind so genannte „Gas-Klimageräte“ /ASUE 2006/. Darunter versteht man gasbefeuerte Klimaanlage, die sowohl Heizen als auch Kühlen können. In der Betriebsweise „Heizen“ nutzen diese Systeme die Außenluft als Wärmequelle.

Hinsichtlich des realisierbaren Temperaturniveaus von Wärmepumpen sind neue Kältemittel in der Entwicklung. Untersuchungen zum Beispiel mit R 227ea lassen mögliche Temperaturen von ca. 90 °C realistisch erscheinen. Durch den Einsatz von R 245fa sollten

Temperaturen von über 100 °C realisierbar sein. Wann diese neuen Kältemittel auf dem Markt verfügbar sein werden, kann im Moment nach Aussagen von Kältemittelherstellern jedoch noch nicht abgeschätzt werden.

Die Nutzung von industrieller Abwärme durch Wärmepumpen zur Raumwärmebereitstellung, Klimatisierung oder zur Prozesswärmebereitstellung muss, im Vergleich zur Raumheizung durch Wärmepumpen in Einfamilienhäusern, für den einzelnen Anwendungsfall individuell geplant und ausgelegt werden. Die Produktpaletten einiger Hersteller bieten bereits standardisierte Anlagen unterschiedlicher Leistungsgröße an, die Integration in einen bestehenden Prozess bzw. in den Wärmekreislauf eines Industriegebäudes muss jedoch durch Planer bzw. Anlagenbauer individuell durchgeführt werden. Hinsichtlich der zu nutzenden Abwärme muss abgeklärt werden, ob die notwendige Menge mit entsprechender Temperatur zur Verfügung steht. Bei der nutzbaren Wärmequellentemperatur sind aktuelle Wärmepumpen, im Vergleich zu Brüdenverdichtern, auf eine maximale Eingangstemperatur von ca. 35 °C beschränkt. Höhere Temperaturen können nicht direkt in einer Wärmepumpe eingesetzt werden, da dies zu Schäden am Verdichter führen kann. Neben der Temperatur und Menge an Abwärme muss diese zeitnah zur Nutzung zur Verfügung stehen. Wenn dies nicht der Fall ist, muss durch den Einsatz von Wärmespeichern dieser Zeitunterschied überbrückt werden. In den, im Rahmen dieses Projektes, untersuchten Anwendungsfällen war jedoch weniger eine nutzbare Abwärmequelle das Problem, als eine entsprechende Nutzungsmöglichkeit dieser Wärmemenge. Da die mögliche darstellbare Temperatur aktueller Wärmepumpen auf ca. 75 °C begrenzt ist, müssen Anwendungen gefunden werden, welche mit diesem Temperaturniveau sinnvoll befriedigt werden können. Um eine Wärmepumpenanlage wirtschaftlich betreiben zu können, sollte die Anlage möglichst kontinuierlich betrieben werden. Je höher die Betriebsstunden sind, umso wirtschaftlicher kann eine Wärmepumpe Abwärme nutzbar machen. Beachtet werden muss, dass der COP von Wärmepumpenanlagen bei hohen Ausgangstemperaturen sinkt. Oft kann es daher sinnvoll sein, eine Wärmepumpe z. B. nur zur Anhebung der Vorlauftemperatur einzusetzen, anstatt sie am Temperaturlimit zu betreiben. Bei der Integration einer Wärmepumpe kommt auch der Planung und Auslegung der notwendigen Wärmetauscher eine große Bedeutung zu. Diese müssen einerseits geeignet sein, mit dem Abwärmemedium (in der Regel Kühlwasser) wartungs- und verschleißarm betrieben zu werden und andererseits sollte darauf geachtet werden, dass die auftretenden Übertragungsverluste minimiert werden.

3.2 Hersteller und Informationsstellen

Nur eine geringe Anzahl von Wärmepumpenherstellern bieten industrielle Großwärmepumpen (thermische Leistung $> 100 \text{ kW}_{\text{th}}$) in ihrem Portfolio.

| | | |
|--|---|--|
| Alpha-InnoTec GmbH | Industriestrasse 3 95359 Kassendorf | www.alpha-innotec.de |
| Axima Refrigeration GmbH | Kemptener Straße 11-15 88131 Lindau | www.aximaref.de |
| Climaveneta Deutschland GmbH | Oststrasse 104a 22844 Norderstedt | www.climaveneta.de |
| Combitherm GmbH | Friedrichstraße 14 70736 Fellbach | www.combitherm.de |
| Conergy Vertriebs GmbH&Co. KG (früher SPARTEC®) | Industriestraße 8 66280 Sulzbach | www.conergy.de www.spartec.de |
| Friotherm AG | Postfach 414 Zürcherstrasse 12 CH-8401 Winterthur Schweiz | www.friotherm.com/deu/index_d.htm |
| Isocal HeizKühlsysteme GmbH | Donaustrasse 12 88046 Friedrichshafen Postfach 1625 88006 Friedrichshafen | www.isocal.de |
| Kapag Kälte-Wärme AG | Schwäntenmos 6A 8126 Zumikon Schweiz | www.kapag.ch |
| KWT Kälte-Wärmetechnik AG | Hühnerhubelstrasse 79 CH-3123 Belp Schweiz | www.kwt.ch |
| Ochsner Wärmepumpen GmbH | Zweibrückenstraße 15 80331 München | www.ochsner.de |
| Robur GmbH | Donaustrasse 12 88046 Friedrichshafen | www.robur.com/home_deu.jsp |
| Waterkotte GmbH | Gewerkenstr. 15 44628 Herne Postfach 150 134 D-44613 Herne | www.waterkotte.de |
| YORK Deutschland GmbH | Johnson Controls Systems & Service GmbH Gottlieb-Daimler-Straße 8 68165 Mannheim | www.york.de |
| Zent-Frenger GmbH | Niederlassung Stuttgart Zent-Frenger Maybachstraße 7 D-71229 Leonberg | www.zent-frenger.de |

Folgende Verbände und Organisationen bieten Informationen zu industriellen Wärmepumpen an:

| | | |
|---|---|---|
| Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE) | Bismarckstraße 16 67655 Kaiserslautern Postfach 10 01 16 45001 Essen www.asue.de | Fördert die Weiterentwicklung und weitere Verbreitung sparsamer und umweltschonender Technologien auf Erdgasbasis |
| Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. (DKV) | Pfaffenwaldring 10 70569 Stuttgart www.dkv.org | Wissenschaftliche und technische Arbeiten auf dem Gebiet der Kälte-, Klima- und Wärmetechnik |
| European Heat Pump Association (EHPA) | Vorsitz: Karl Ochsner OCHSNER Wärmepumpen GmbH Zweibrückenstr. 15 D-80331 München, Germany http://ehpa.fiz-karlsruhe.de | <ul style="list-style-type: none"> • Informations- und Schulungsmaterial • Statistiken • Newsletter |
| European Heat Pump Network (EHPN) | http://ehpn.fiz-karlsruhe.de/ | Informationsplattform |
| Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH | Weidendamm 14 30167 Hannover www.fkw-hannover.de | Technologietransferzentrum zwischen Forschung und Lehre und der Industrie |
| International Energy Agency (IEA) Heat Pump Centre (HPC) | Heat Pump Centre c/o SP Technical Research Institute of Sweden PO Box 857 SE-501 15 BORÅS Sweden www.heatpumpcentre.org | <ul style="list-style-type: none"> • Berichte • Broschüren • Newsletter • Tagungen und Konferenzen • Technische Informationen |
| IZW e.V.-Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik | Welfengarten 1A 30167 Hannover www.izw-online.de | <ul style="list-style-type: none"> • Fachveranstaltungen • Zeitschrift "Wärmepumpe aktuell" • Statusberichte • Forschungsberichte • Informationsbroschüren |

4 Best-Practice-Beispiele

Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes werden ausgewählte Anwendungsfälle detailliert untersucht. Diese Analyse beinhaltet zum Beispiel die Berechnung der Wirtschaftlichkeit und der Einsparung von Endenergie, Primärenergie und CO₂-Emissionen im Vergleich zur konventionellen Wärmeversorgung.

Mit diesen detaillierten Analysen stehen aussagekräftige Informationen zur Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit industrieller Wärmepumpenanwendungen zur Verfügung. Darüber hinaus werden diese Informationen bei der Abschätzung des Potenzials für Deutschland verwendet. **Tabelle 4-1** stellt die untersuchten Beispiele in einer Übersicht dar.

Tabelle 4-1: Analytierte Best-Practice-Beispiele

| | Art | Nutzung | Wärmequelle | Bemerkung |
|----------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---|
| A | elektr. WP 90 kW _{th} | Raumwärme | Abwärme von Spritzgussmaschinen | Raumwärme Bivalenter Betrieb (Öl) 37 % WP-Anteil |
| B | elektr. WP 500 kW _{th} | Heizwärme | Maschinenabwärme (Kühlturm) | Raumwärme Bivalenter Betrieb (Gas) 68 % WP-Anteil |
| C | elektr. WP 970 kW _{th} | Klimatisierung | Produktionsabwärme | Monovalenter Betrieb Investitionsgutschrift für Wegfall Kälteanlage |
| D | Gas-WP 400 kW _{th} | Entfeuchtung / Wassererwärmung | Feuchte Luft | Bivalenter Betrieb (Gas) 66 % WP-Anteil |
| E | elektr. WP 970 kW _{th} | Beheizung | Produktionsabwärme | Raumwärme Bivalenter Betrieb (Gas) 17 % WP-Anteil |
| F | elektr. WP 324 kW _{th} | Klimatisierung | Grundwasser | Neubau Monovalenter Betrieb |
| G | elektr. WP 430 kW _{th} | Klimatisierung | Grundwasser | Neubau Bivalenter Betrieb (Gas) 51 % WP-Anteil (Heizen) |
| H | elektr. WP 430 kW _{th} | Klimatisierung | Grundwasser | Neubau Monovalenter Betrieb |

4.1 Beschreibung und technische Daten der untersuchten Anlagen

Die untersuchten Anlagen decken einen Bereich von ca. 90 kW_{th} bis ca. 970 kW_{th} hinsichtlich der durch die Wärmepumpe bereitgestellten thermischen Leistung ab. Die Anlagen wurden im Zeitraum von 1980 bis 2004 installiert. Bei den Wärmepumpen handelt es sich in sieben der acht betrachteten Fälle um elektrisch angetriebene Wärmepumpen, in Fall D handelt es sich um eine gasmotorisch angetriebene Anlage. Die Beispiele zeigen, dass im Moment die meisten der analysierten Anlagen Abwärme als Wärmequelle nutzen und sehr spezifisch auf die jeweiligen Bedingungen und Anforderungen des Unternehmens angepasst und ausgelegt sind. Die Vielzahl der Unternehmen stellt damit Raumwärme für Produktions- und Bürogebäude bereit. Ein Unternehmen nutzt Grundwasser zur Beheizung und Kühlung von zwei Hotelanlagen mit einer Heizkapazität von je 430 kW_{th}. Eine dieser Anlagen wurde 2004 in Betrieb genommen und aufgrund sehr positiver Erfahrungen wurde eine weitere Wärmepumpenanlage in einem neuen Hotelgebäude installiert und ging im Sommer 2007 in Betrieb.

Tabelle 4-2 stellt die technischen Daten der Wärmepumpenanlagen und der entsprechenden konventionellen Vergleichsanlagenkonfiguration zusammen. Vier der betrachteten Anlagen (Fall C, F, G und H) stellen sowohl Wärme als auch Kälte zur Verfügung. Der Wärmebedarf der betrachteten Anlagenkonfigurationen variiert von 32.400 kWh in Fall A bis zu 5.820.000 kWh in Fall E. Der durch die Wärmepumpenanlagen bereitgestellte Anteil reicht dabei von 17 % in Fall E bis zum monovalenten Betrieb (100 % der Nutzenergie wird durch die Wärmepumpe bereitgestellt) in den Fällen C, F und H. Der Kältebedarf der untersuchten Anlagen variiert von 65.200 kWh in Fall C bis zu 631.100 kWh in Fall G.

Der COP_{gesamt} (sowohl die durch die Wärmepumpe bereitgestellte Wärme als auch Kälte wird in die Berechnung des COP berücksichtigt) der elektrischen Wärmepumpen reicht von 3,0 in Fall E bis zu 4,6 in Fall F.

Tabelle 4-2: Technische Daten der analysierten Anlagen

| | Einheit | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----------------------------------|----------------|------------|------------|--|--------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Bedarfssituation: | | | | | | | | | |
| Wärmebedarf | [kWh] | 32.400 | 2.000.000 | 230.540 | 2.500.000 | 5.820.000 | 255.000 | 1.412.400 | 1.412.400 |
| Kältebedarf | [kWh] | - | - | 65.200 | - | - | 150.000 | 631.110 | 161.500 |
| Konventionelles System: | | | | | | | | | |
| <i>Wärmebereitstellung:</i> | | | | | | | | | |
| Typ | | Ölkessel | Gaskessel | Gaskessel | Gaskessel | Gaskessel | Gaskessel | Gaskessel | Gaskessel |
| Wirkungsgrad | [%] | 85 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| <i>Kältebereitstellung:</i> | | | | | | | | | |
| EER (energy efficiency ratio) | | - | - | 2,4 | - | - | 2,4 | 2,4 | 2,4 |
| Strombedarf | [kWh] | - | - | 27.167 | - | - | 62.500 | 262.963 | 67.292 |
| Wärmepumpe: | | | | | | | | | |
| Leistung thermisch | [kW] | 90 | 500 | 135 | 400 | 970 | 324 | 428 | 428 |
| Leistungsaufnahme | [kW] | 24 | 133 | 31 | 243 | 323 | | | |
| Typ | | elektrisch | elektrisch | elektrisch | gasmotorisch | elektrisch | elektrisch | elektrisch | elektrisch |
| COP _{gesamt} | | 3,8 | 3,8 | 4,3 | 1,6 | 3,0 | 4,6 | 4,3 | 4,0 |
| Betriebsstunden | [h] | 3.600 | 4.000 | 1.708 | 6.200 | 6.000 | 787 | 3.300 | 3.300 |
| Strombedarf/Gasbedarf | [kWh] | 86.400 | 532.000 | 68.820 | 1.506.600 | 1.940.000 | 88.500 | 473.510 | 393.475 |
| Wärmequelle | | Abwärme | Abwärme | Abwärme | feuchte Luft | Abwärme | Grundwasser | Grundwasser | Grundwasser |
| Bemerkung: | | | | Investitions- gutschrift für Kälteanlage | | | | | |

4.2 Analyse der Best-Practice-Beispiele

Um Aussagen zur Wirtschaftlichkeit und zu möglichen Einsparungen an Energie und CO₂-Emissionen machen zu können, werden die Wärmepumpenanlagen einer konventionellen Vergleichsanlage gegenübergestellt. In sieben der betrachteten Fälle wird eine gasbefeuerte Anlage mit einem Gesamtwirkungsgrad von 90 % als Referenzsystem verwendet. In Fall A dient ein ölbefeuertes Anlagensystem mit einem Gesamtwirkungsgrad von 85 % als Referenz. In den Beispielen C, F, G und H, in denen die Wärmepumpen auch Kälte bereitstellen, wird zusätzlich eine Kälteanlage mit einem EER (energy efficiency ratio) von 2,4 in das Referenzanlagensystem integriert. Da in Fall C bisher keine Kältebereitstellung realisiert war, wird eine Investitionsgutschrift für die Kälteanlage bei den Investitionskosten der Wärmepumpenanlage berücksichtigt.

Nachfolgend werden die Rahmendaten sowie die Ergebnisse der Berechnungen für den Primär- und Endenergiebedarf, den resultierenden CO₂-Emissionen sowie die Amortisationszeit und den Kosten zur Nutzenergiebereitstellung dargestellt. Für einen Anwendungsfall werden zur Sensitivitätsanalyse die Auswirkungen von Preisvariationen (Veränderung des Gas- und Strompreises), Änderung der Emissionsfaktoren sowie veränderte Wirkungsgrade (sowohl Wärmepumpenanlage als auch konventionelle Heizungsanlage) genauer analysiert und dargestellt.

4.2.1 Rahmendaten zu den Berechnungen

Für die Berechnungen wurden folgende Annahmen getroffen. Bei den Energiepreisen wurde zwischen Industriekunde und Durchschnittskunde unterschieden (vgl. **Tabelle 4-3**).

Tabelle 4-3: Energiepreise

| Preise | Öl | Gas | Strom |
|---------------------------|---------|---------|---------|
| | [€/kWh] | [€/kWh] | [€/kWh] |
| Industrie | 0,049 | 0,037 | 0,107 |
| Durchschnittskunde | 0,060 | 0,052 | 0,158 |

Quelle: destatis 2008

Bei der Berechnung der resultierenden CO₂-Emissionen wurden zwei Varianten betrachtet (vgl. **Tabelle 4-4**). Im ersten Fall wird die Wärmepumpe mit Strom betrieben, der mit Kraftwerken des Deutschland-Mix erzeugt wurde. Für industrielle Anwender wurden zusätzlich die resultierenden CO₂-Emissionen der Mittellasterzeugung berechnet.

Tabelle 4-4: CO₂-Emissionsfaktoren

| CO ₂ -Emissionsfaktor | Öl | Gas | Strom |
|----------------------------------|----------|----------|----------|
| | [kg/kWh] | [kg/kWh] | [kg/kWh] |
| Deutschland-Mix | 0,2664 | 0,2016 | 0,5760 |
| Mittellast | 0,2664 | 0,2016 | 0,7056 |

Quelle: VDEW

Um den Endenergieverbrauch primärenergetisch bewerten zu können, wurden die in **Tabelle 4-5** aufgeführten Primärenergiefaktoren verwendet.

Tabelle 4-5: Primärenergiefaktoren

| Primärenergiefaktoren | Öl | Gas | Strom |
|-----------------------|------|------|-------|
| | 1,10 | 1,10 | 2,70 |

Quelle: DIN V 18599-1

Bei der Berechnung der Kapitalkosten wird der Abschreibungszeitraum für elektrische Wärmepumpen, gasmotorische Wärmepumpen und für die notwendige Brunnenanlage (Beispiele F, G, H) gemäß der Angaben in **Tabelle 4-6** unterschieden. Dabei werden die Investitionskosten heutiger Anlagen verwendet und nicht die Investitionskosten im Jahr der Inbetriebnahme der jeweiligen Anlagen (vgl. **Abbildung 4-1** und **Abbildung 4-2**).

Tabelle 4-6: Annahmen für die Investitionsrechnung

| Annuität | Strom Wärmepumpe | Gas Wärmepumpe | Brunnenanlage |
|------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Diskontsatz | 9 % | 9 % | 9 % |
| Jahre | 20 | 15 | 50 |
| Annuitätsfaktor | 0,109546475 | 0,124058883 | 0,09122687 |

Quelle: VDI 2067 Blatt 1

Für die Investitionskosten der Wärmepumpe (siehe **Abbildung 4-1**) und die zugehörigen Installationskosten (siehe **Abbildung 4-2**) wurden in den Beispielen A bis E nachfolgende Kostentwicklungen angenommen. Für die Beispiele F, G und H lagen anlagenspezifische Investitions- und Installationskosten durch entsprechende Angebote für den jeweiligen Einzelfall vor. Bei den anderen Beispielen wurde die Entwicklung der Investitionskosten und der Installationskosten anhand von Angebotsanfragen bei Wärmepumpenherstellern und Pla-

nungsunternehmen berechnet und entsprechend der Leistung der Wärmepumpenanlage für die Untersuchung angenommen.

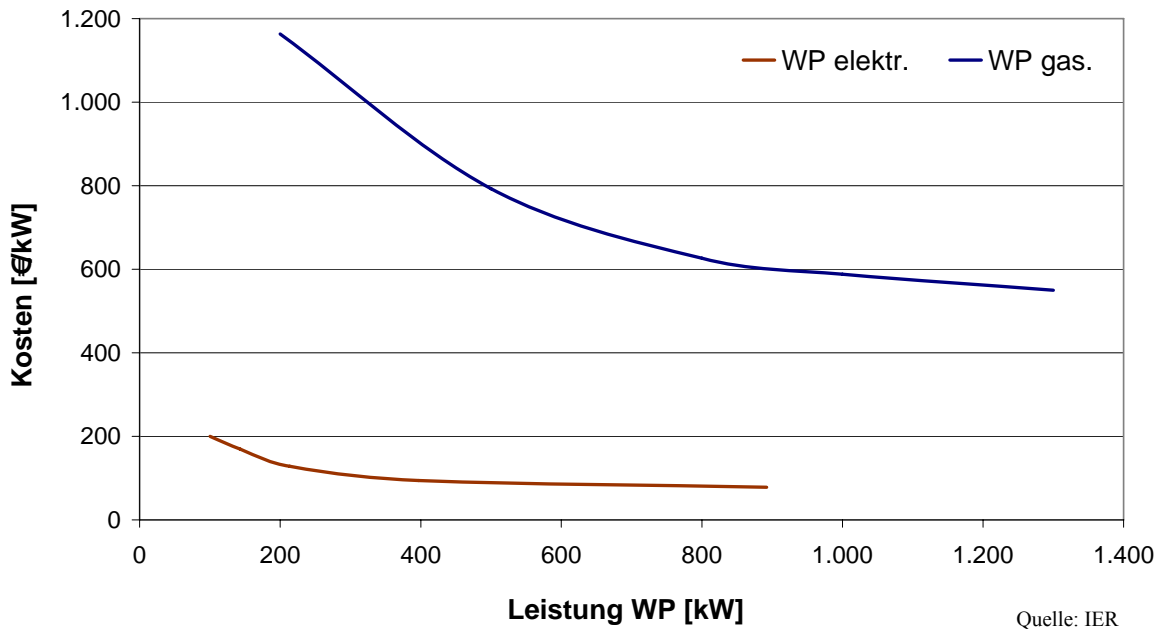


Abbildung 4-1: Investitionskosten für Wärmepumpen

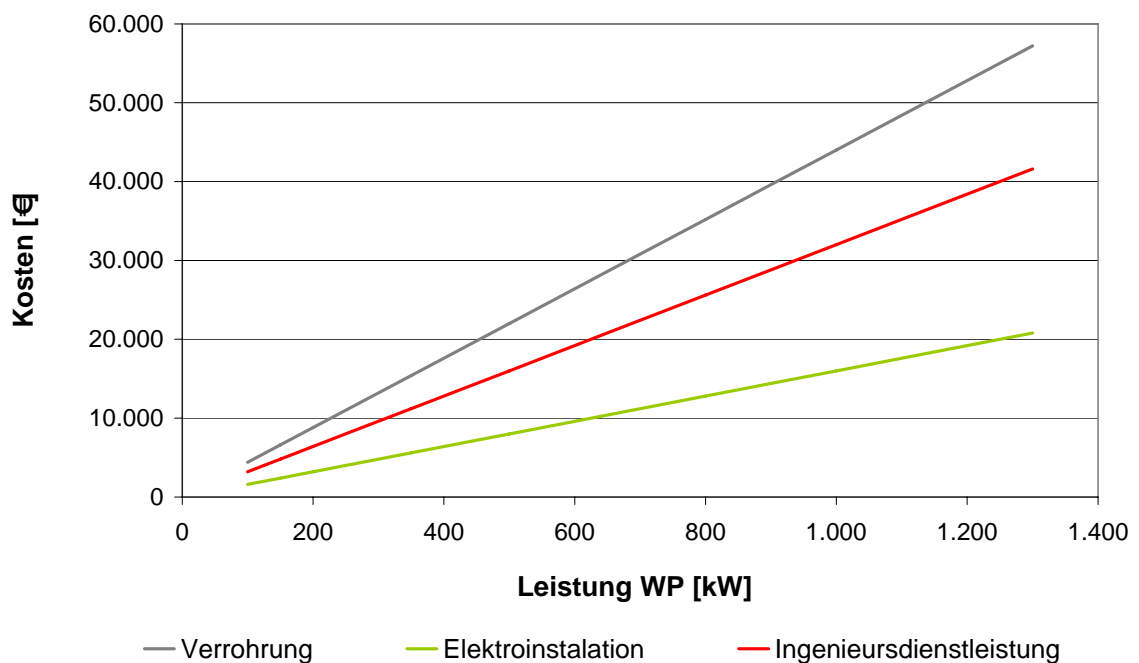


Abbildung 4-2: Installationskosten für Wärmepumpen

4.2.2 Ergebnisse des Systemvergleichs

Abbildung 4-3 stellt den notwendigen Endenergieverbrauch für die Bereitstellung der jeweiligen Nutzenergie (Wärme und in den Fällen C, F, G und H auch Kälte) mit der konventionellen Anlagenkonfiguration der Systemkonfiguration mit installierter Wärmepumpe gegenüber. Die dargestellten blauen Balken entsprechen für die konventionelle Anlage dem Endenergiebedarf, um die notwendige Nutzenergie bereitzustellen. Die grünen Balken stellen den entsprechenden Endenergiebedarf für die Bereitstellung der benötigten Nutzenergie für die Systemkonfiguration mit Wärmepumpe dar. Der Unterschied zwischen den jeweiligen Balken entspricht der resultierenden Einsparung an Endenergie pro Nutzenergie für den Einsatz der Wärmepumpe. Die möglichen Einsparungen an Endenergie variieren von 13 % im Fall E bis zu 79 % im Fall H. Im Mittel ist bei den betrachteten Wärmepumpenanlagen eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um 49 % möglich. Die Beispiele C, F und H mit dem geringsten resultierenden Endenergieverbrauch sind gleichzeitig auch die Wärmepumpenanlagen, welche zur Bereitstellung von Wärme und Kälte eingesetzt werden können.

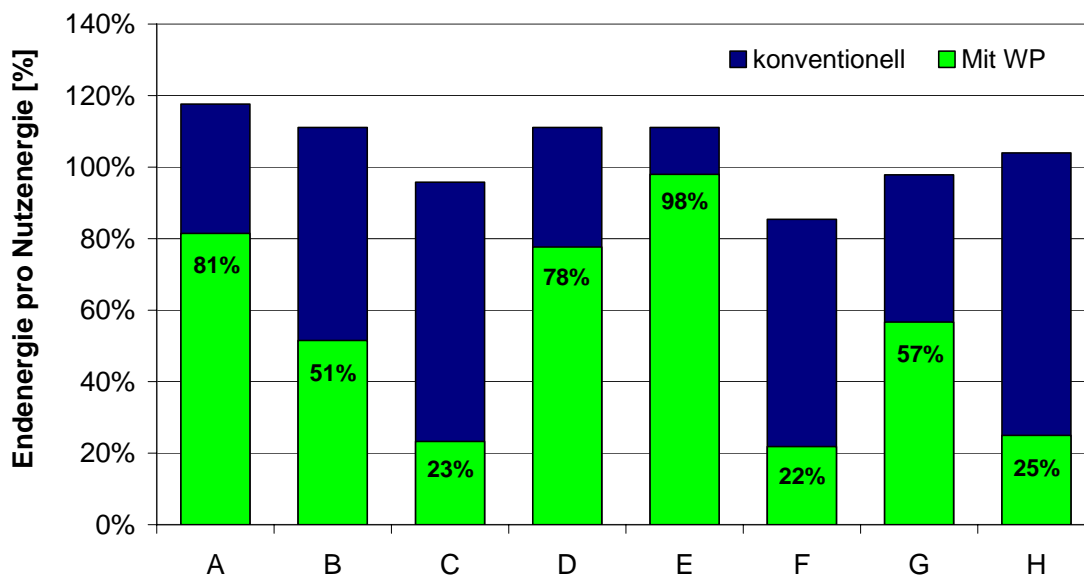


Abbildung 4-3: Vergleich des Endenergieverbrauchs pro Nutzenergiebereitstellung

Abbildung 4-4 vergleicht entsprechend der **Abbildung 4-3** die benötigte Primärenergie zur Bereitstellung der jeweiligen Nutzenergie für die acht Beispiele. Die möglichen Einsparungen an Primärenergie liegen im Mittel bei 38 % und variieren von 5 % in Fall E bis zu 59 % in Fall F. Die größten Einsparungen werden bei den Anlagen C, F und H realisiert. Dies kann darauf zurück geführt werden, dass diese Anlagen sowohl zur Wärme- als auch Kältebereitstellung eingesetzt werden. Im Fall E wird mit ca. 5 % die geringste Einsparung erzielt. Dies resultiert aus dem sehr geringen Deckungsanteil der Wärmepumpe. Diese stellt nur 17 % des gesamten Wärmebedarfs zur Verfügung.

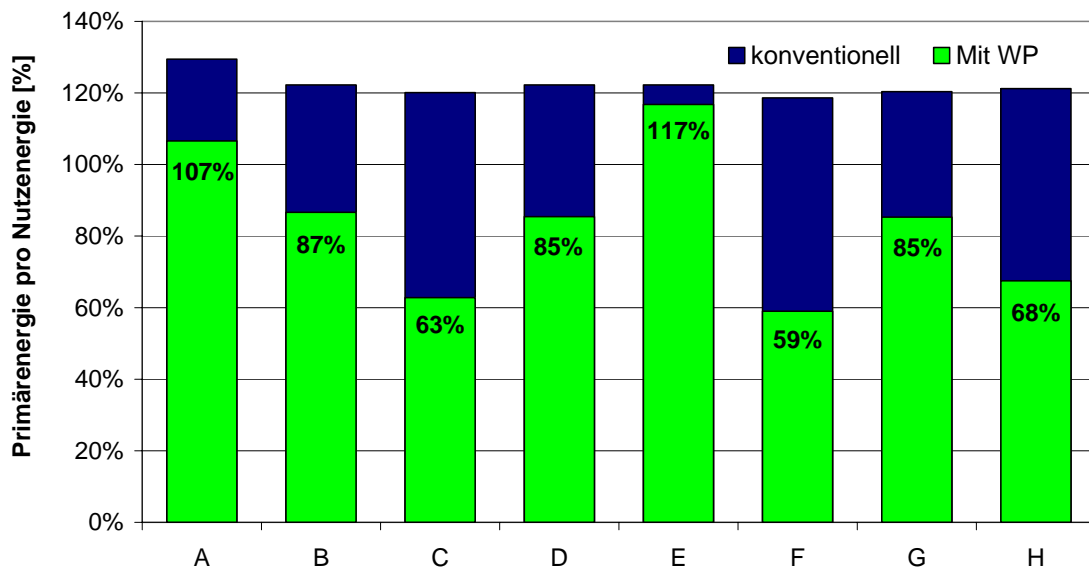


Abbildung 4-4: Vergleich des Primärenergieverbrauchs pro Nutzenergiebereitstellung

Abbildung 4-5 zeigt für die acht verschiedenen Wärmepumpensysteme die verbleibenden CO₂-Emissionen pro Jahr nach Installation einer Wärmepumpe im Vergleich.

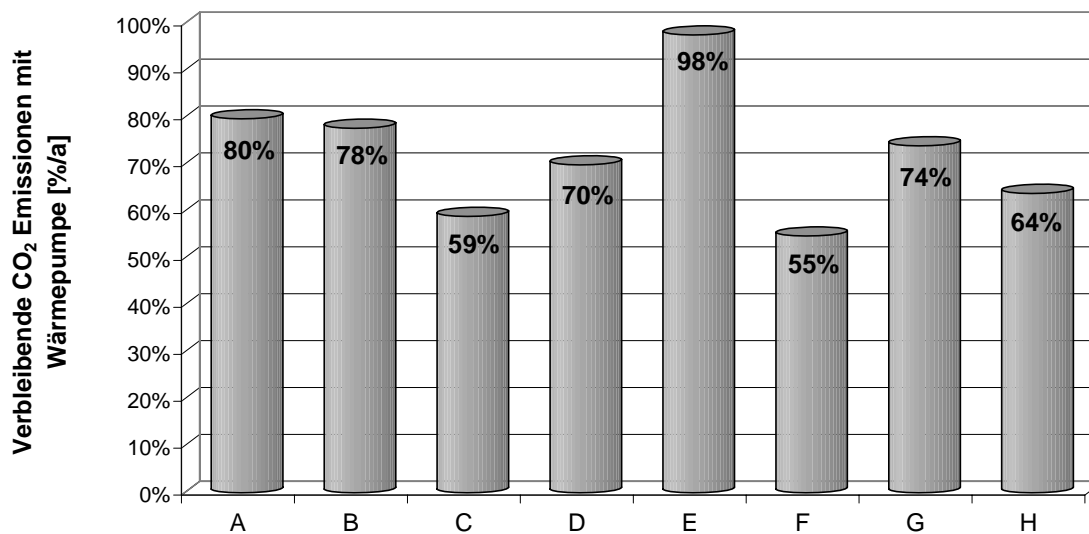


Abbildung 4-5: CO₂-Emissionen nach Installation der Wärmepumpenanlage im Gesamtsystem (Emissionsfaktor Strom: Deutschland-Mix)

Dabei entspricht 100 % der zuvor installierten Systemkonfiguration mit Wärmeproduktion durch Gaskessel (Ausnahme A, Ölkessel). Die angegebenen Prozentwerte sind die resultierenden CO₂-Emissionen, welche durch die neue Systemkonfiguration mit einer installierten industriellen Wärmepumpe verursacht werden. Betrachtet man die CO₂-Emissionen der Wärmepumpe zur Bereitstellung der entsprechenden Nutzenergie im Vergleich zu den dafür bisher notwendigen CO₂-Emissionen in der konventionellen Systemkonfiguration, so

erhält man Einsparungen von 2 % bis ca. 45 % (Mittelwert 32 %). Die größte Einsparung wird mit 45 % in Fall F erzielt, da es sich dabei um die effizienteste Anlage ($\text{COP}_{\text{gesamt}} = 4,6$) handelt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Einsparung an CO_2 -Emissionen stark von der korrekten Integration einer Wärmepumpe in das bestehende System und insbesondere dem Anteil der Wärmepumpe an der Wärmeproduktion abhängt. Zudem ist die mögliche Reduktion an CO_2 -Emissionen auch vom realisierbaren COP, der Effizienz der Wärmepumpenanlage sowie, im bivalenten Betrieb, vom Energieträger des konventionellen Systems (Gas bzw. in Fall A Öl) abhängig.

Neben den ökologischen Aspekten spielen bei Wärmepumpenanlagen auch ökonomische Aspekte eine wichtige Rolle. Die **Abbildung 4-6** stellt die statischen Amortisationszeiten der acht Beispiele im Vergleich dar. Es ergeben sich unter der Annahme der Energiepreise für Industriekunden (vgl. **Tabelle 4-3**) sowie den jeweiligen Investitionskosten der Anlagen (vgl. **Abbildung 4-1** und **Abbildung 4-2**) Amortisationszeiten von 1,5 Jahren in Fall G bis zu 6,7 Jahren in Fall D.

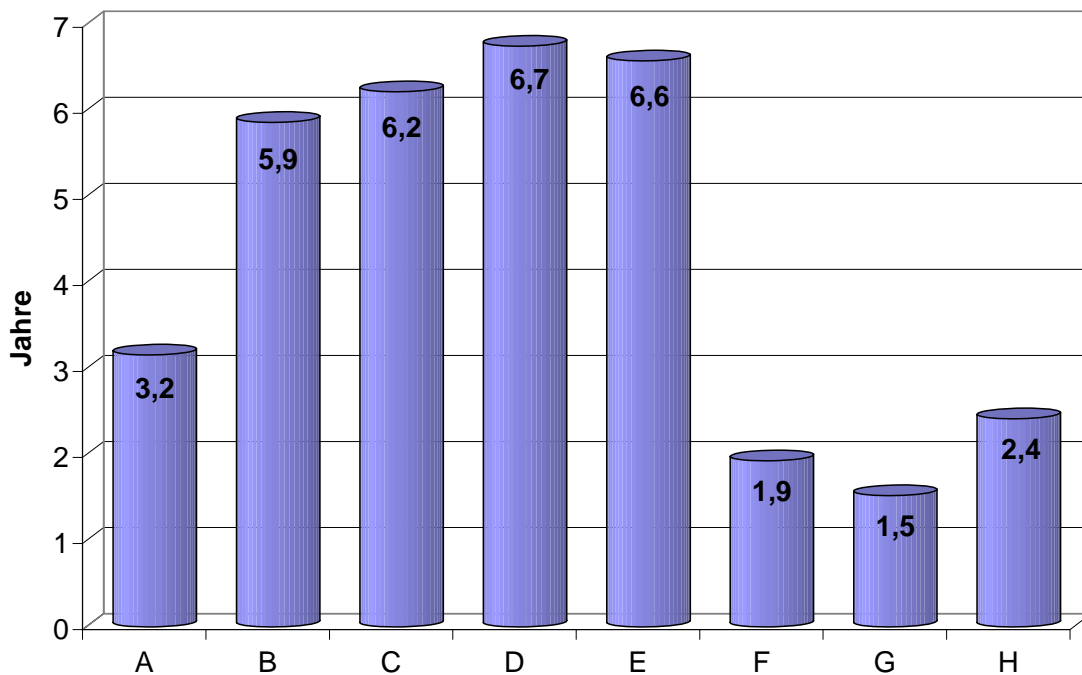


Abbildung 4-6: Übersicht der statischen Amortisationszeiten (Industriepreise)

Ein weiterer Vergleich hinsichtlich der ökonomischen Unterschiede von Energiebereitstellungsanlagen stellen die Nutzenergiebereitstellungskosten dar. In **Abbildung 4-7** sind die Kosten in Cent zur Bereitstellung einer kWh an Nutzenergie für den konventionellen Fall und der Anlagenkonfiguration mit Wärmepumpe einander gegenübergestellt. Auch hier sind die entsprechenden Energiepreise für Industriekunden Grundlage und die Kapitalkosten der Investition für die Wärmepumpenanlage (vgl. **Abbildung 4-1** und **Abbildung 4-2**) sind ebenfalls eingerechnet. Es wird deutlich, dass die Anlagenkonfigurationen mit Wärmepumpen in

allen Beispielen günstigere Nutzenergiebereitstellungskosten aufweist. Die Unterschiede belaufen sich auf 0,03 Cent/kWh im Fall E bis zu 1,45 Cent/kWh im Fall F.

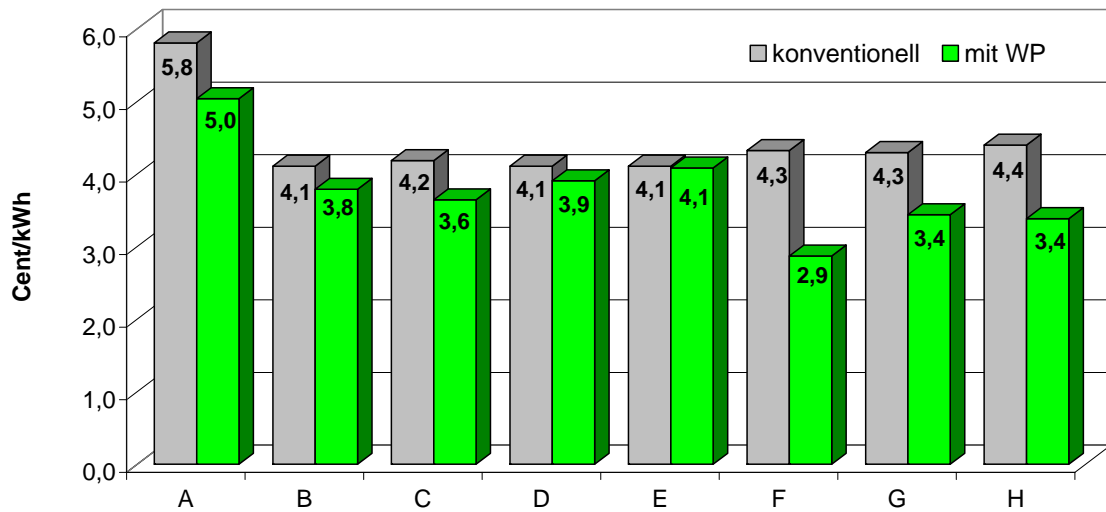


Abbildung 4-7: Vergleich der Nutzenergiebereitstellungskosten (Industriepreise)

In den folgenden Abbildungen ist der relative Endenergieverbrauch (**Abbildung 4-8**), Primärenergieverbrauch (**Abbildung 4-9**) und die relativen CO₂-Emissionen (**Abbildung 4-10**) der Wärmepumpenanlagen im Vergleich zur konventionellen Bereitstellung der entsprechenden Nutzenergie dargestellt. In diesen Abbildungen entspricht 100 % dem Energieverbrauch bzw. den CO₂-Emissionen, die eine konventionelle Anlage benötigt bzw. emittieren würde, um den entsprechenden Anteil an Nutzenergie bereitzustellen. In diesen Abbildungen wird daher nicht das Gesamtsystem betrachtet und es werden somit die Einsparungen an Endenergie, Primärenergie und CO₂-Emissionen durch den Einsatz einer Wärmepumpe deutlich. Beim Endenergieverbrauch ergeben sich Einsparungen von 76 % im Fall B bis zu über 45 % im Fall D (im Mittel 71 %). Auch in der primärenergetischen Betrachtung zeigen sich die Vorteile der Wärmepumpenanlagen. Hier reichen die möglichen Einsparungen an Primärenergie von ca. 26 % bis ca. 50 % bei einem Mittelwert von 43 %. Bei den resultierenden CO₂-Emissionen ergeben sich entsprechend Einsparungen von ca. 14 % bis ca. 48 % bei einer durchschnittlichen CO₂-Emissionsreduktion von 38 %. Die geringsten Einsparungen im Vergleich der untersuchten Beispiele werden im Beispiel E realisiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Wärmepumpe mit 3,0 den kleinsten COP der elektrisch betriebenen Wärmepumpen aufweist.

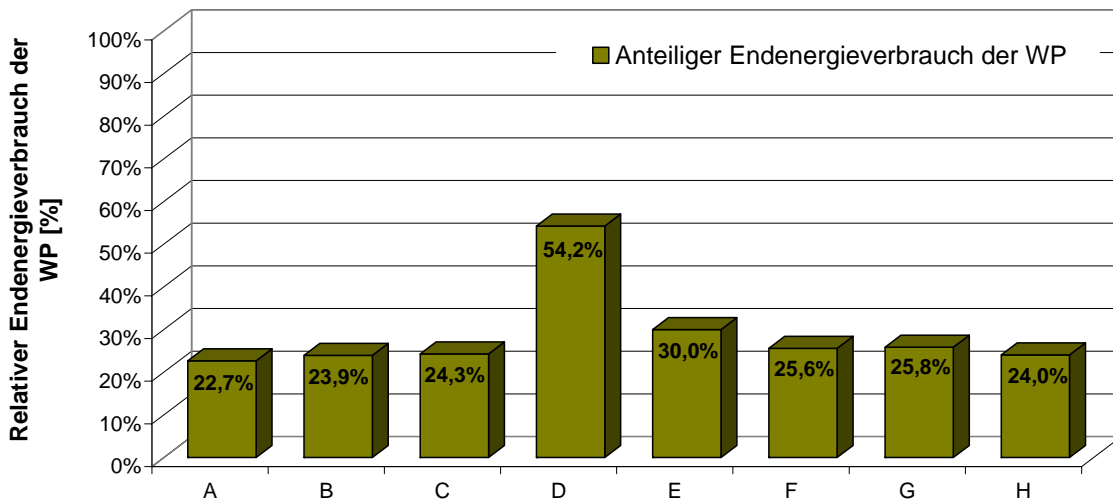


Abbildung 4-8: Relativer Endenergieverbrauch der Wärmepumpenanlage

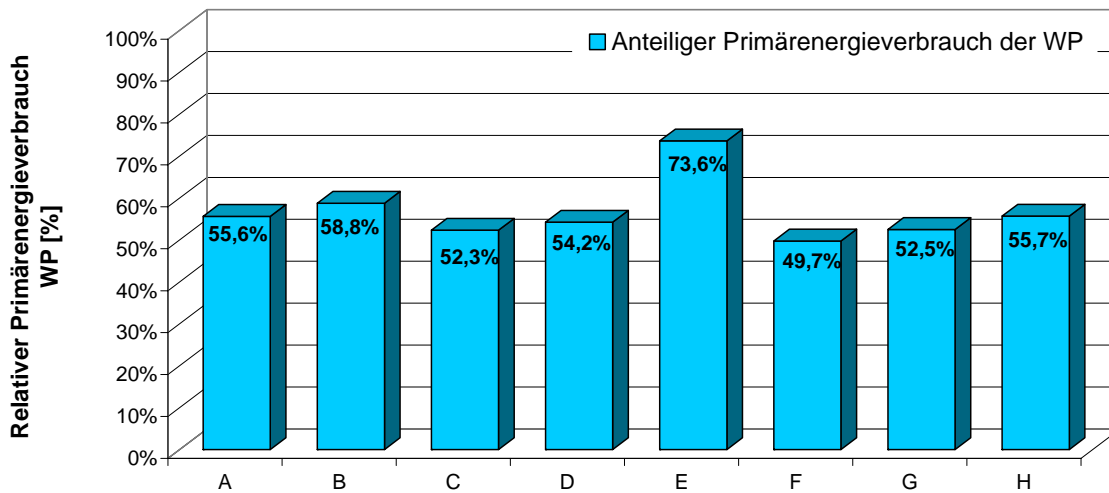


Abbildung 4-9: Relativer Primärenergieverbrauch der Wärmepumpenanlage

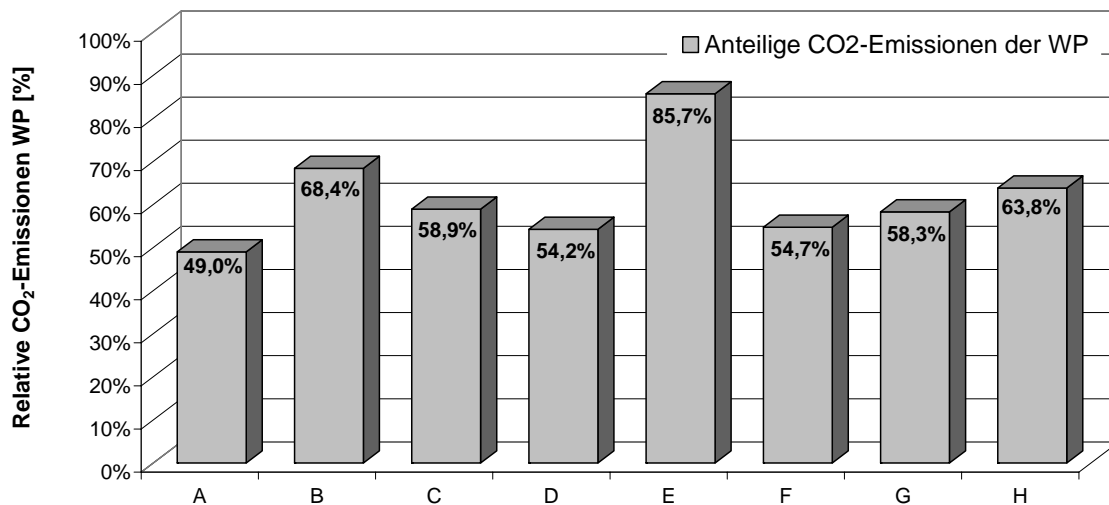


Abbildung 4-10: Relative CO₂-Emissionen der Wärmepumpenanlage

4.3 Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden für den Anwendungsfall C (Gesamtsystem) die Auswirkungen von Preisvariationen, Änderungen der Emissionsfaktoren sowie veränderter Wirkungsgrade genauer analysiert und dargestellt. Bei den Preisen wird nach Durchschnittskunde und Industriekunde unterschieden. Die Emissionsfaktoren für Strom werden für den Strom-Mix Deutschland und für entsprechende Werte für die Bereitstellung von Strom aus dem Bereich der Mittellast variiert. Die Berechnungen für unterschiedliche Wirkungsgrade des konventionellen Systems dienen zur Abschätzung der Auswirkungen einer Verbesserung der Effizienz der in der Regel bereits bestehenden konventionellen Anlage im Vergleich zur Wärmepumpenanlage. Bei der ausgewählten Anlagenkonfiguration handelt es sich um eine elektrische Wärmepumpe (135 kW thermisch), die sowohl Wärme als auch Kälte bereitstellen kann.

Abbildung 4-11 stellt die möglichen Kosteneinsparungen beim Einsatz einer Wärmepumpe in Relation zum COP der Wärmepumpe und dem Wirkungsgrad des konventionellen Vergleichsystems dar (Kosten: Industriepreise, vgl. **Tabelle 4-3**). Bei dieser Betrachtung sind die Kapitalkosten der Investition ebenfalls berücksichtigt. Wird als konventionelle Anlage ein in diesem Fall gasbetriebener Kessel mit einem Wirkungsgrad von 90 % (blaue Linie) mit der Anlagenkonfiguration mit Wärmepumpe verglichen, so muss die Wärmepumpe einen COP von ca. 3,5 oder größer aufweisen, damit eine Kosteneinsparung möglich wird. Werden für die Energiepreise die Werte für Durchschnittskunden (vgl. **Tabelle 4-3**) angenommen (siehe **Abbildung 4-12**), so würde eine Wärmepumpenanlage mit einem COP von 3,3 bereits mit einem geringen Kostenvorteil betrieben werden können.

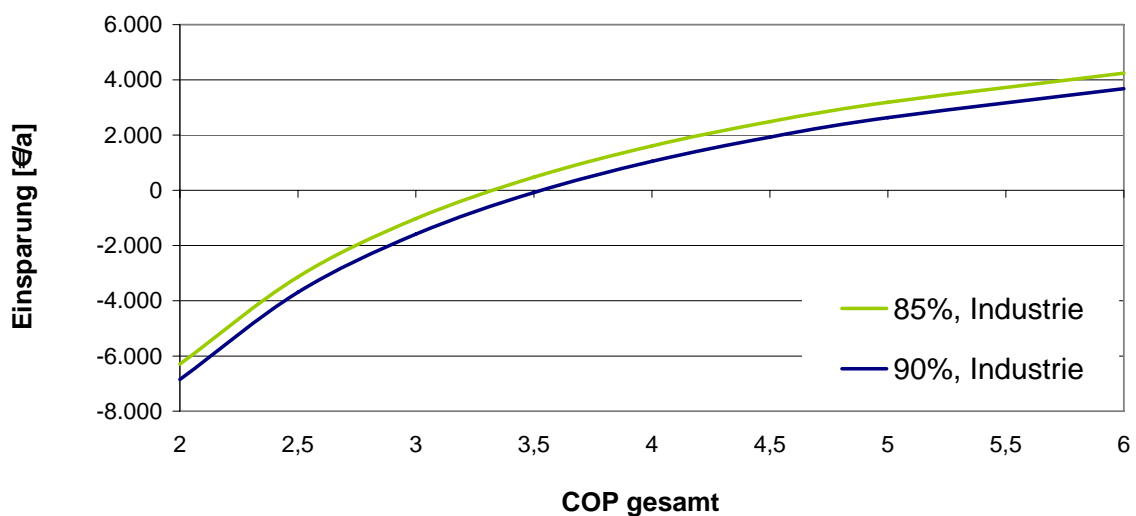


Abbildung 4-11: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall C

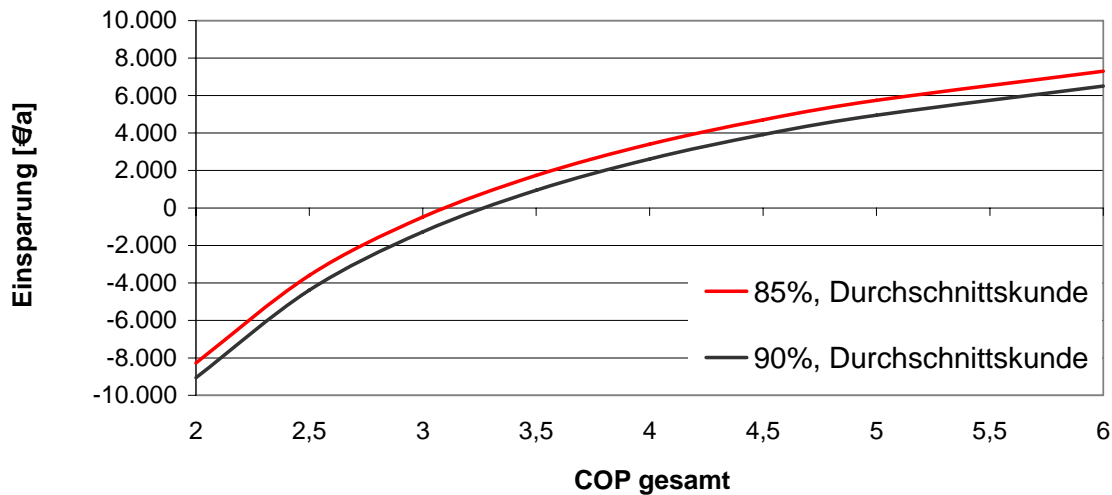


Abbildung 4-12: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall C

Eine ähnliche Berechnung ist in **Abbildung 4-13** (CO₂-Emissionsfaktoren „Deutschland-Mix“ und „Mittellast-Mix“ vgl. **Tabelle 4-4**) für die resultierenden CO₂-Emissionen dargestellt. Bei den CO₂-Emissionen führt der Einsatz einer Wärmepumpe mit einem COP von größer 2,5 bereits zu einer Reduktion an Emissionen im Vergleich zu einem konventionellen Gaskessel mit einem Wirkungsgrad von 90 % (Emissionsfaktoren Deutschland-Mix). Werden hingegen die CO₂-Emissionsfaktoren für den „Mittellast-Mix“ angenommen, so resultiert für den Einsatz einer Wärmepumpe mit einem COP von 2,5 gegenüber dem konventionellen System mit einem Wirkungsgrad von 90 % bereits eine Erhöhung der CO₂-Emissionen von über 10 Tonnen pro Jahr. Um trotzdem eine Reduktion an CO₂-Emissionen zu erreichen, muss dann die Wärmepumpe mindestens mit einem COP von 3 betrieben werden.

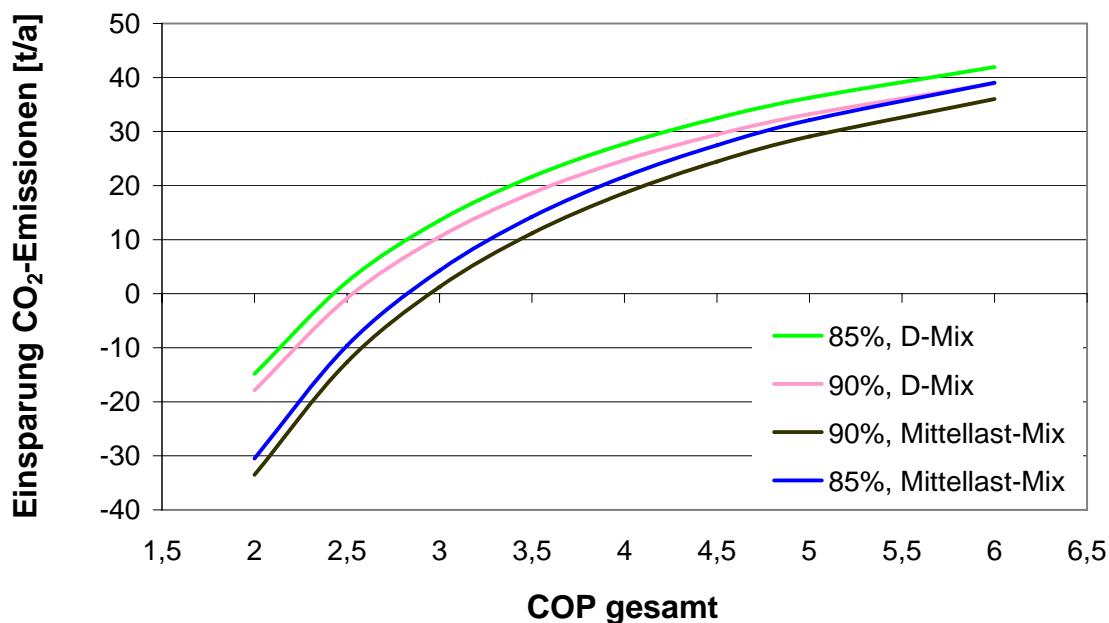


Abbildung 4-13: Einsparungen an CO₂-Emissionen in Relation zum COP (Mittellast-Mix) - Fall C

Um die Auswirkungen sich ändernder Energiepreise auf die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpenanlage zu untersuchen, werden Berechnungen mit Preisvariationen durchgeführt. Ausgehend von den Energiepreisen für Industriekunden (vgl. **Tabelle 4-3**) wurden Preisänderungen um - 80 % bis + 80 % sowohl für Gas als auch für Strom angenommen. Im Folgenden sind die daraus resultierenden Amortisationszeiten (vgl. **Abbildung 4-14**) und Differenzen in den Nutzenergiebereitstellungskosten (vgl. **Abbildung 4-15**) dargestellt. Werden keine Preisänderungen angenommen, so ergibt sich für den Fall C, wie in **Abbildung 4-6** bereits dargestellt, eine Amortisationszeit von 6,2 Jahren. Für den ausgewählten Fall C wird ersichtlich, dass die Amortisationszeit, auch bei der für die elektrisch betriebene Wärmepumpe vorteilhaftesten Preissituation (Strompreis - 80 %, Gaspreis + 80 %) im Vergleich zum konventionellen System mit Gaskessel minimal 1,5 Jahre betragen kann. Wird keine Änderung des Gaspreises angenommen (Schnitt mit der X-Achse), so ergibt sich eine minimale Amortisationszeit von 2,9 Jahren bei einer Reduktion des Strompreises um 80 %. Eine Amortisationszeit von unter 4 Jahren ergibt sich entsprechend bei gleichbleibendem Gaspreis bei einer Reduktion des Strompreises um 40 %.

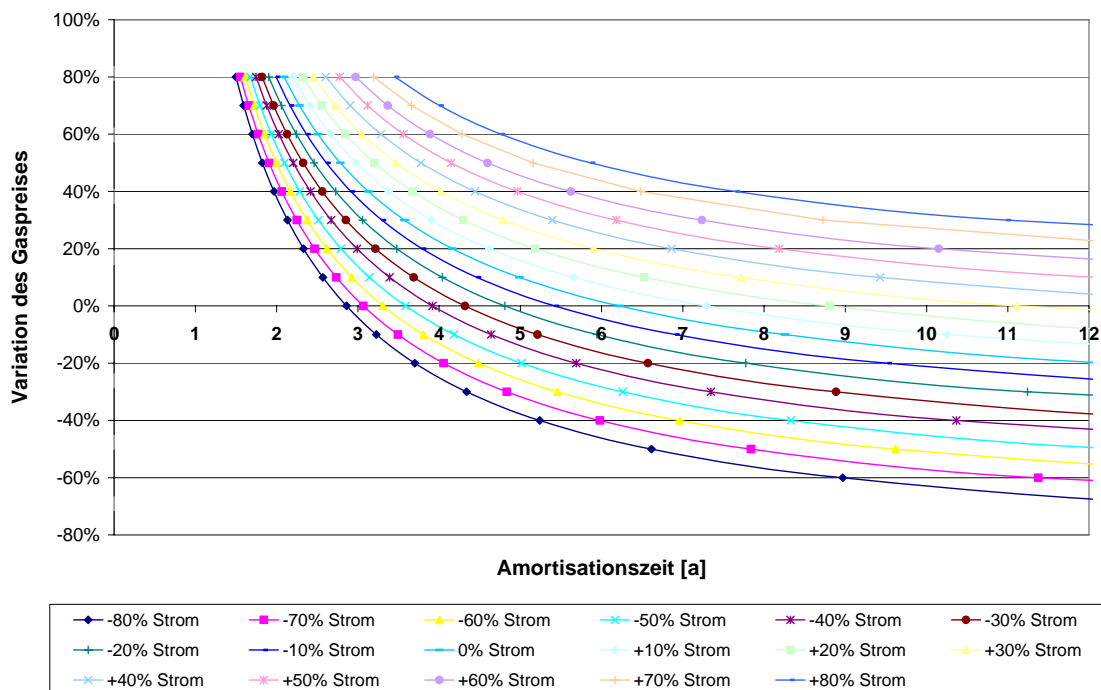


Abbildung 4-14: Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis - Fall C

Die Nutzenergiebereitstellungskosten sind diejenigen Kosten, welche zur Bereitstellung einer kWh an Nutzenergie (in diesem Fall Wärme und Kälte) aufgewendet werden müssen. Dabei ist auch der Kapitaldienst für die Investitionskosten der Wärmepumpenanlage berücksichtigt. So lange die dargestellten Werte positiv sind, ist die Bereitstellung durch die Wärmepumpenanlage günstiger. Aus **Abbildung 4-15** kann somit abgeleitet werden, dass bei unveränderten Energieträgerpreisen (d. h. Schnittpunkt der Linie 0 % Strom mit der X-

Achse), eine kWh durch eine Wärmepumpenanlage um 0,5 Cent günstiger bereits gestellt werden kann. Bei gleichbleibendem Gaspreis kann in diesem Beispiel der Strompreis noch um 20 % steigen, bevor die Bereitstellungskosten für Nutzenergie durch die Wärmepumpenanlage höher werden, als durch eine entsprechende konventionell betriebene Anlage. Wenn jedoch der Strompreis um 80 % ansteigt, muss der Gaspreis gleichzeitig um über 36 % steigen, damit die Wärmepumpenanlage die Nutzenergie kostengünstiger bereitstellen kann.

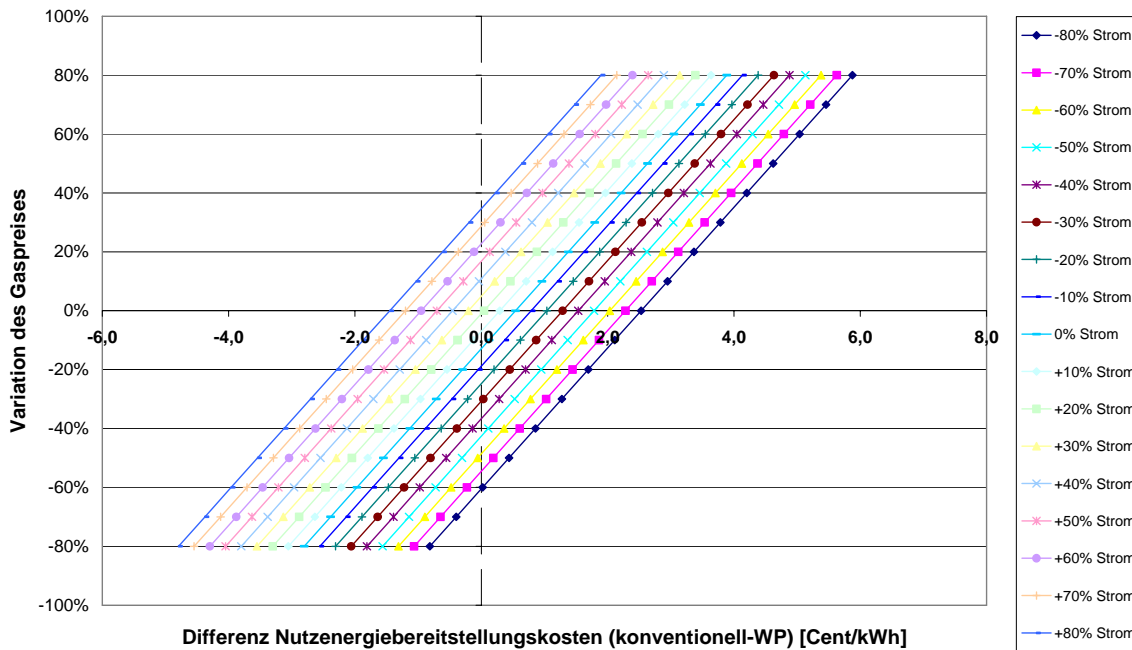


Abbildung 4-15: Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell - WP) [Cent/kWh] - Fall C

Die entsprechenden Betrachtungen für die Fälle A, B und D bis H sind im Anhang dargestellt. Insgesamt lässt sich für die analysierten Anlagen feststellen, dass die elektrisch angetriebenen Wärmepumpenanlagen (außer Fall D) im Vergleich zu einem konventionellen Anlagensystem kostengünstiger betrieben werden können, wenn sie eine COP von mindestens 3,5 (konventionelle Anlage mit Gesamtwirkungsgrad von 90 %) bzw. 3.3 (konventionelle Anlage mit Gesamtwirkungsgrad von 85 %) aufweisen (Grundlage: Industriepreise, vgl. **Tabelle 4-3**). Bei den CO₂-Emissionen werden bereits Einsparungen durch die Wärmepumpenanlage ermöglicht, wenn diese mit einem COP von 2,7 (konventionelle Anlage mit Gesamtwirkungsgrad von 90 %) bzw. 2,5 (konventionelle Anlage mit Gesamtwirkungsgrad von 85 %) betrieben wird (Grundlage Stromemissionsfaktor D-Mix, vgl. **Tabelle 4-4**).

5 Hemmnisanalyse

Da der Wärmepumpeneinsatz in Industrie und Gewerbe in Deutschland im Vergleich beispielsweise zu Großbritannien, USA, Spanien, Japan, China, Dänemark, Australien und Norwegen eher gering ist (vgl. /Heidelck et al. 2000/ und /Wirtschaftsministerium BW 2005/), kommt im Rahmen der Untersuchung der Analyse der Hemmnisse bezüglich einer weiteren Verbreitung der Wärmepumpentechnik und der Ableitung von Möglichkeiten zu deren Abbau eine besondere Bedeutung zu.

Um die Relevanz dieser Hemmnisse empirisch zu erfassen und zu bewerten, werden insbesondere die Aussagen von Herstellern im Rahmen der Marktanalyse und die Erfahrungen von Industrieunternehmen im Rahmen der Best-Practice-Beispiele ausgewertet. Daneben werden Gespräche mit Experten und Verbänden durchgeführt. Weiterhin wird untersucht, in wieweit Energieversorger, z. B. durch Informationsbereitstellung, zum Abbau der Hemmnisse beitragen können.

Die durchgeführte Analyse zeigt, dass einige wichtige Hemmnisse der weiteren Verbreitung von Wärmepumpen im industriellen Bereich entgegenstehen. Bei den technisch bedingten Hemmnissen ist vor allem das bisher für viele Anwendungen zu geringe realisierbare Temperaturniveau der aktuellen Wärmepumpen (ca. 75 °C) zu nennen. In einigen im Rahmen des Forschungsprojektes betrachteten Unternehmen konnten Wärmepumpen aufgrund des geforderten Temperaturniveaus nicht sinnvoll eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür stellt ein Waschprozess im Automobilbereich dar. Bei dieser Anwendung werden große Mengen an Waschwasser auf einem bestimmten, hohen Temperaturniveau benötigt, um die Qualität der Produktion sicherzustellen. Anlagentechnisch bedingt liegt dabei die geforderte Temperatur bei ca. 80 °C, um auf der Seite der Waschanlage eine Temperatur von 65 °C sicherstellen zu können. Auch die Nutzung der Abwärme zur Bereitstellung von Raumwärme scheitert bei bestehenden Industriegebäuden häufig an der zu geringen realisierbaren Vorlauftemperatur durch Wärmepumpenanlagen. Aus dem Kontakt mit Unternehmen wurde deutlich, dass im industriellen Bereich weniger das Problem der fehlenden nutzbaren Abwärme vorherrscht, als eine sinnvolle Verwendung der realisierbaren Nutzwärme.

Bei bestehenden Anlagen konkurrieren Wärmepumpenanlagen mit bereits installierten Wärmeversorgungssystemen, die darüber hinaus in der Lage sind, Wärme auch auf höherem Temperaturniveau (z. B. Dampf) bereitzustellen. Ebenso kommt es in vielen Fällen zu Konkurrenzsituationen mit konventionellen Wärmerückgewinnungstechnologien, die im Regelfall kostengünstiger realisiert werden können. Des Weiteren ist die Integration einer Wärmepumpenanlage in ein bestehendes System aufwändig und kostenintensiv. Ebenso muss die Auslegung einer Wärmepumpe aufgrund der sehr unterschiedlichen Anforderungen im industriellen Bereich oft prozessspezifisch erfolgen und standardisierte Vorgehensweisen und Verfahren können nur in geringem Maße angewendet werden. Da eine Wärmepumpe nur ein be-

stimmtes Temperaturniveau darstellen kann, muss der Wärmepumpenkreislauf vom bestehenden Wärmeerzeugungssystem getrennt installiert werden und bei der Nutzung von Abwärme als Wärmequelle muss das Risiko der Produktionssicherheit berücksichtigt werden. Bei kritischen Prozessen führt dies zur Notwendigkeit, die entsprechende Wärmemenge zusätzlich auch durch andere Erzeugungsanlagen bereitstellen zu können.

Neben den technisch bedingten Hemmnissen kommt den, im Vergleich zu konkurrierenden konventionellen Versorgungstechnologien, hohen Investitionskosten von Wärmepumpenanlagen im Moment eine große Bedeutung zu. Aufgrund der häufig individuellen und prozessspezifischen Planung von Wärmepumpenanlagen resultierenden höheren Investitionskosten im Vergleich zu konventionellen Technologien. Bei der wirtschaftlichen Betrachtung von Anlagenalternativen kommt es dadurch zu höheren Amortisationszeiten bei Wärmepumpenanlagen im Vergleich zu konventionellen Anlagensystemen. Bei industriellen Prozessen liegt die geforderte Amortisationszeit jedoch bei ≤ 2 Jahren, was ein sehr bedeutendes Hindernis für Wärmepumpen darstellt. Einige Unternehmen unterscheiden bei Investitionen jedoch zwischen „Prozess“ und „Gebäude“. Findet eine Investition im Bereich „Gebäude“ statt, so liegt die geforderte Amortisationszeit bei ca. 6 bis 8 Jahren. In größeren Unternehmen fallen Investitionsentscheidungen oft getrennt von der Betrachtung der resultierenden Betriebskosten bzw. diese spielen oft eine sehr untergeordnete Rolle, da die Finanzmittel aus unterschiedlichen Bereichen zur Verfügung gestellt werden. Eine ausführliche Berechnung der Kosten über den gesamten Nutzungszeitraum wird häufig nicht durchgeführt.

Bei den Gesprächen mit Verbänden und Unternehmen wurde deutlich, dass ein großer Informations- und Erfahrungsdefizit bezüglich der Einsatzmöglichkeiten von Wärmepumpen im industriellen Bereich besteht. Der Wärmepumpenmarkt leidet heutzutage unter Informations-, Wahrnehmungs- und Erfahrungsmangel sowohl bei Endkunden als auch bei Installateuren und Ingenieuren. Diese Know-how-Defizite und die geringe Markttransparenz verstärken somit die Neigung zu traditionellen Technologien. Informationen über potenzielle Anwendungsbereiche, notwendige Voraussetzungen und Randbedingungen des Wärmepumpeneinsatzes sind für potenzielle Anwender nicht verfügbar. Auch die Informationen und Darstellung der Produktpaletten von Herstellern sind für Außenstehende schwer verständlich.

Nachfolgend werden die meistgenannten Hemmnisse nochmals zusammengefasst:

- Realisierbares Temperaturniveau für viele Anwendungen bislang zu gering
- Geforderte Amortisationszeit ≤ 2 bis 4 Jahre
- Konkurrierende Technologien zur Abdeckung höherer Temperaturbereiche bereits installiert
- Prozessspezifische Auslegung notwendig
- Fehlendes Wissen hinsichtlich Prozesstechnologien und der Wärmepumpentechnik in der Industrie, bei Beratungsfirmen, Versorgungsunternehmen, etc.

Informationsbroschüren, gemeinsame Informationsplattformen von Herstellern oder auch Informationsveranstaltungen (siehe Symposium) sind Möglichkeiten, das Wissen über die Einsatzmöglichkeiten von Wärmepumpen in der Industrie zu verbessern. Die Zusammenarbeit von Wärmepumpen- und Komponentenherstellern zur Informationsbereitstellung z. B. Lebenszykluskosten aber auch zur Bündelung von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten könnte die Standardisierung der Komponenten und die Weiterentwicklung der Technik voranbringen. Dadurch könnten bestehende Investitionskostennachteile (im Vergleich zu konventionellen Technologien) sowie zeit- und kostenintensive Planungs- und Auslegungsarbeiten verringert werden.

6 Identifikation potenzieller Einsatzmöglichkeiten

Zur Identifikation potenzieller Einsatzmöglichkeiten für Wärmepumpenanlagen in Industrie und Gewerbe werden auf der Basis der IEA Studie „Industrial Heat Pumps“ /IEA 1995/ die dargestellten Anwendungsfälle auf die Rahmenbedingungen und Prozesse in der deutschen Industrie übertragen. Zudem werden durch die Auswertung von vorhandenen Branchenanalysen zu Nutztemperaturniveaus und möglichen Wärmequellen weitere potenzielle Anwendungsfelder identifiziert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Nutzung von Abwärme als Wärmequelle und der Kombination von Wärme- und Kälteprozessen. Hieraus werden besonders relevante Anwendungsfälle für Industrie und Gewerbe abgeleitet (siehe z. B. **Tabelle 6-1**). Die potenziellen Hauptanwendungsfälle von industriellen Wärmepumpen in Deutschland werden durch eine prozessspezifische Analyse von Industriebranchen identifiziert.

Bei der prozessspezifischen Wärmebedarfsanalyse wird der Wärmebedarf industrieller Verbraucher separat für die einzelnen, im Betriebsablauf implementierten Arbeitsschritte ermittelt. Die Höhe des Wärmebedarfs wird dabei von der Art und der zu erwärmenden Stoffmenge, der oberen und unteren Prozesstemperatur sowie vom eingesetzten Verfahren definiert. Die Art des zu erwärmenden Stoffs kann durch die stoffspezifische Wärmekapazität c_p repräsentiert werden. Des Weiteren spielt auch der prozessspezifische thermische Leistungsbedarf eine wichtige Rolle bei der Dimensionierung von Wärmeerzeugungsanlagen. Der Leistungsbedarf kann aus dem Wärmebedarf und der zeitlichen Ausdehnung des Prozessschritts in Form der jährlichen Vollbenutzungsstunden berechnet werden. Durch die Addition aller betrieblichen Einzelprozesse kann der Gesamtwärmebedarf bestimmt werden. Dabei ist zum einen zu berücksichtigen, dass der Wärmebedarf i. d. R. auf verschiedenen Temperaturniveaus anfällt und die vorgesehene Wärmequelle in der Lage sein muss, auch die höchste auftretende Temperatur bereit zu stellen. Zum anderen besteht die Möglichkeit, anfallende Abwärme eines Prozesses auf einem geringeren Temperaturniveau betriebsintern für einen anderen Prozess zu nutzen, wodurch sich der Nettowärmebedarf des Betriebs entsprechend verringert.

Ein Beispiel für die prozessspezifische Wärmebedarfsanalyse stellt die Würzkekochung in Brauereien dar. Dabei wird Maische ($c_p = 4,19 \text{ kJ/kgK}$) von $T_u = 73 \text{ °C}$ auf $T_o = 100 \text{ °C}$ erwärmt. Der Effizienzfaktor des Arbeitsschritts Würzkekochung beträgt $x = 2,66$. Der Wärmebedarf des Arbeitsschritts kann multiplikativ gemäß (6-1) ermittelt werden:

$$q = x \cdot c_p \cdot (T_o - T_u) \quad (6-1)$$

Den absoluten Wärmebedarf des Arbeitsschritts erhält man durch die Multiplikation des spezifischen Wärmebedarfs mit der Jahresproduktionsmenge m , wie in (6-2) dargestellt.

$$Q = m \cdot q \quad (6-2)$$

Bei einer Jahresproduktion von 200.000 hl_{Bier} entsprechend 20.000 t_{Bier}/a ergibt sich für den Verfahrensschritt Würzekochung ein Wärmebedarf von 302 MJ/a. Durch den Einsatz einer Brüdenverdichtungsanlage kann ein Teil der Abwärme der Würzekochung zurück gewonnen werden. Diese Wärmemenge wird in einem Speicher konserviert und beim Prozessschritt Maischen eingesetzt. Der Wärmebedarf des Maischens sinkt dann auf 61 MJ_h/t, der Effizienzfaktor des Maischeprozesses verbessert sich auf $x_{\text{Maischen}} = 1,64$. Diese und weitere Beispiele für prozessspezifische Wärmebedarfe sind mit ihren Rahmendaten in **Tabelle 6-1** dargestellt.

Tabelle 6-1: Prozessspezifische Beispiele für Anwendungsfälle

| Industrie | Branche | Prozess | Temperatur [°C] | Spezifischer Wärmebedarf [MJ/t] |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|---------------------------------|
| Ernährung | Brauerei | Maischen | 78 | 61 |
| | Brauerei | Flaschenreinigung | 80 | 54 |
| | Brauerei | Faßreinigung | 80 | 25 |
| | Brauerei | Würze kochen | 100 | 302 |
| Papier und Zellstoff | Papier | Altpapierrecycling | 45 | 252 |
| | Papier | Trocknungsprozesse | 100 | 3.960-6.840 |
| | Papier | Veredelung (Streichen) | 60 | 29 |
| Chemie | Grundstoffherstellung | Chlorgewinnung | 100 | 270 / 1.620 |
| | Kunststoffproduktion | PVC Produktion | 100 | 18 |
| | Kunststoffproduktion | Polypropylenerzeugung | 50 | 43 |
| Baumaterialherstellung | Ziegelherstellung | Homogenisieren | 80 | 14 |
| Holz | Holz | Trocknung | 70-105 | 900 |
| Metallbearbeitung | Fahrzeugbau | Reinigung von Bauteilen | 60 | 4.460 |
| | Fahrzeugbau | Entfetten von Bauteilen | 60 | 5.231 |

Aussichtsreiche Branchen stellen z. B. die Ernährungsindustrie, die chemische Industrie, die Kunststoffwarenindustrie, die Papierindustrie oder die Kfz-Herstellung dar. Bei der Papierherstellung sind zum Beispiel Trocknungsprozesse sowie der Veredelungsprozess Streichen für den Einsatz von Wärmepumpen interessant. Die aus der Mischung der einzelnen Bestandteile (v. a. Zellstoff, Holzstoff, Faserstoffe, chemische Zusätze, Altpapier) im Wasserbad entstehenden Papierbahnen müssen vor der Aufwicklung auf Rollen getrocknet werden. Dies geschieht durch Wärmezufuhr bei 100 °C. Der spezifische Wärmebedarf be-

trägt zwischen 3.960 und 6.840 MJ/t Produkt (differiert leicht in Abhängigkeit von der Papiersorte). Zur Veredelung der erzeugten Papiermengen kommt unter anderem das Streichverfahren zum Einsatz, bei dem eine auf 60 °C erwärmte Beschichtung (Lack) auf die Papierbahn aufgetragen wird. Dabei beträgt der Wärmebedarf ungefähr 29 MJ/t Produkt. In der Ernährungsindustrie sind im Bereich der Brauereien zum Beispiel die Prozesse Maischebereitung, Würzebereitung sowie die Reinigung von Flaschen interessant. Bei der Maischebereitung wird, wie bereits erwähnt, das Brauwasser von 11 °C auf 78 °C erwärmt und mit Malz vermischt. Dabei werden ca. 61 MJ pro Tonne Produkt Nutzwärme auf einem Temperaturniveau von 78 °C benötigt. Die Würzebereitung umfasst die Erwärmung der Maische von 73 °C (bei einer Abkühlung der Maische um 5 K durch Verluste) auf 100 °C und das Kochen der vermischten Bierbestandteile (Wasser, Hefe, Malz, Hopfen) bei 100 °C. Da die Würze überwiegend aus Wasser besteht, wird mit einer spezifischen Wärmekapazität von 4,19 kJ/kg*K gerechnet. Der Wärmebedarf der Würzebereitung ergibt sich somit zu 302 MJ/t Produkt. Vor dem Abfüllen des Produkts in die Mehrwegflaschen müssen diese gespült werden. Hierzu wird 80 °C heißes Wasser eingesetzt. Daraus resultiert ein spezifischer Wärmebedarf von 54 MJ/t.

Basierend auf den untersuchten potenziellen Einsatzbereichen wird in Kapitel 7 das technische Potenzial für Wärmepumpen in der Industrie in Deutschland bestimmt und für ausgewählte Branchen dargestellt. Des Weiteren werden für einzelne besonders relevante Branchen die Potenziale genauer untersucht und beschrieben.

7 Potenziale für industrielle Wärmepumpen in Deutschland

Ausgehend vom Energieverbrauch einzelner Wirtschaftszweige nach dem jeweiligen Nutztemperaturniveau und den in Abschnitt 6 identifizierten Einsatzmöglichkeiten wird in einem weiteren Arbeitsschritt das technisch erschließbare Potenzial für den Einsatz von Wärmepumpenanlagen in Industrie und Gewerbe in Deutschland abgeschätzt. Dabei werden die eingesparte Primärenergie und CO₂-Emissionen auf Basis der in Abschnitt 4 untersuchten Wärmepumpenanlagen ermittelt. Außerdem wurde diese Untersuchung auch für unterschiedliche Betriebsgrößenklassen innerhalb der Branchen durchgeführt, um Unterschiede z. B. in der Fertigungsstruktur und in den Energiepreisen berücksichtigen zu können.

7.1 Gesamtpotenzial in der deutschen Industrie

Die durchgeführte Analyse zeigt, dass in Deutschland im Bereich der Brauchwasserbereitstellung in der Industrie ca. 14,56 PJ pro Jahr durch Wärmepumpen bereitgestellt werden könnten. Für den Bereich der Raumwärme und für die Niedertemperatur-Prozesswärme wird das Potenzial für drei verschiedene Stufen hinsichtlich des darstellbaren Temperaturniveaus von Wärmepumpen berechnet (70 °C, 80 °C und 100 °C). Mit der aktuell zur Verfügung stehenden Wärmepumpentechnologie könnten 55,13 PJ Prozesswärme auf einem Temperaturniveau von 70 °C durch Wärmepumpen bereitgestellt werden (vgl. **Abbildung 7-1**).

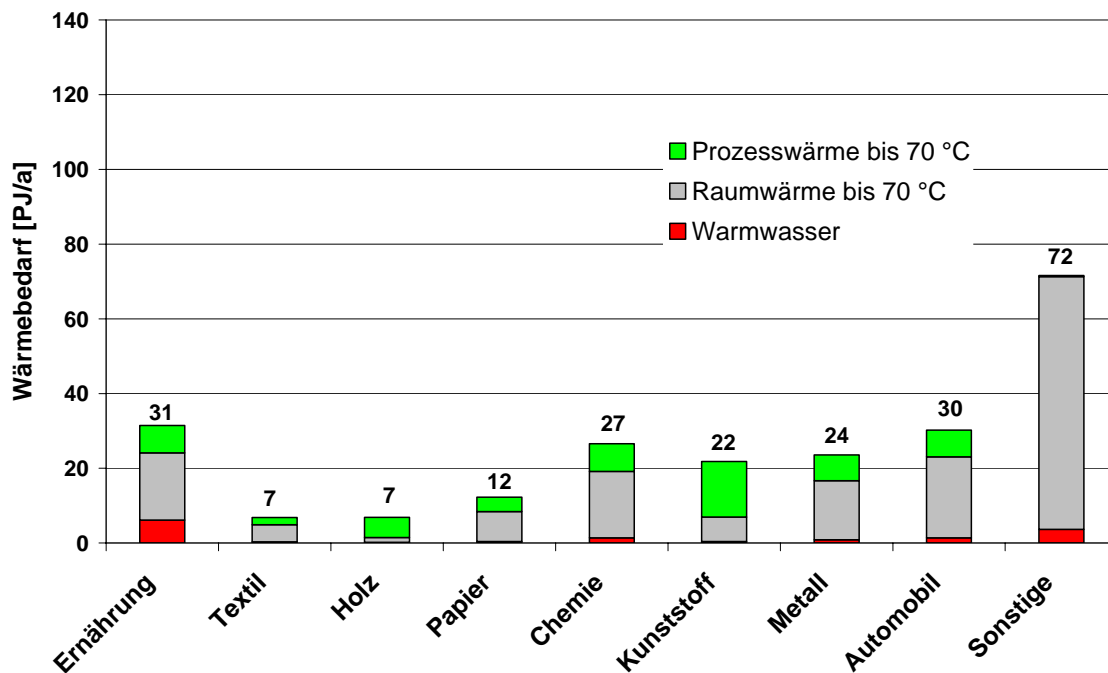


Abbildung 7-1: Potenzial zur Wärmebereitstellung für ausgewählte Branchen bis 70 °C

Mit der aktuellen Technologie (Temperaturniveau 70 °C) ergibt sich somit in der deutschen Industrie ein Potenzial von 231,06 PJ/a, welche durch Wärmepumpen zur Verfügung gestellt werden könnten.

Falls das Temperaturniveau auf 80 °C angehoben werden kann, steigt das Potenzial um weitere 10,56 PJ pro Jahr an (vgl. **Abbildung 7-2**).

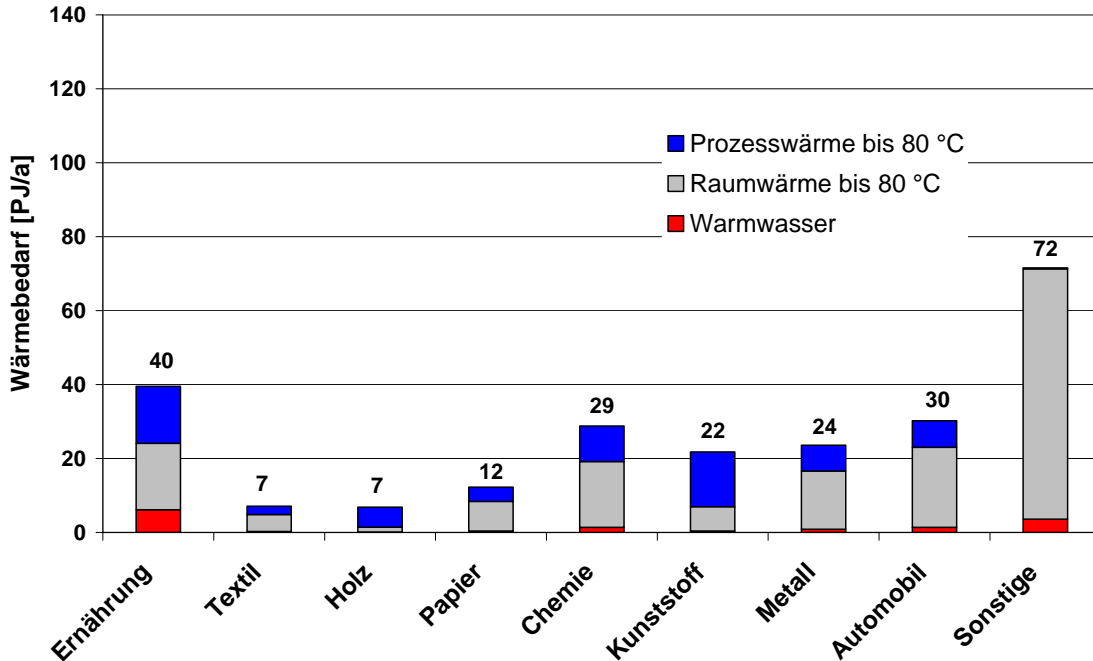


Abbildung 7-2: Potenzial zur Wärmebereitstellung für ausgewählte Branchen bis 80 °C

Aus einer Anhebung des Temperaturniveaus auf 100 °C würde ein Zuwachs von ca. 147,91 PJ pro Jahr resultieren. **Abbildung 7-3** zeigt das Potenzial zur Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen bis zu einer Temperatur von 100 °C aufgeschlüsselt nach ausgewählten Branchen.

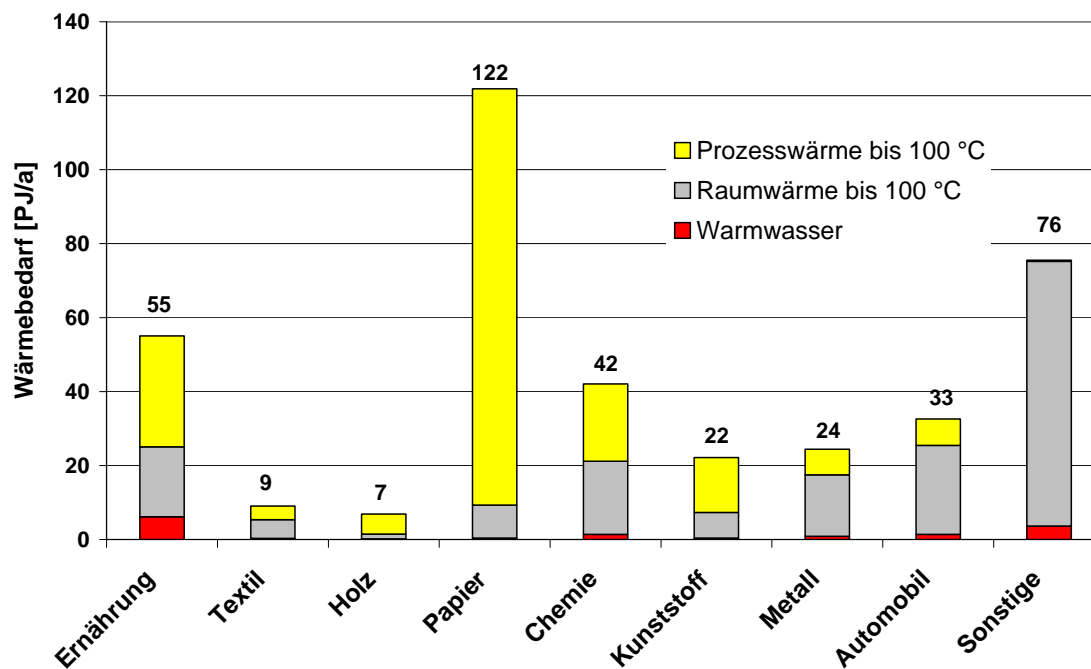


Abbildung 7-3: Potenzial zur Wärmebereitstellung für ausgewählte Branchen bis 100 °C

Dieser deutliche Anstieg des technischen Potenzials unterstreicht die Bedeutung der Weiterentwicklung der aktuellen Wärmepumpentechnologie, um die darstellbare Temperatur von 70 °C auf 100 °C anheben zu können. In den Branchen Ernährung und Chemie zum Beispiel würde bereits ab einer Ausgangstemperatur von 80 °C ein großer Anteil durch Wärmepumpen abgedeckt werden können. Bei einer Erhöhung auf 100 °C könnte sogar der Großteil des Nutzwärmebedarfs des Papiergewerbes durch Wärmepumpenanlagen zur Verfügung gestellt werden.

Hinsichtlich des technischen Einsparpotenzials lässt sich zusammenfassend feststellen, dass Wärmepumpen (Ausgangstemperatur 100 °C) die Möglichkeit bieten, in Deutschland ca. 389,53 PJ Nutzwärme pro Jahr zur Verfügung zu stellen. Dies entspricht ca. 15 % des gesamten Energiebedarfs und ca. 30 % des Nutzwärmebedarfs der deutschen Industrie im Jahr 2006. Bisher wird jedoch nur ein sehr geringer Anteil dieses Potenzials genutzt. Hinsichtlich der CO₂-Emissionen wäre dadurch eine Einsparung von ca. 6,34 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr möglich. Dies entspricht 6,2 % der gesamten CO₂-Emissionen der deutschen Industrie im Jahr 2005.

Neben dem technischen Potenzial ist vor allem das wirtschaftlich realisierbare und somit wirtschaftliche Potenzial von Interesse. Eine aussagekräftige Abschätzung dieses wirtschaftlichen Potenzials vorzunehmen ist jedoch sehr schwierig. Betrachtet man das technische Potenzial von 231,06 PJ/a, welches mit aktueller Wärmepumpentechnologie darstellbar ist, d. h. ein Temperaturniveau von maximal 70 °C, so kann aus dem Kontakt mit Wärmepumpenherstellern aber vor allem mit Betreibern und potenziellen Anwendern angenommen werden, dass die Integration einer Wärmepumpenanlage in ein Heizungssystem für bestehen-

de Gebäude und Prozesse aufgrund der hohen Kosten für die Integration nur in wenigen Fällen durchgeführt wird. Im Bereich der Raumwärmebereitstellung wird oft das Argument der zu hohen Vorlauftemperaturen der bestehenden Heizungsanlage als Hindernisgrund angegeben. Im Bereich der Prozesstechnik ist eine Integration in einen bestehenden Prozess, mit der möglichen Gefahr einer Produktionsunterbrechung kaum denkbar. Man kann daher feststellen, dass im Bereich der Brauchwasser- und Raumwärmebereitstellung (technisches Potenzial 175,93 PJ/a bei einer Ausgangstemperatur von 70 °C) hauptsächlich Neubauten in Frage kommen.

Für den Gebäudebereich wurde die Erfahrung gemacht, dass hinsichtlich der geforderten Amortisationszeiten auch höhere Werte in Frage kommen. Im Bereich der Prozesstechnik jedoch spielen im Moment die Investitionskosten eine bedeutende Rolle und es werden oft Amortisationszeiten von 1 ½ bis 2 Jahre gefordert. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Einsatz von Wärmepumpenanlage in der Prozesstechnik mit aktueller Wärmepumpentechnik eine noch geringe Rolle spielen wird. Neben den Investitionskosten und den daraus resultierenden Amortisationszeiten stellt beim Einsatz von Wärmepumpen in der Prozesstechnik vor allem das für viele Anwendungen noch zu geringe Temperaturniveau ein großes Hemmnis dar. Gerade hinsichtlich der Erhöhung der darstellbaren Ausgangstemperatur von industriellen Wärmepumpen ergibt sich großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Wie die Analyse des technischen Potenzials zeigt, ergeben sich bei möglichen Temperaturen von 100 °C weitere große Potenziale für den Einsatz von Wärmepumpen. Neben diesem technischen Potenzial kommt der Nutzung von Abwärme eine große Bedeutung zu. Im industriellen Bereich werden große Mengen an Abwärme über Kühltürme und Rückkühlwerke kostenintensiv „vernichtet“. Die Verwendungsmöglichkeit von Abwärme wird auch durch die dargestellten Best-Practice-Beispiele deutlich, da die Hälfte dieser Anlagen bereits industrielle Abwärme nutzt. Welche technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen für eine umfassende Nutzung von Abwärme aus industriellen Anlagen eingehalten werden müssen, kann im Moment noch nicht gesagt werden. Hierin liegt ein weiterer Bedarf an Analysen und beispielhaften Projekten zur Umsetzung.

7.2 Einzelanalysen für ausgewählte Branchen

Im Folgenden werden anhand ausgewählter Beispiele konkrete Einsatzmöglichkeiten für Wärmepumpen in industriellen Anwendungen aufgezeigt und deren technische Potenziale abgeschätzt. Der Fokus bei der Auswahl geeigneter Anwendungsmöglichkeiten liegt auf der Nutzung sowohl der erzeugten Wärme- als auch der erzeugten Kältemengen, da sich für diesen Fall i. a. die höchste Effizienz von Wärmepumpen ergibt. Zusätzlich wird für die Bestimmung der technischen Einsatzpotenziale eine installierbare Mindestleistung von 100 kW_{th} als Größenkriterium herangezogen.

Bei den betrachteten Beispielen handelt es sich um die Galvanik- und die Kunststoffverarbeitenden Betriebe in Deutschland. Die Rahmendaten des jeweiligen, prozessspezifischen Abwärmeaufkommens und Kühlbedarfs sowie die daraus resultierenden technischen Einsatzpotenziale von Großwärmepumpen sind in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

7.2.1 Galvanische Industrie

Die galvanische Industrie als Schnittstelle zwischen Metall- und Chemieindustrie beschäftigt sich mit der elektrolytischen Beschichtung von Metallen. Die aufgetragenen Beschichtungen, meist im μm -Bereich, dienen v. a. dem Korrosionsschutz (z. B. die Verzinkung von Blechen). Bei der galvanischen Beschichtung wird das Werkstück in eine Elektrolytlösung eingelegt. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen Werkstoff und einer Elektrode aus dem Beschichtungsmaterial wandern Ionen aus dem Elektrodenwerkstoff zum Werkstück und lagern sich an der Oberfläche ab. Die Badtemperatur muss konstant auf $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ gehalten werden. Durch den permanenten Stromfluss und den auftretenden elektrischen Widerständen wird dem Bad laufend Wärme zugeführt, die durch eine Kühlanlage wieder aus dem System entfernt werden muss. Gleichzeitig müssen die Werkstücke vor und nach der Beschichtung entfettet bzw. gereinigt und anschließend jeweils mit warmer Luft getrocknet werden.

Die Wärmepumpe kann einerseits zur Kühlung des Galvanikbades eingesetzt werden und gleichzeitig den Trocknungsprozessen die dem Bad entnommene Wärme zur Verfügung stellen. Das Verfahrensschema des Galvanikprozesses unter Einbeziehung einer Wärmepumpe ist in einer vereinfachten Darstellung in **Abbildung 7-4** aufgeführt.

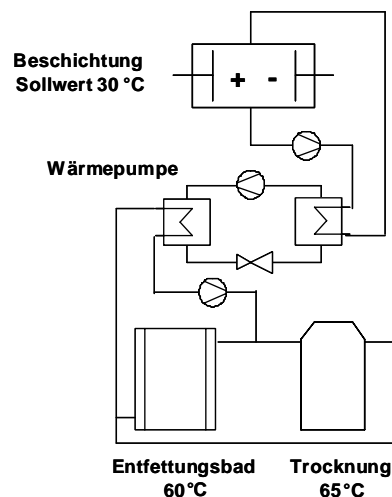


Abbildung 7-4: Schematische Darstellung des Wärmepumpeneinsatzes in einem Galvanikbetrieb (stark vereinfachte Darstellung)

Die typischen Prozesse bei der Galvanisierung umfassen die Entfettung, Trocknung und Beschichtung der Metalle. Der genaue energetische Aufwand insbesondere des Beschichtungsprozesses ist vom verwendeten Material und der aufzubringenden Beschichtungsstärke abhängig.

Die durchschnittlichen Werte der Rahmendaten der Wärmebilanz der Galvanisierung sind in **Tabelle 7-1** zusammengefasst. Dabei sind freiwerdende Wärmemengen mit einem negativen Vorzeichen gekennzeichnet.

Tabelle 7-1: Wärmespezifische Rahmendaten der Einzelprozesse der Galvanisierung

| Prozess | Temperatur | Spez. Wärmeeinfall/-bedarf |
|-------------|------------|--|
| | [°C] | [kWh _{th} /t _{Produkt}] |
| Entfetten | 60 | 173 |
| Beschichten | 30 | -319 |
| Trocknen | 65 | 166 |

Die spezifische rückgewinnbare Wärmemenge beträgt im Durchschnitt ca. 319 kWh_{th}/t_{Produkt}. Bei einer jährlichen Produktionsmenge von ca. 1,7 Millionen Tonnen in Deutschland ergibt sich daraus eine rückgewinnbare Gesamtmenge von 543 GWh_{th}/a. Hieraus ergibt sich ein technisches Einsatzpotenzial von Wärmepumpen von 233 MW_{th}.

Die deutsche Galvanikindustrie umfasst etwa 800 Betriebe mit jeweils über 20 Mitarbeitern. Insgesamt werden ca. 44.000 Mitarbeiter beschäftigt. Die durchschnittliche Betriebsgröße beträgt etwa 55 Mitarbeiter. Über die genaue Größenstruktur der Branche existieren keine verlässlichen Angaben, da u. a. sich ein Teil der Betriebe zur Metallindustrie, der andere Teil zur Chemieindustrie zählt. Der durchschnittliche Abwärmeeinfall pro Betrieb beträgt etwa 679 MWh_{th}/a, entsprechend einem durchschnittlichen Wärmepumpenpotenzial von 291 kW_{th}/Betrieb. Damit wäre der Einsatz einer industriellen Großwärmepumpe, deren Leistungsgröße bei 100 kW_{th} beginnt, ab einer Betriebsgröße von etwa 30 Mitarbeitern denkbar, die für ca. 500 Betriebe in Deutschland gegeben ist.

7.2.2 Kunststoffverarbeitung

In Deutschland werden jährlich knapp 15 Millionen Tonnen Kunststoffe verarbeitet. Der unbearbeitete Kunststoff wird in Granulatform aus dem Chemiewerk in die rund 1.800 Betriebe der Kunststoffverarbeitung geliefert. Das Granulat wird zunächst getrocknet, um bei den späteren Endprodukten Wassereinschlüsse und Schrumpfungen zu vermeiden. Anschließend gelangt das getrocknete Granulat in eine Plastifizier- und Formgebungseinheit, bspw. einen Spritzgussextruder oder eine Blasformanlage. In der Plastifiziereinheit wird das Granulat zunächst erhitzt und aufgeschmolzen, danach in eine Form gepresst und bis zur Erstarrung dort

belassen. Das noch heiße Werkstück wird ausgeworfen und in eine Abkühlstufe gebracht. Durch den Einsatz einer Wärmepumpe kann die in der Kühlstufe vom Werkstück abgegebene Wärme an die Granulattrocknungsanlage weitergereicht werden. Da zusätzlich auch in der Plastifiziereinheit große Wärmemengen frei werden, die nur über eine Wasserkühlung abgeführt werden können, kann die von der Wärmepumpe nutzbar gemachte Wärmemenge durch die Verbindung von Kühlwasser- und Wärmepumpenkreislauf weiter erhöht werden. Der prinzipielle Ablauf der Kunststoffverarbeitung unter Integration einer Wärmepumpe ist in einer vereinfachten Form in **Abbildung 7-5** dargestellt.

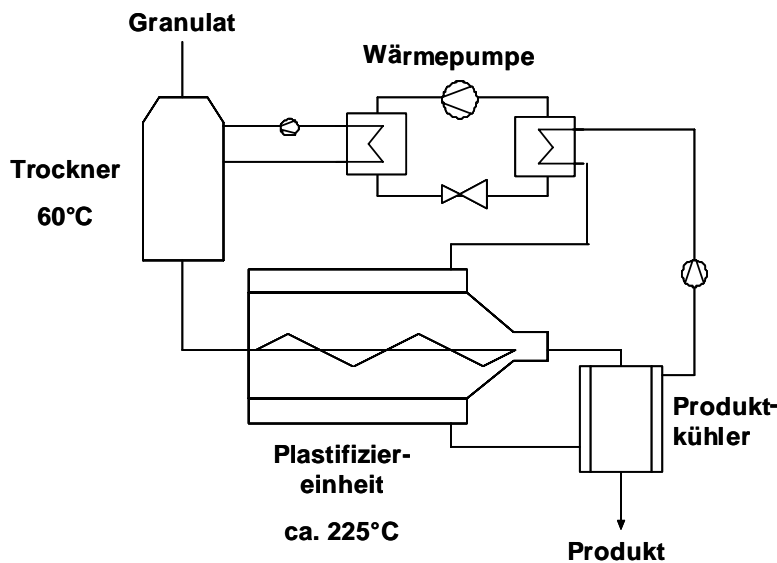


Abbildung 7-5: Prinzipskizze des Wärmepumpeneinsatzes in einem Kunststoff verarbeitenden Betrieb (vereinfachte Darstellung)

Die Rahmendaten der Wärmebilanz der einzelnen Prozesse der Kunststoffverarbeitung sind in **Tabelle 7-2** zusammengefasst.

Tabelle 7-2: Wärmespezifische Rahmendaten der Einzelprozesse der Kunststoffverarbeitung

| Prozess | Temperatur | Spez. Wärmefall/-bedarf |
|-----------|------------|--|
| | [°C] | [kWh _{th} /t _{Produkt}] |
| Schmelzen | 225 | -191 |
| Trocknen | 60 | 279 |
| Kühlen | 65 | -25 |

Die Branchenstruktur der 1.800 Betriebe starken deutschen Kunststoffindustrie weist insgesamt 450.000 Mitarbeitern aus. Die durchschnittliche Betriebsgröße beträgt 250 Beschäftigte, der durchschnittliche Abwärmefall pro Betrieb liegt bei 1.778 MWh_{th}/a. Dar-

aus errechnet sich ein durchschnittliches technisches Wärmepumpeneinsatzpotential von $760 \text{ kW}_{\text{th}}$ /Betrieb. Für eine Mindestgröße der Wärmepumpe von $100 \text{ kW}_{\text{th}}$ ergibt sich eine erforderliche Betriebsgröße von etwa 35 Mitarbeitern. Dieses Kriterium erfüllen in Deutschland derzeit ca. 1.200 Betriebe.

8 Zusammenfassung und Fazit

Bisherige Studien und Broschüren beschäftigen sich kaum mit möglichen Anwendungen von Wärmepumpen in industriellen Prozessen bzw. zur Abwärmenutzung. Die hier durchgeführte Marktanalyse zeigt, dass bereits einige Hersteller Wärmepumpen im Leistungsbereich von $100 \text{ kW}_{\text{th}}$ bis ca. $1.500 \text{ kW}_{\text{th}}$ anbieten und diese Anlagen hinsichtlich der Energieausnutzung mögliche COPs von ≥ 3 erreichen. Das darstellbare Temperaturniveau kommerziell verfügbarer industrieller Wärmepumpen liegt im Moment jedoch bei einem Maximum von ca. $75 \text{ }^\circ\text{C}$.

Gemäß der aktuellen Analyse möglicher Anwendungsfälle und Best-Practice-Beispiele lässt sich feststellen, dass die Hauptanwendung von Wärmepumpen im industriellen Bereich derzeit die Brauchwarmwasser- und Raumwärmebereitstellung darstellt. Für eine Vielzahl von industriellen Prozessen ist die darstellbare Temperatur der aktuellen Wärmepumpen noch nicht ausreichend hoch. Die Nutzung von Abwärme stellt jedoch zusätzlich zu den Ergebnissen der Potenzialanalyse ein weiteres großes Potenzial für den Einsatz von Wärmepumpen in der Industrie dar, welches bisher noch nicht untersucht und analysiert wurde.

Die Hemmnisanalyse zeigt, dass hinsichtlich der technischen Grundlagen vor allem die darstellbare Ausgangstemperatur von maximal $75 \text{ }^\circ\text{C}$ einer weiteren Verbreitung von Wärmepumpen bei industriellen Prozessen entgegensteht. Einige im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersuchte Unternehmen hatten ausreichend Abwärme zur Verfügung, die geforderte Prozesstemperatur übersteigt jedoch die Leistungsfähigkeit der aktuellen Wärmepumpentechnologie. Neben den technisch bedingten Hemmnissen kommt den, im Vergleich zu konventionellen Versorgungstechnologien, hohen Investitionskosten von Wärmepumpenanlagen eine große Bedeutung zu. Dadurch ergeben sich entsprechend lange Amortisationszeiten, welche vor allem im Bereich der Prozesstechnik (Forderung vieler Unternehmen Amortisationszeit ≤ 2 Jahre) zu einer Entscheidung gegen eine Wärmepumpenanlage führt. Darüber hinaus zeigt der Kontakt zu Herstellern, potenziellen Betreibern, Planern, Verbänden und Informationsstellen, dass das Wissen über industrielle Großwärmepumpen eher gering ist. Der Wärmepumpenmarkt leidet unter Informations- und Erfahrungsmangel sowohl bei Endkunden als auch bei Planern und Ingenieuren. Für den Einsatz solcher Wärmepumpen müssen bestimmte Rahmenbedingungen (z. B. geeignetes Temperaturniveau der Wärmequelle, Zuverlässigkeit und Umfang der nutzbaren Abwärme, Gleichzeitigkeit von Wärmebedarf und Abwärmeeinfall, etc.) eingehalten und beachtet werden, um zufriedenstellende Ergebnisse erzielen zu können. Informationsbroschüren, Informationsveranstaltungen sowie gemeinsam Informationsplattformen von Herstellern können das Wissen über die Einsatzmöglichkeiten von Wärmepumpen in der Industrie verbessern. Die Zusammenarbeit von Wärmepumpen- und Komponentenherstellern zur Informationsbereitstellung als auch zur Bündelung

von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten könnte die Standardisierung der Komponenten und die Weiterentwicklung der Technik voranbringen.

Im Rahmen der Untersuchung von potenziellen Einsatzmöglichkeiten stellen vor allem die Ernährungsindustrie, die chemische Industrie, die Kunststoffverarbeitung oder auch die Papierindustrie aussichtsreiche Branchen dar. Die Analyse des technischen Potenzials zeigt, dass bereits mit der aktuellen Wärmepumpentechnologie (Ausgangstemperatur 70 °C) ca. 231,06 PJ pro Jahr an Wärme für die Brauchwasserbereitstellung, zur Raumwärme und für Niedertemperatur-Prozesswärme zur Verfügung gestellt werden kann. Dies entspricht ca. 8,9 % des Energiebedarfs der deutschen Industrie im Jahr 2006. Kann jedoch durch die technische Weiterentwicklung der Komponenten und Wärmepumpenanlagen die mögliche darstellbare Temperatur auf 100 °C erhöht werden, so bieten Wärmepumpen die Möglichkeit, in Deutschland ca. 389,53 PJ Nutzwärme pro Jahr zur Verfügung zu stellen. Dies entspricht 15 % des gesamten Energiebedarfs und 30 % des Nutzwärmebedarfs der deutschen Industrie im Jahr 2006. Bisher wird jedoch nur ein sehr geringer Anteil dieses Potenzials genutzt. Hinsichtlich der CO₂-Emissionen wäre dadurch eine Einsparung von ca. 6,34 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr möglich, was 6,2 % der gesamten CO₂-Emissionen der deutschen Industrie im Jahr 2005 entspricht.

Große Potenziale für den Einsatz von Groß-Wärmepumpen bietet die Nutzung von Abwasser zur Bereitstellung von Wärme und Kälte für einzelne Gebäude aber auch für den Einsatz in Fernwärme- und Fernkältenetze. Die Nutzung von Abwärme aus Abwasser ist vor allem in der Schweiz bereits sehr weit verbreitet und die Anlagen werden mit großem Erfolg betrieben. Weitere Informationen zu diesem Thema wird vom Bundesamt für Energie /vgl. BFE 2008/ bereitgestellt. Erfolgreich werden Wärmepumpen für Fernwärme- und Fernkältenetze seit Jahren in Frankreich und in Skandinavien eingesetzt. Diese Anlagen stellen mehrere Megawatt an Nutzenergie z. B. aus Meerwasser zur Verfügung (vgl. /Friotherm 2008/).

Aufgrund der im Rahmen dieses Forschungsprojektes gemachten Erfahrungen lässt sich feststellen, dass in folgenden Bereichen weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht:

- Abwassernutzung in Deutschland
- Nutzung von industrieller Abwärme zur Klimatisierung von Gebäuden
- Einsatz von Groß-Wärmepumpen in Fernwärmenetzen
- Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnologie
 - Erhöhung des realisierbaren COPs auch bei hohen Vorlauftemperaturen (65 °C)
 - Erhöhung der realisierbaren Vorlauftemperaturen auf ≤ 100 °C

9 Anhang

Sensitivitätsanalysen Fall A:

Variation der Energiepreise

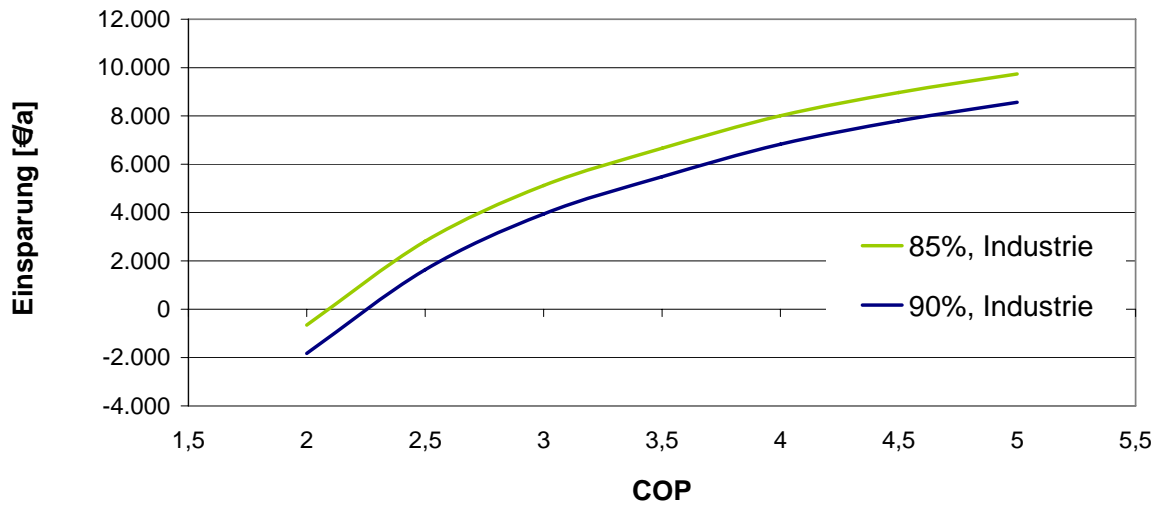


Abbildung 9-1: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall A

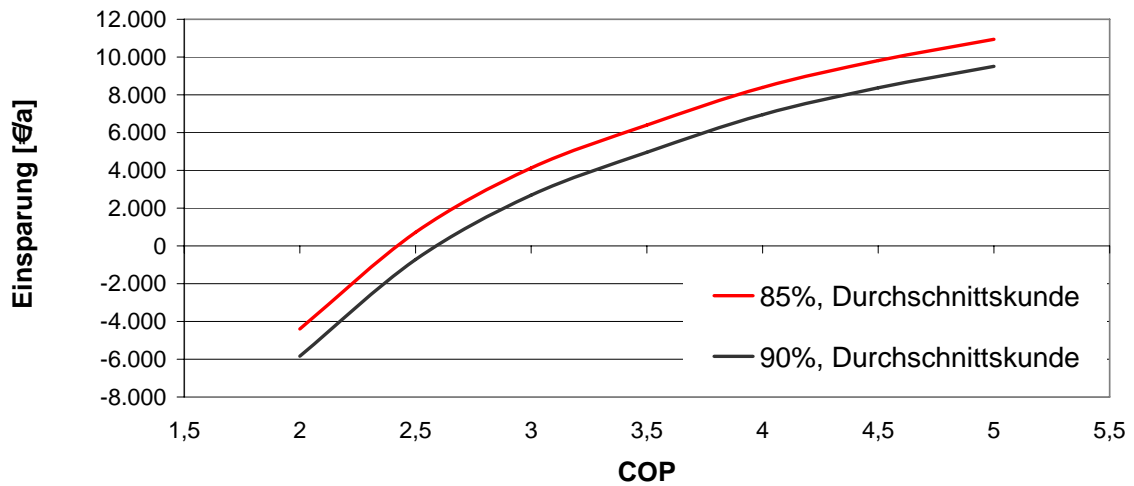


Abbildung 9-2: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall A

Variation des CO₂-Emissionsfaktors für Strom

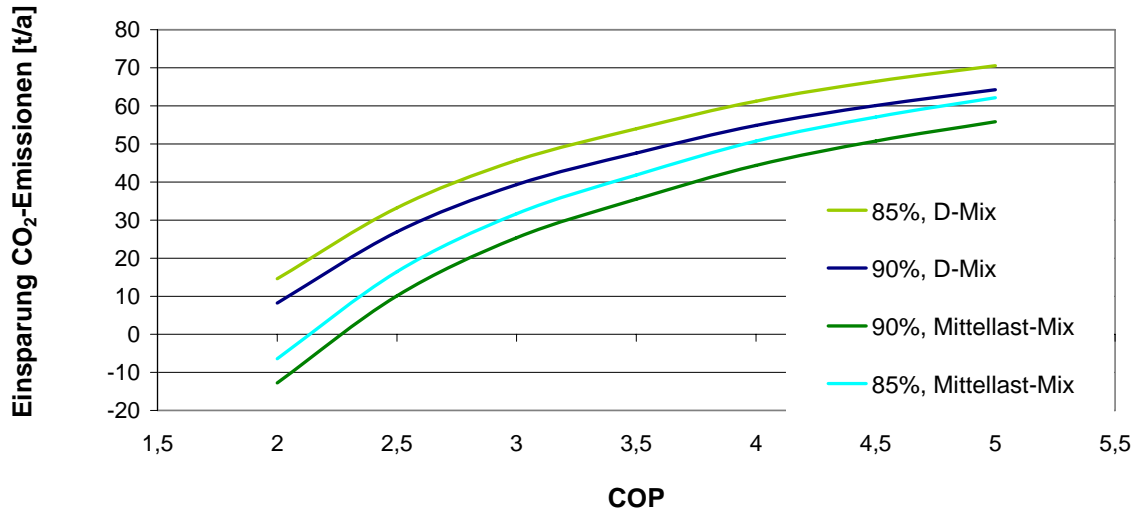


Abbildung 9-3: Einsparungen an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall A

Variation der Gas- und Strompreise

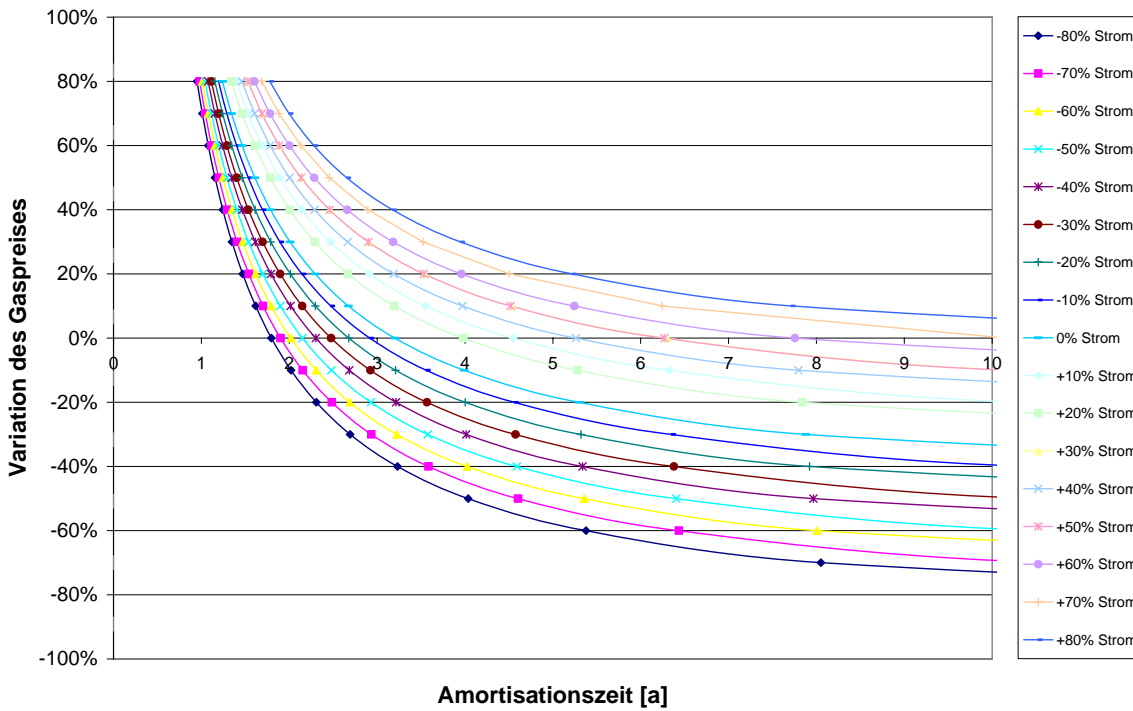


Abbildung 9-4: Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis - Fall A

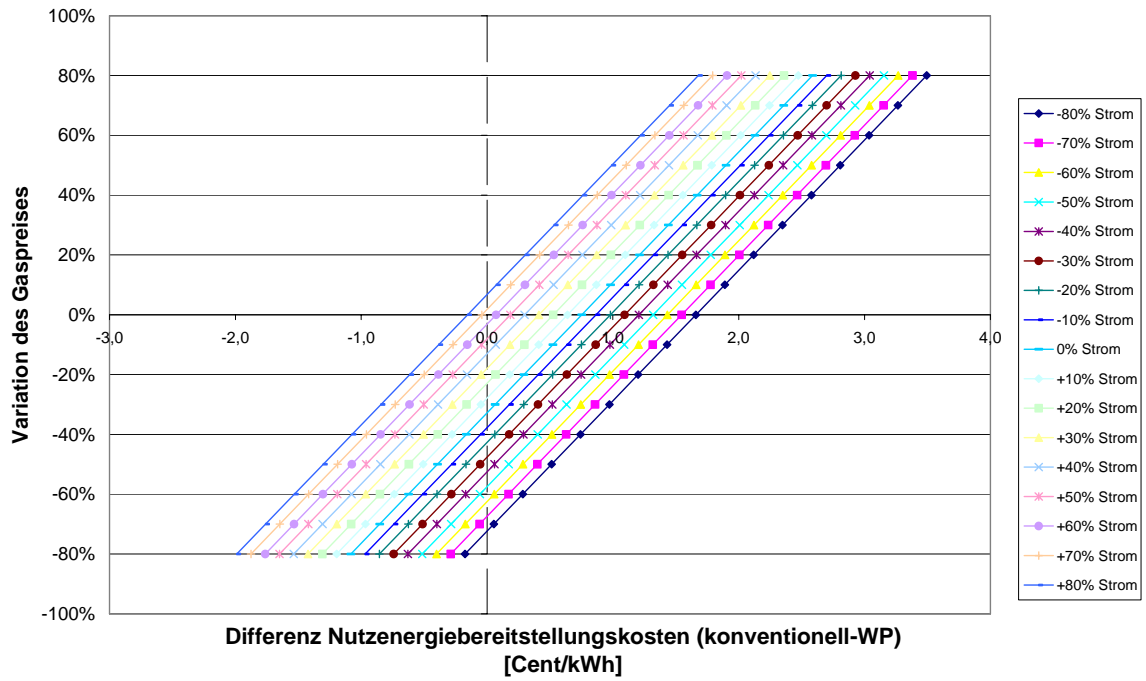


Abbildung 9-5: Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall A

Sensitivitätsanalysen Fall B:

Variation der Energiepreise

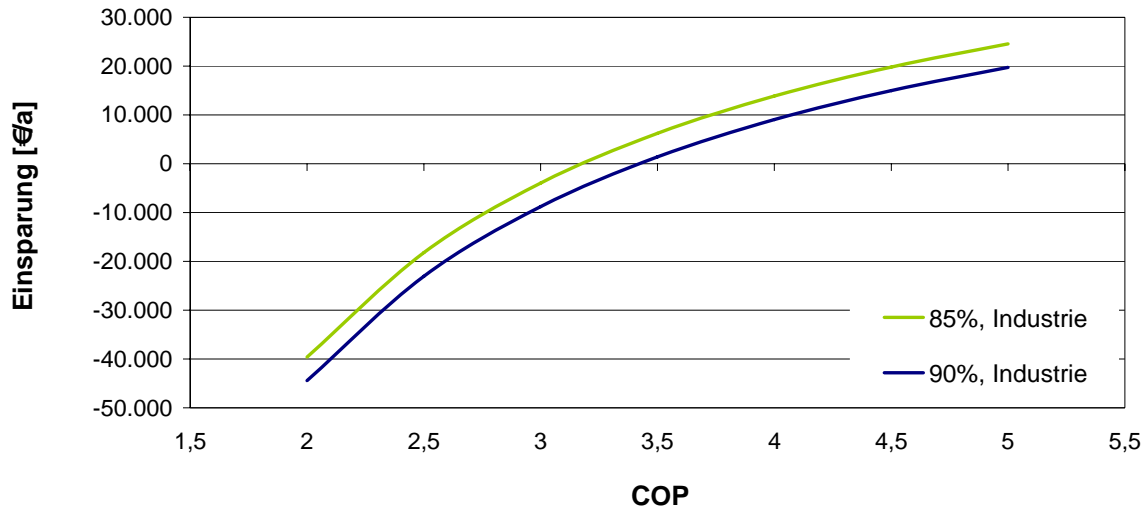


Abbildung 9-6: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall B

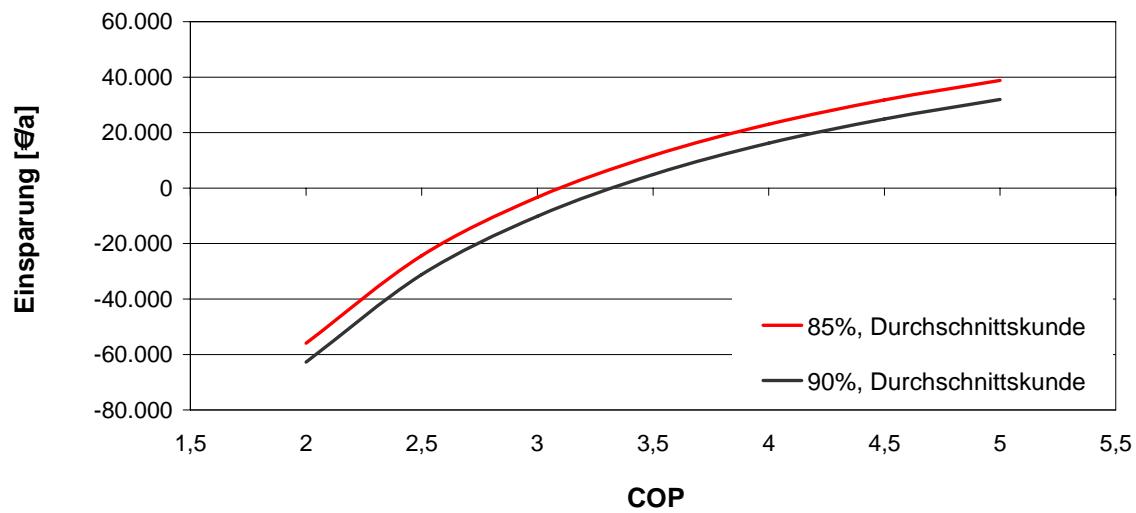


Abbildung 9-7: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall B

Variation des CO₂-Emissionsfaktors für Strom

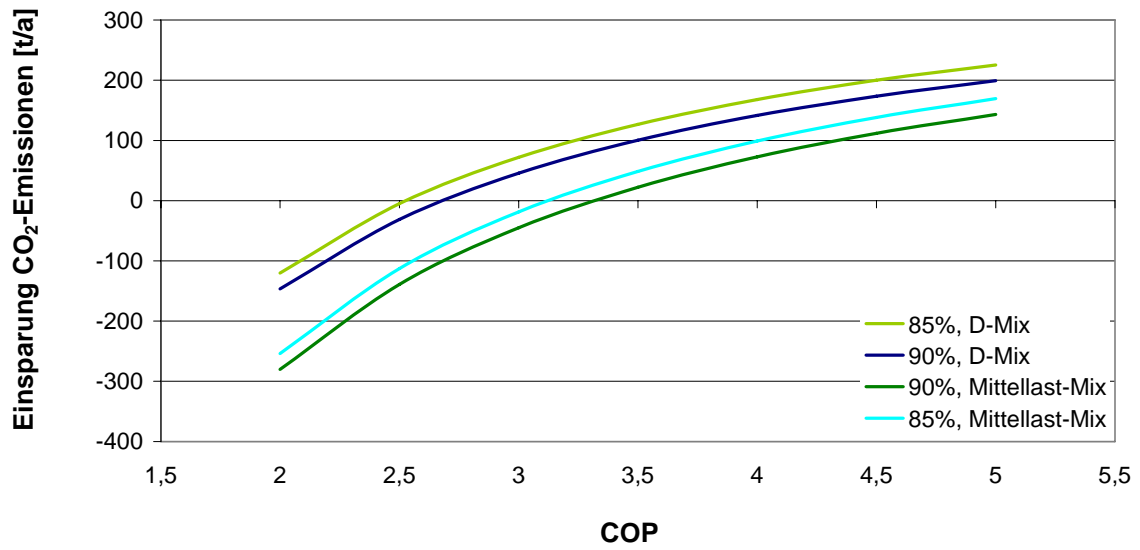


Abbildung 9-8: Einsparung an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall B

Variation der Gas- und Strompreise

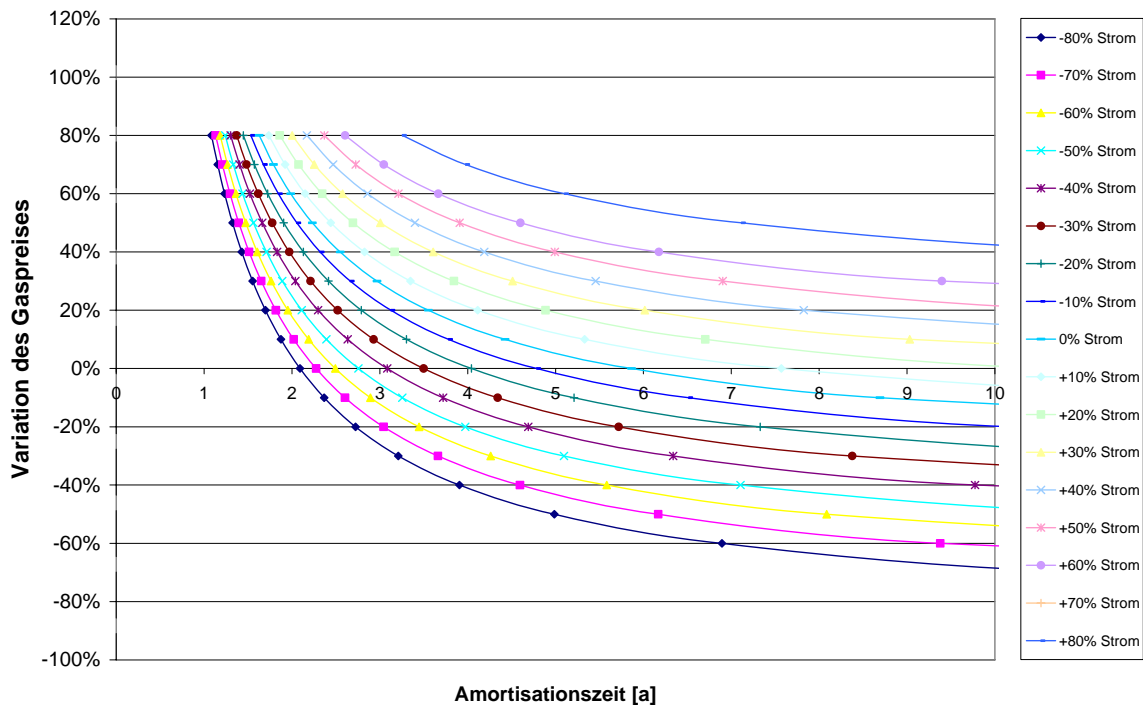


Abbildung 9-9: Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis - Fall B

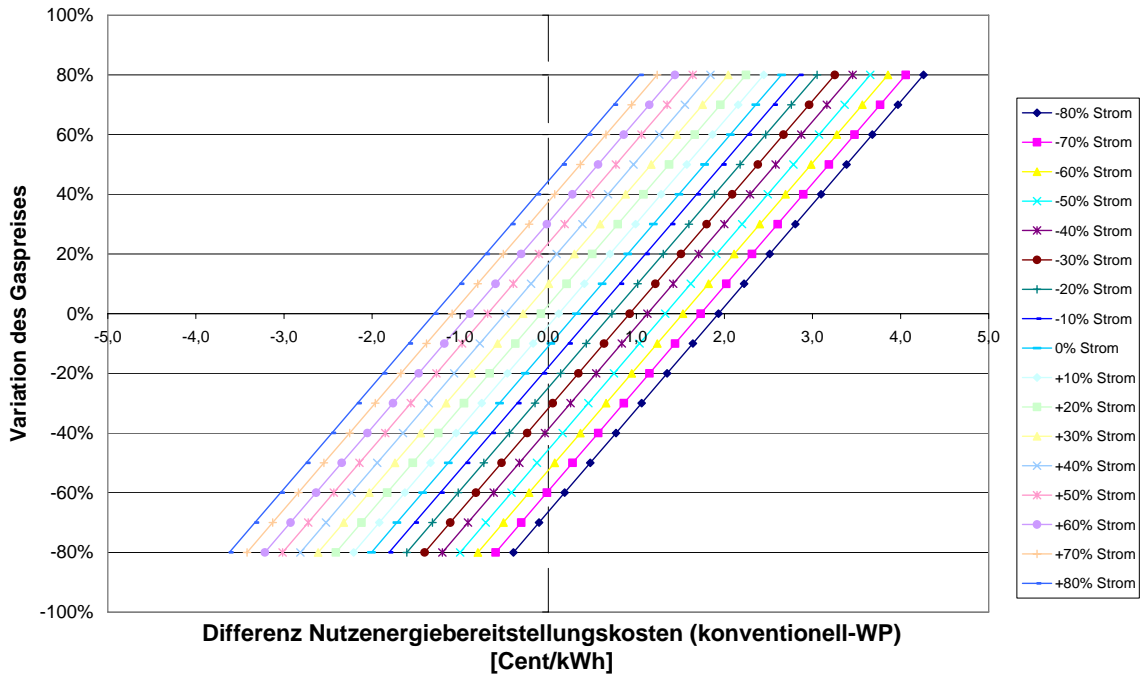


Abbildung 9-10: Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall B

Sensitivitätsanalysen Fall D:

Variation der Energiepreise

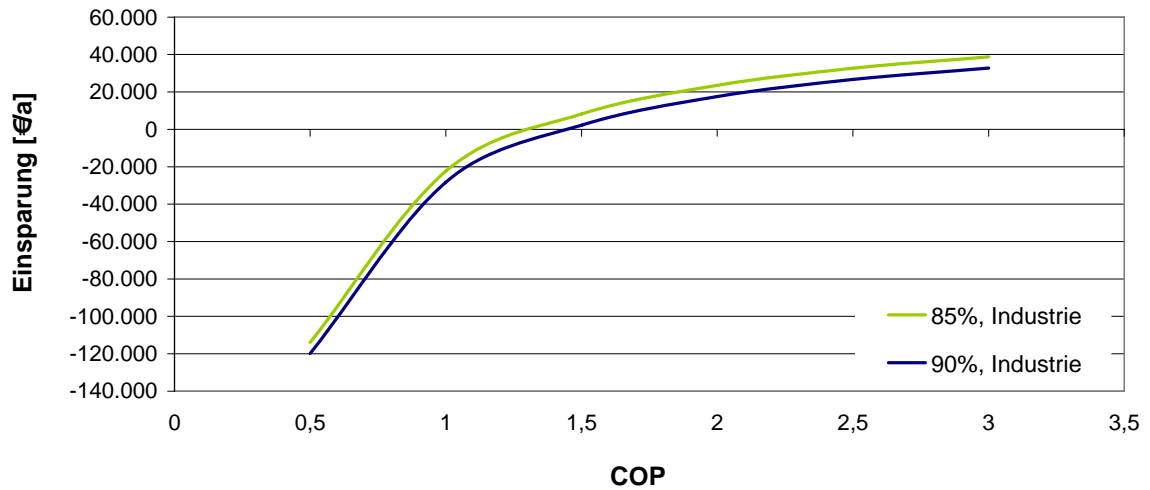


Abbildung 9-11: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall D

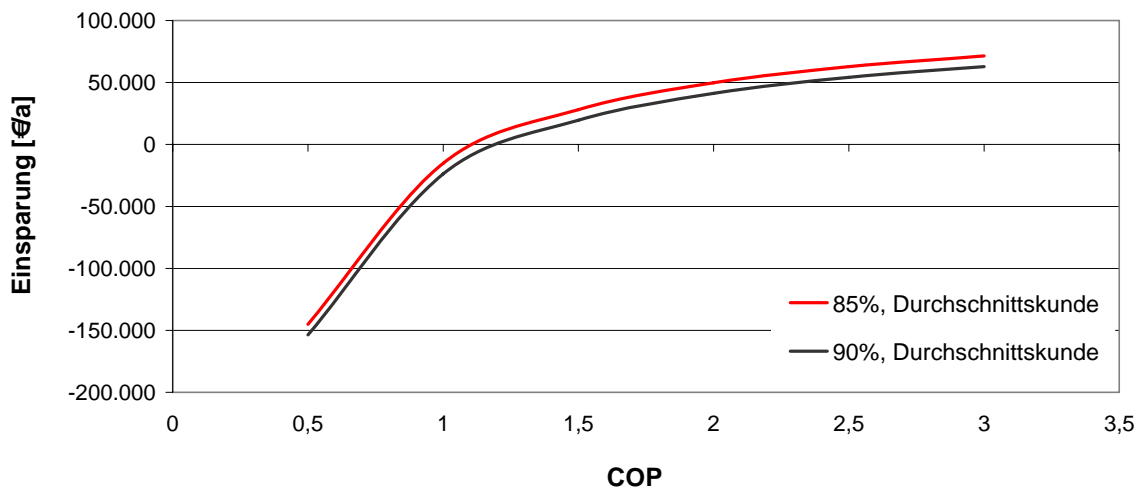


Abbildung 9-12: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall D

Änderung der Einsparungen an CO₂-Emissionen in Relation zum COP der Wärmepumpenanlage und dem Wirkungsgrad der konventionellen Vergleichsanlagenkonfiguration

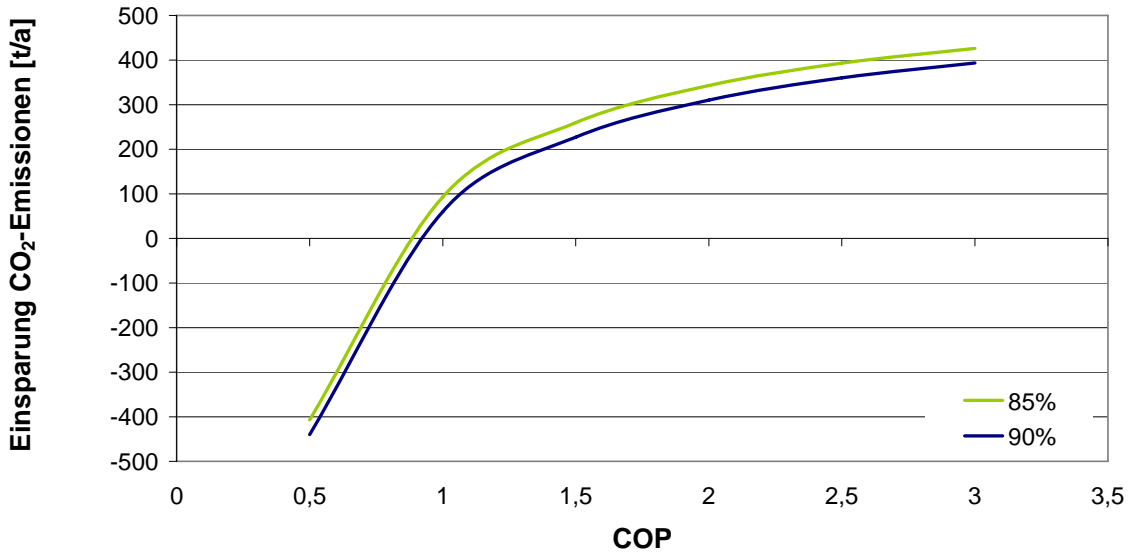


Abbildung 9-13: Einsparungen an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall D

Variation des Gaspreises

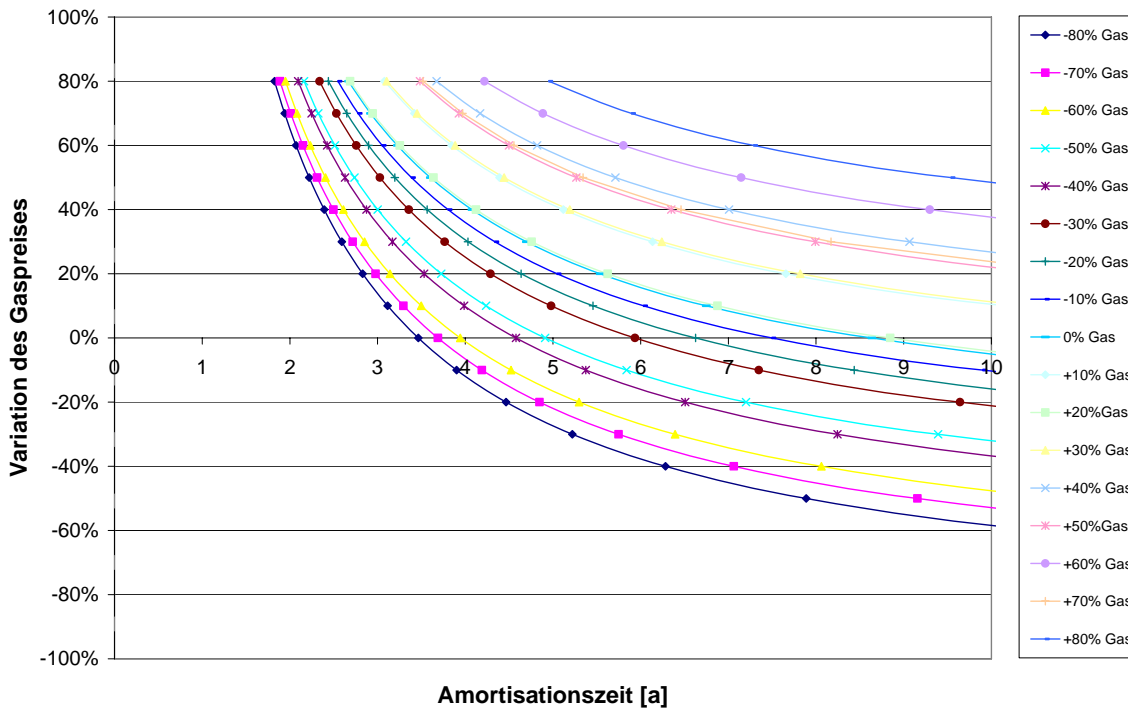


Abbildung 9-14: Amortisationszeit in Abhängigkeit des Gaspreises - Fall D

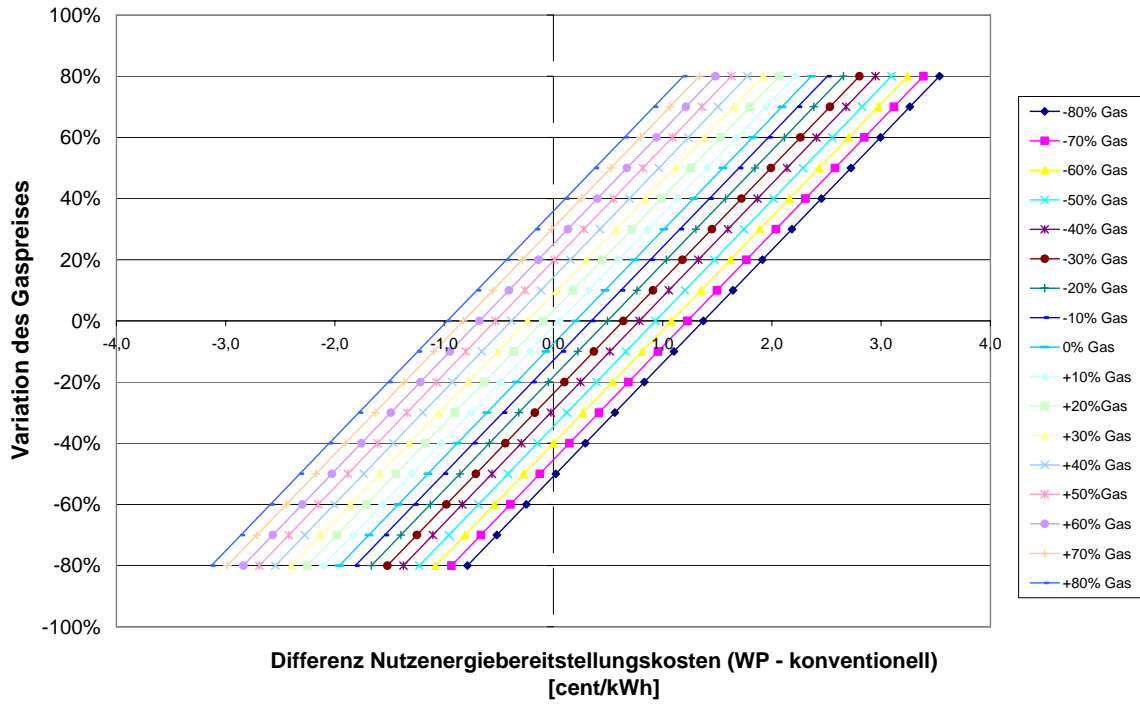
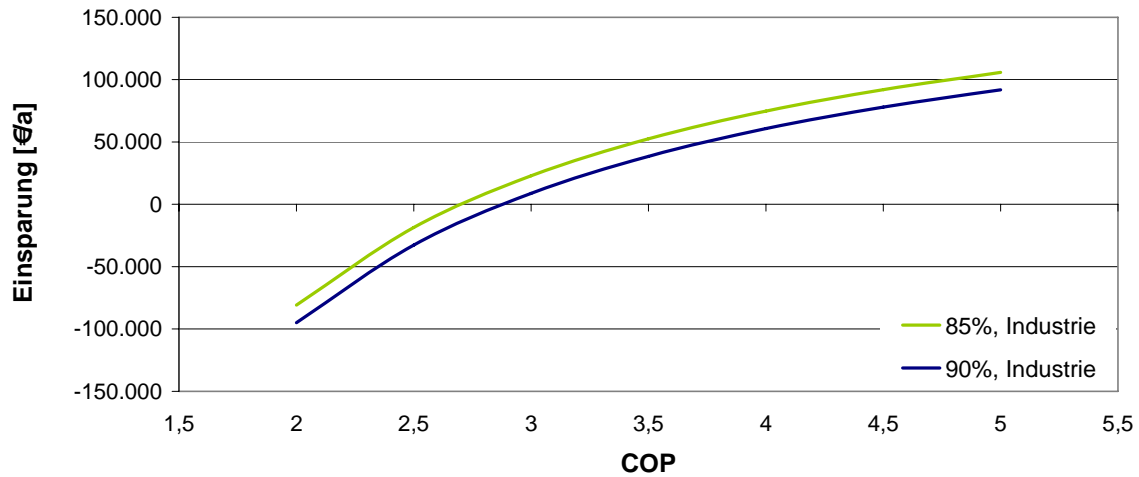
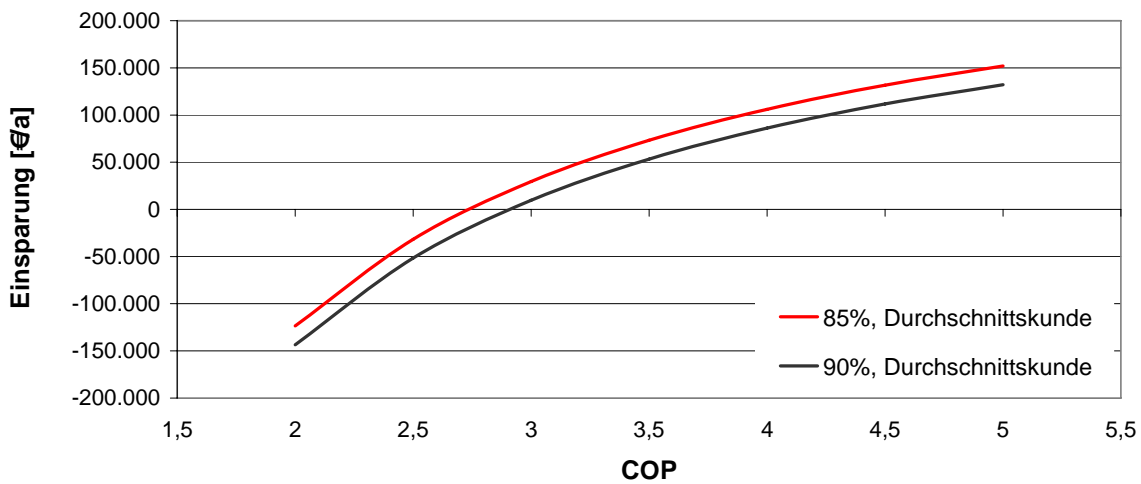


Abbildung 9-15: Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh - Fall D

Sensitivitätsanalysen Fall E:

Variation der Energiepreise

**Abbildung 9-16:** Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall E**Abbildung 9-17:** Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall E

Variation des CO₂-Emissionsfaktors für Strom

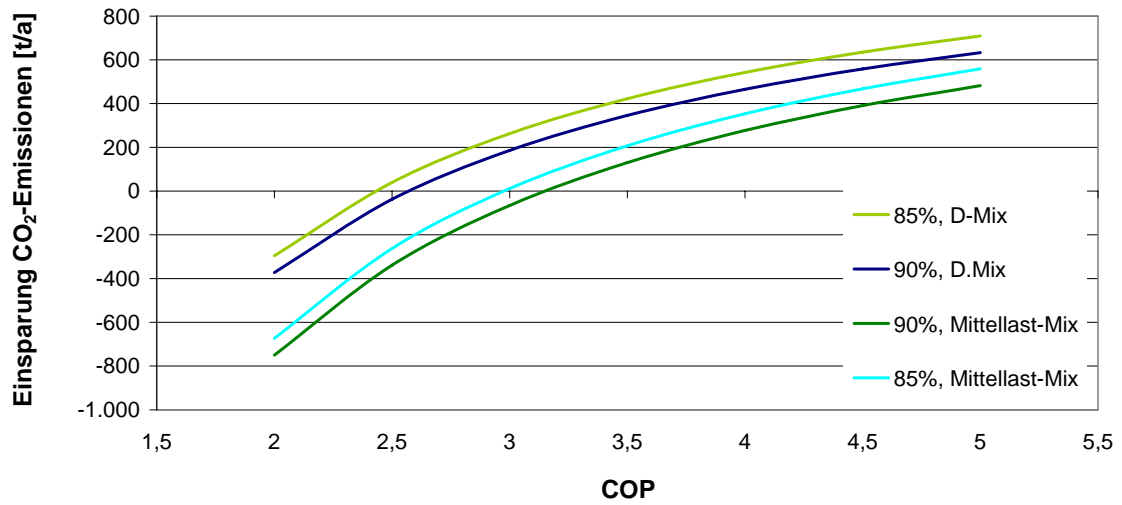


Abbildung 9-18: Einsparungen an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall E

Variation der Gas- und Strompreise

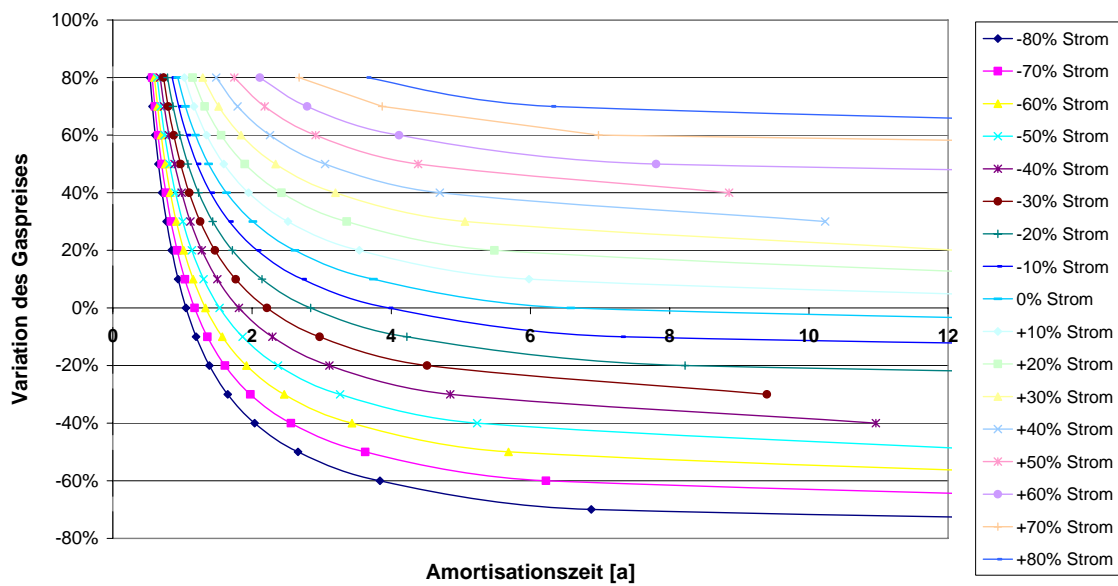


Abbildung 9-19: Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis - Fall E

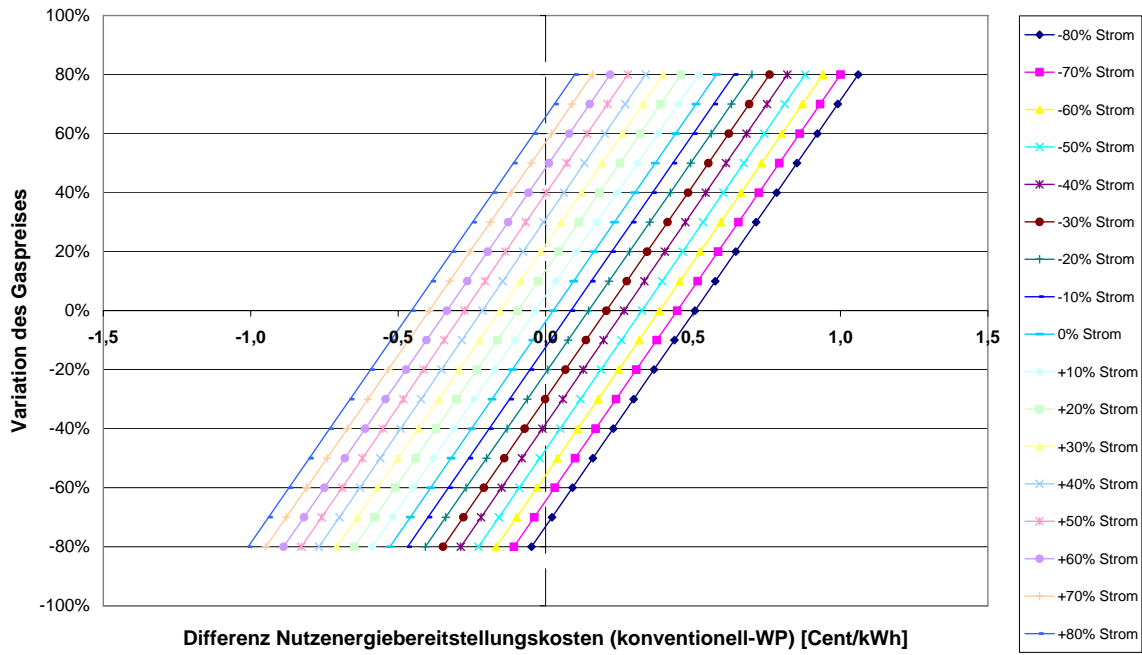


Abbildung 9-20: Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall E

Sensitivitätsanalysen Fall F:

Variation der Energiepreise

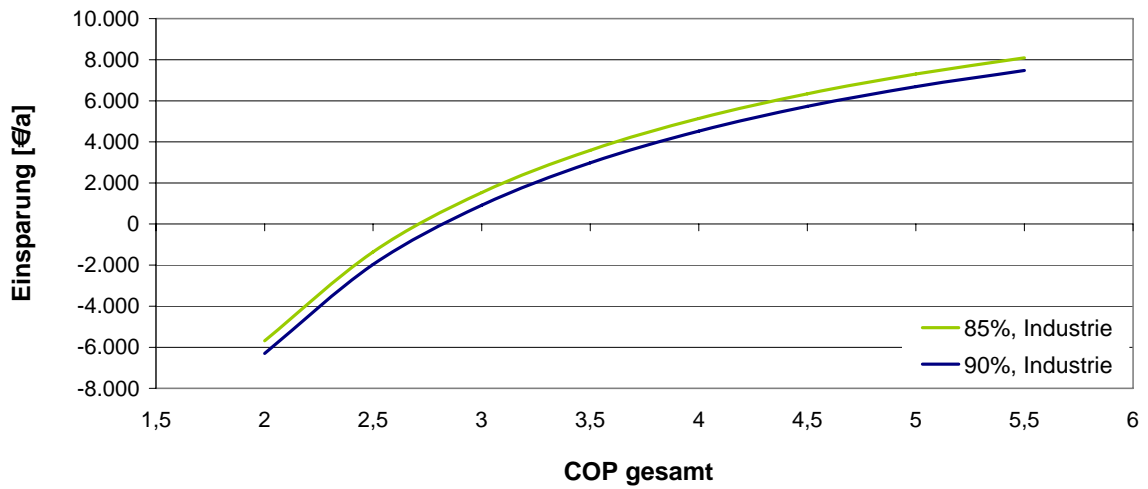


Abbildung 9-21: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall F

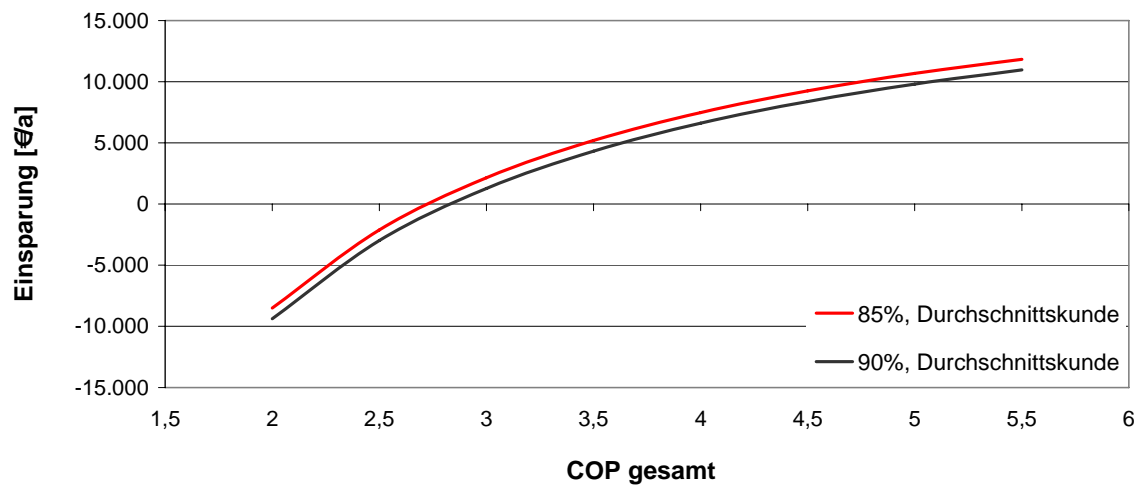


Abbildung 9-22: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) Fall F

Variation des CO₂-Emissionsfaktors für Strom

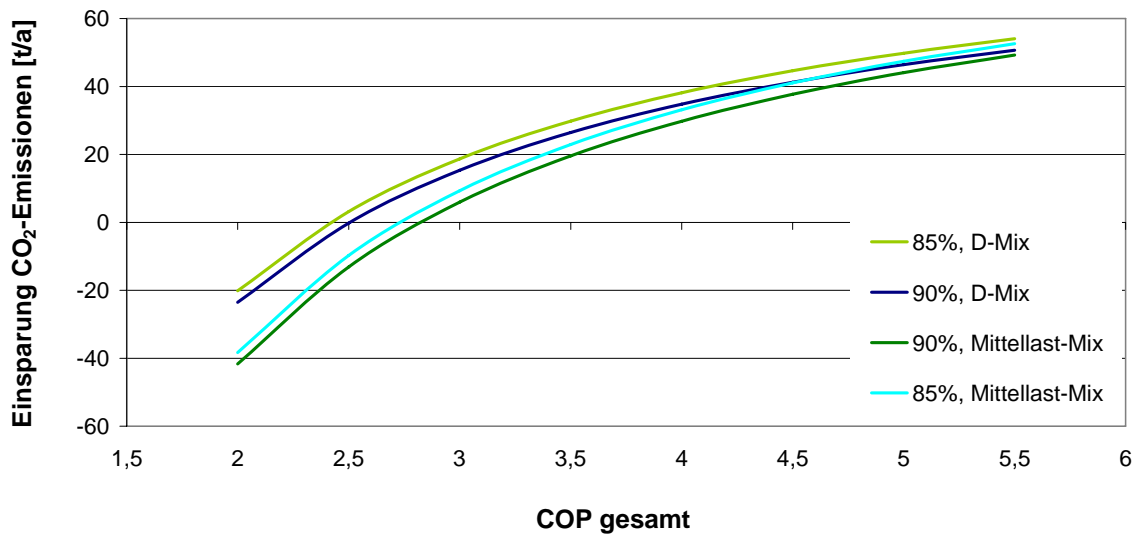


Abbildung 9-23: Einsparungen an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall F

Variation der Gas- und Strompreise

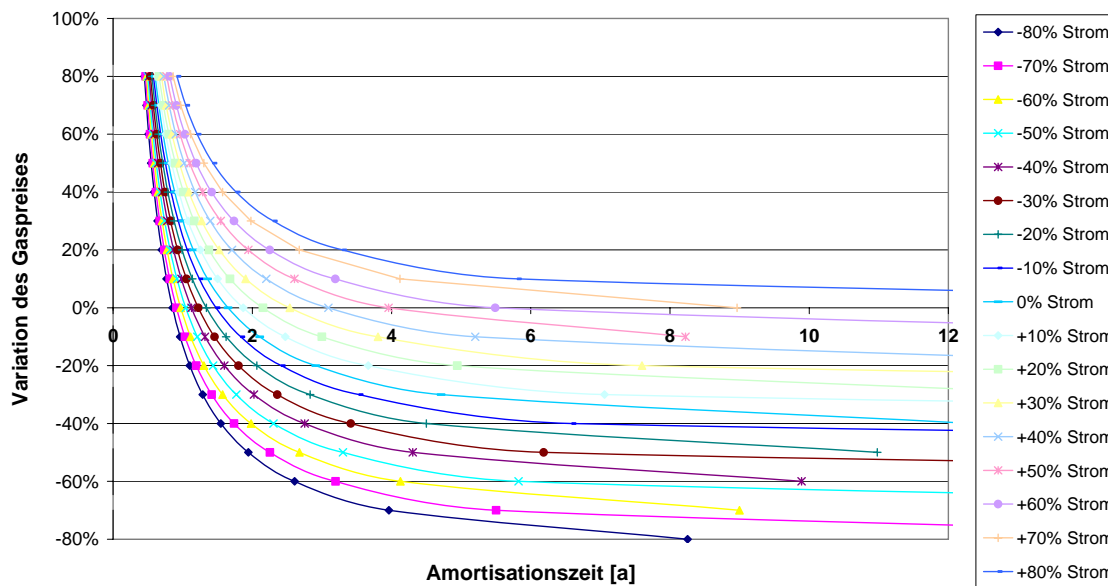


Abbildung 9-24: Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis Fall F

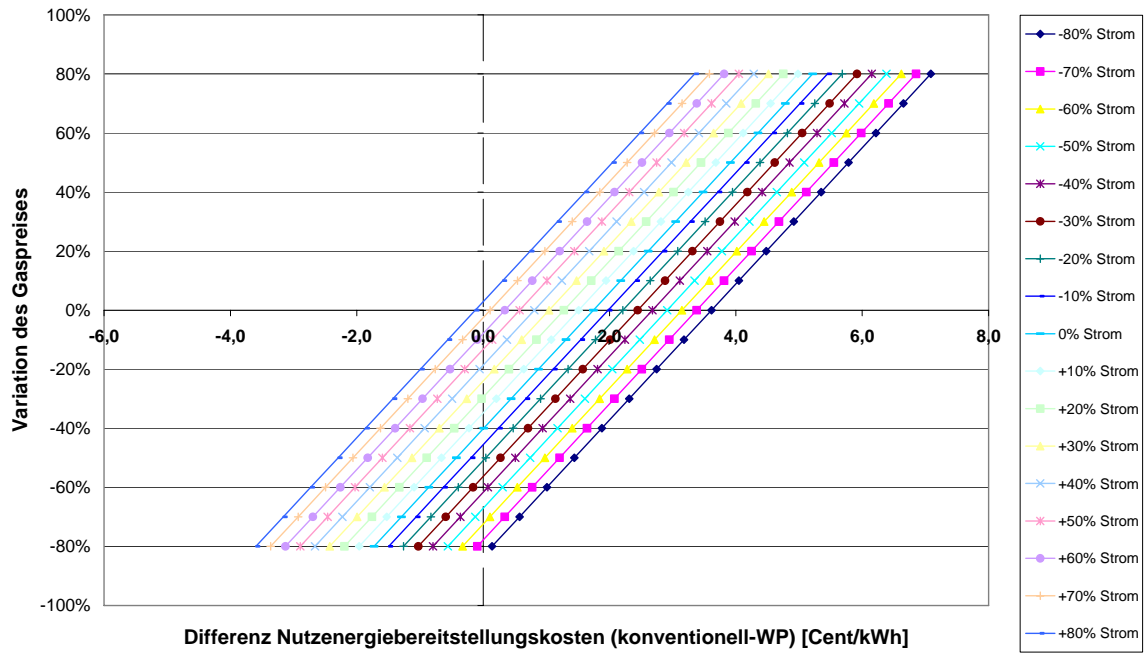
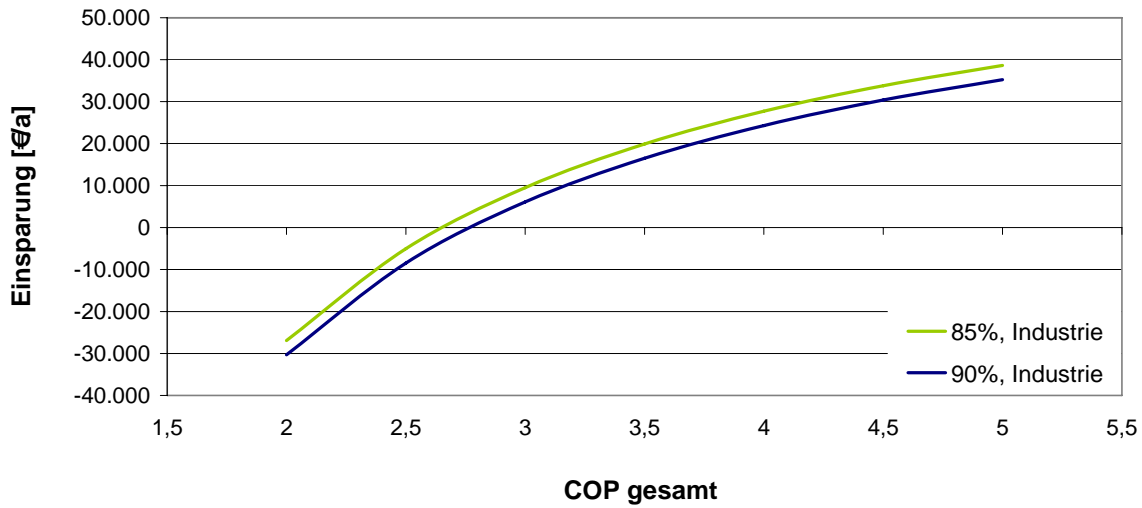
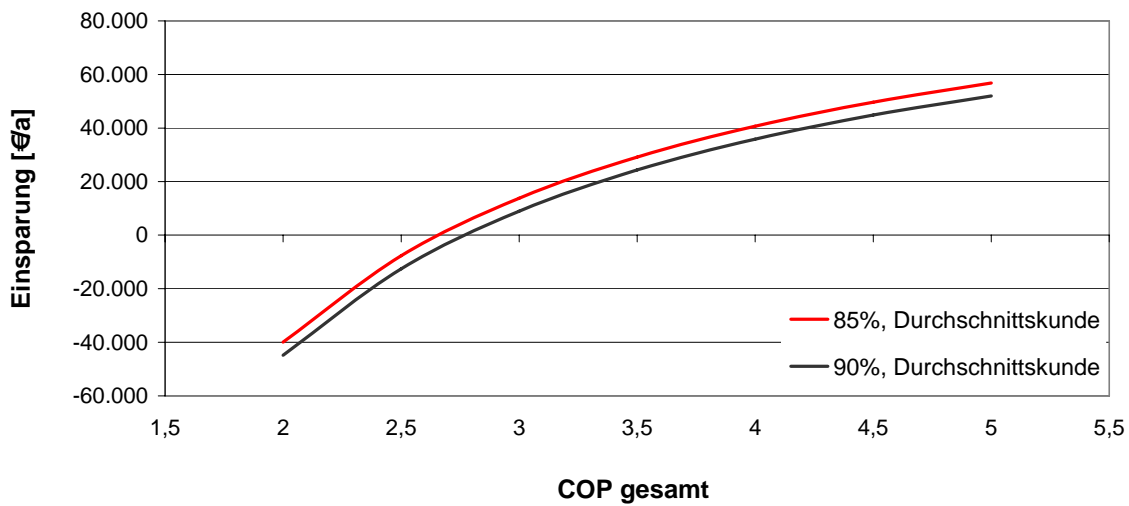


Abbildung 9-25: Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall F

Sensitivitätsanalysen Fall G:

Variation der Energiepreise

**Abbildung 9-26:** Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall G**Abbildung 9-27:** Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall G

Variation des CO₂-Emissionsfaktors für Strom

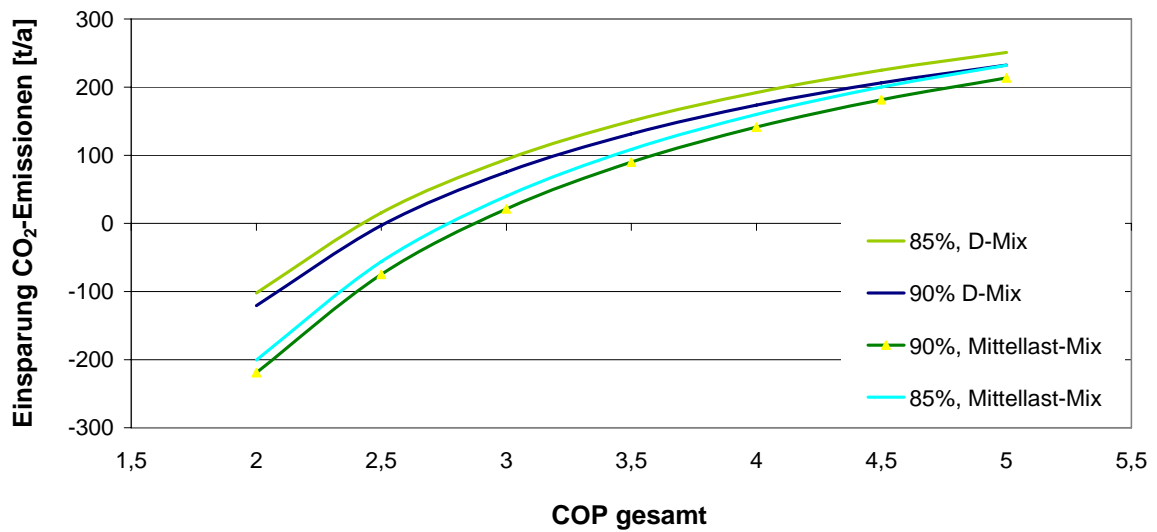


Abbildung 9-28: Einsparung an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall G

Variation der Gas- und Strompreise

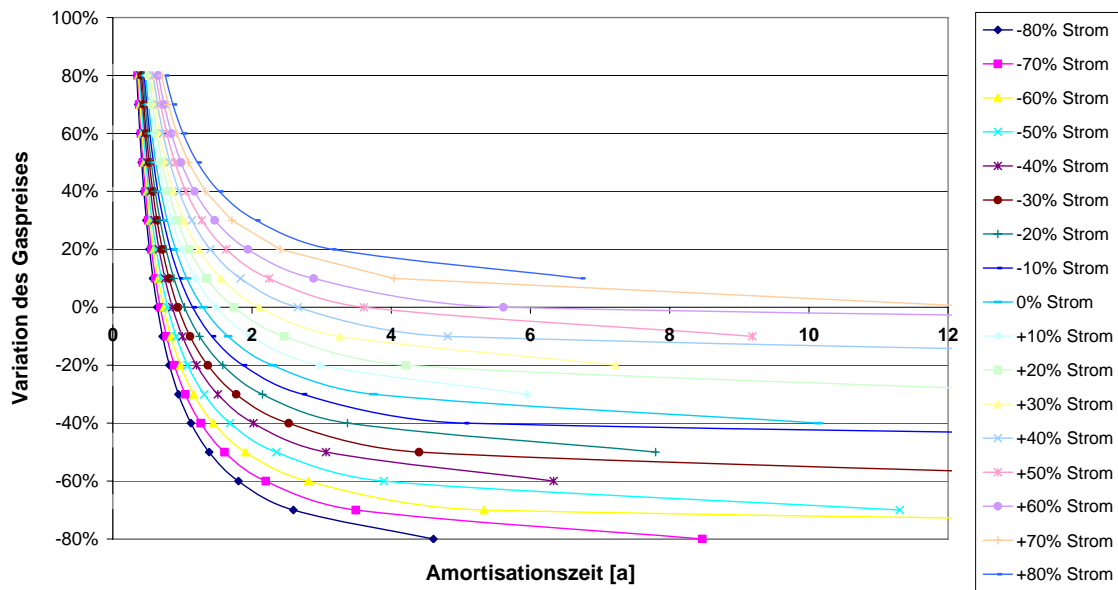


Abbildung 9-29: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Gas- und Strompreise - Fall G

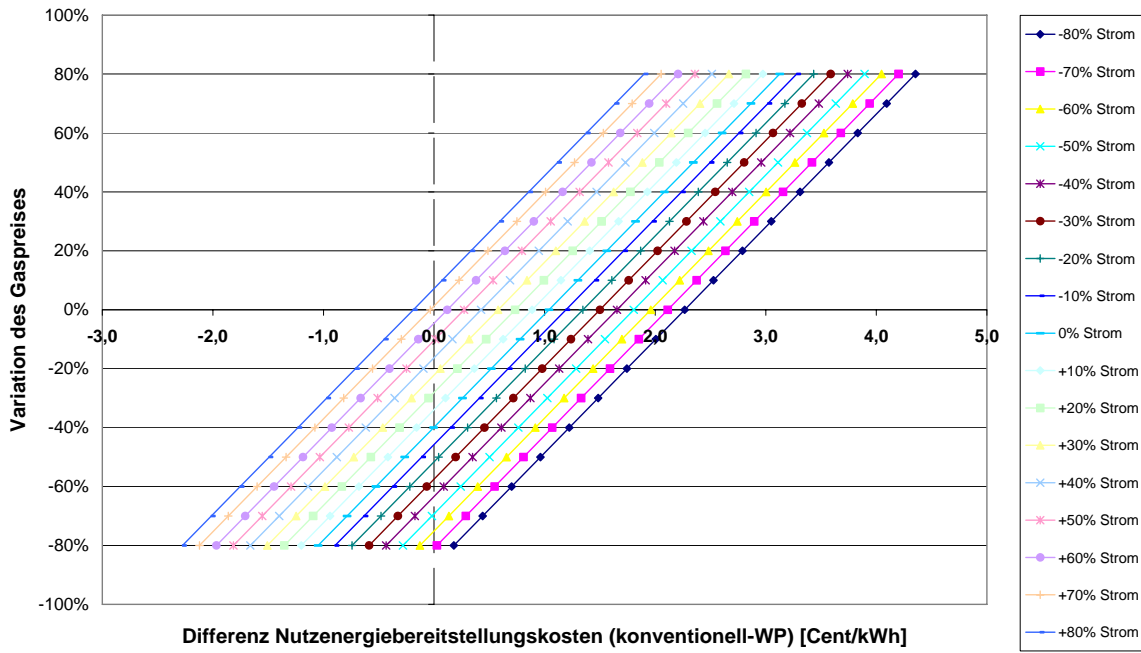


Abbildung 9-30: Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall G

Sensitivitätsanalysen Fall H:

Variation der Energiepreise

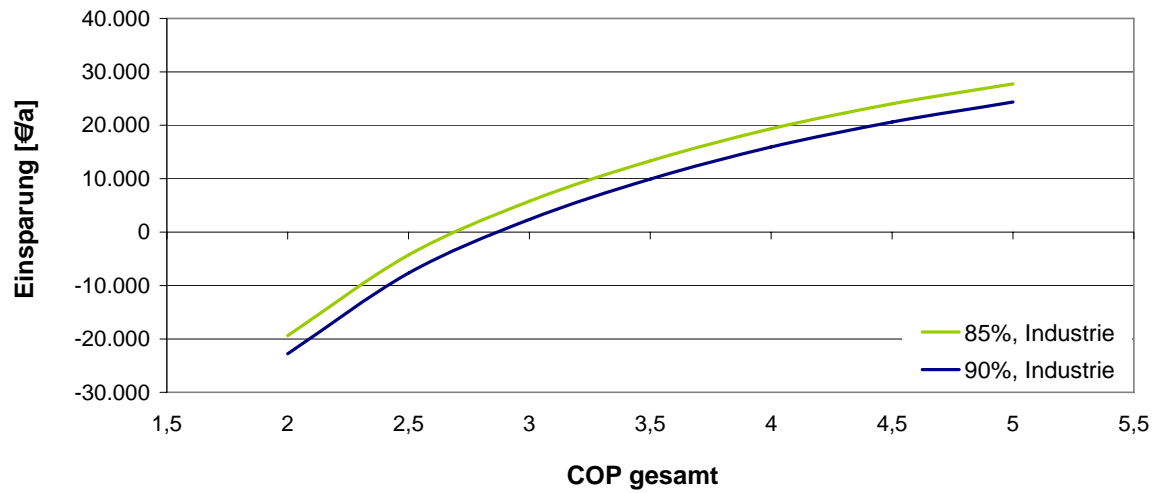


Abbildung 9-31: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall H

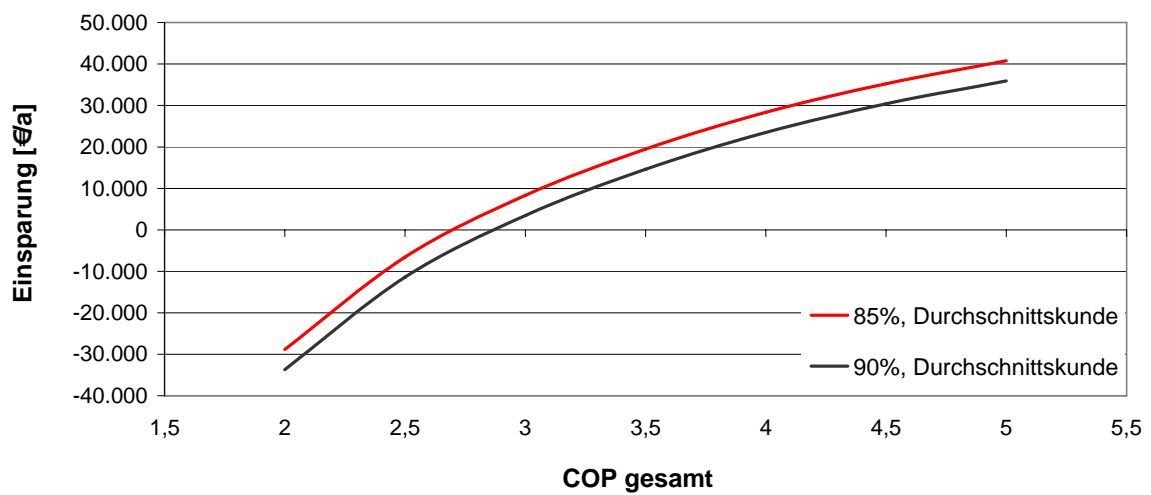


Abbildung 9-32: Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall H

Variation des CO₂-Emissionsfaktors für Strom

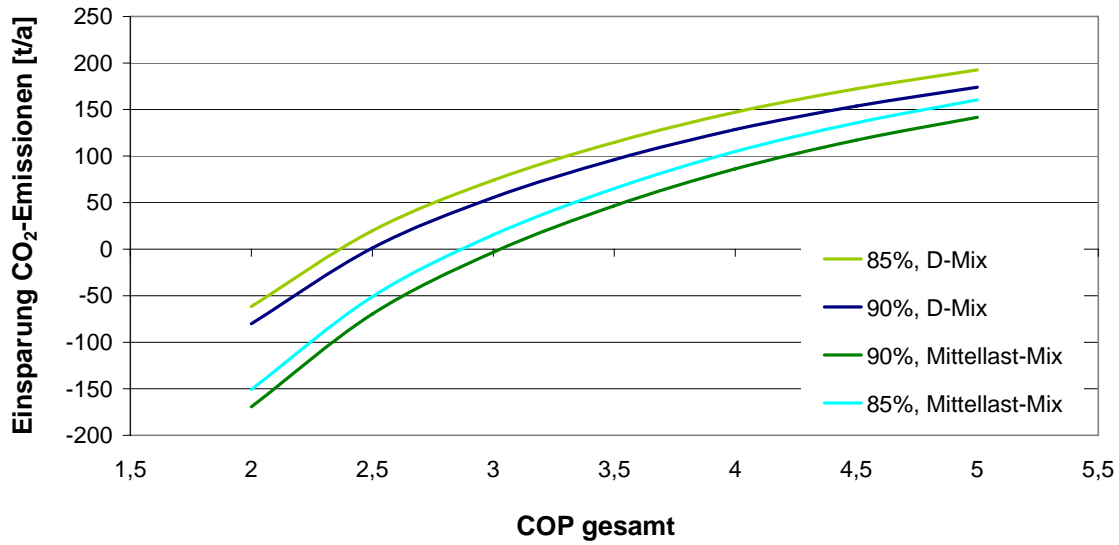


Abbildung 9-33: Einsparung an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall H

Variation der Gas- und Strompreise

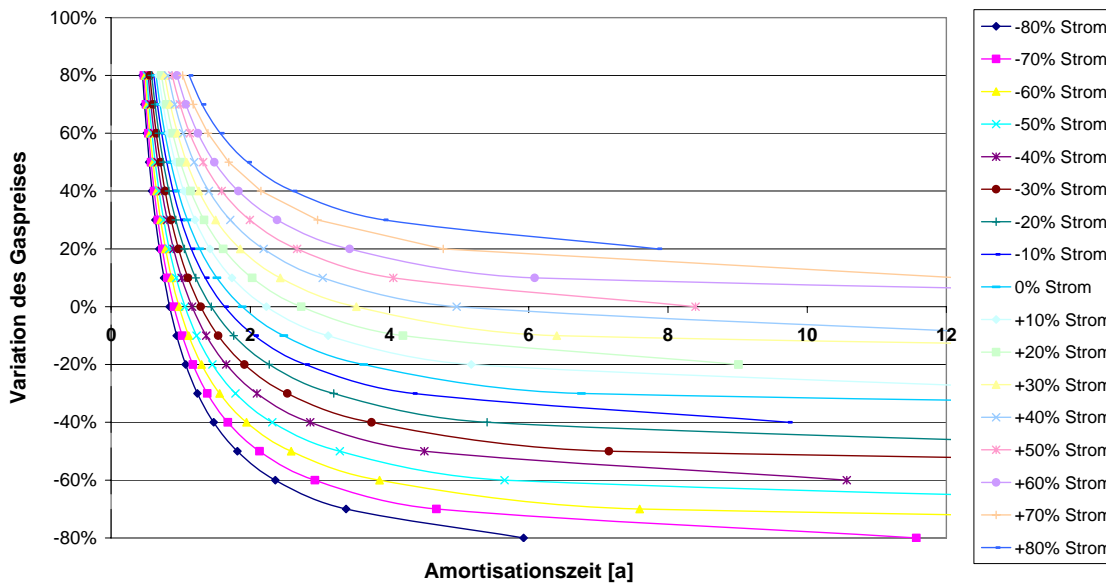


Abbildung 9-34: Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis - Fall H

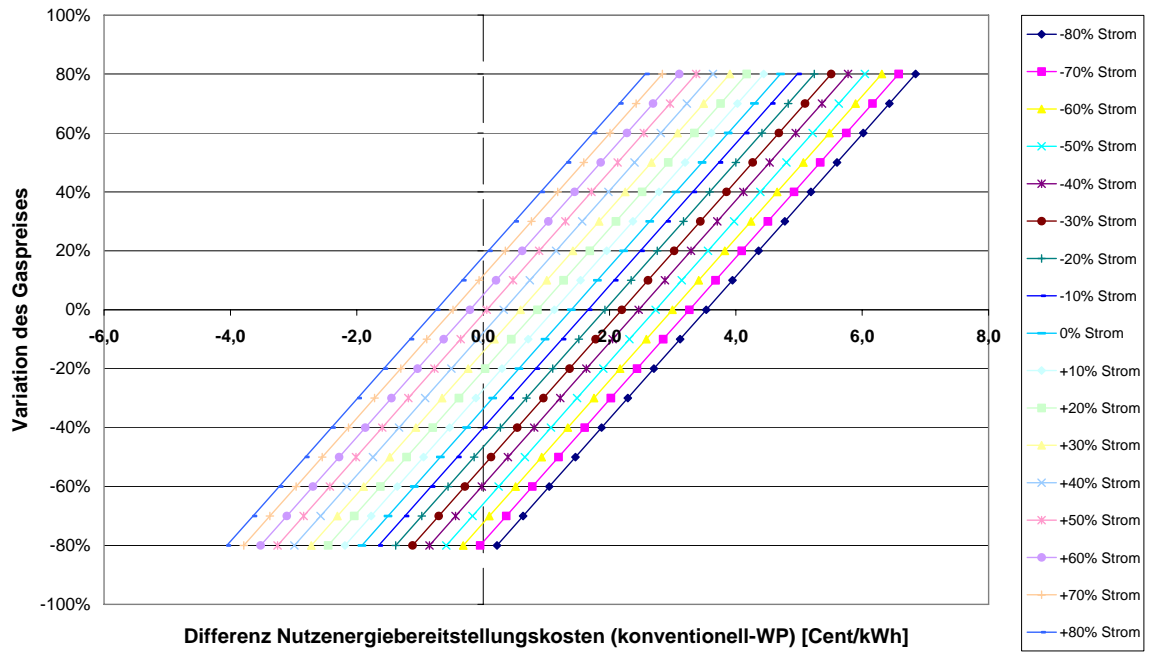


Abbildung 9-35: Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall H

10 Veröffentlichung der Ergebnisse

Vorträge und Veröffentlichung der Ergebnisse auf Tagungen:

Lambauer, J., Fahl, U., Ohl, M., Blesl, M.:

Large Scale Industrial Heat Pumps - market analysis, potentials, barriers and Best-Practice-examples -, in Proceedings of the 4th European Congress - Economics and Management of Energy in Industry (ECEMEI-4), Porto, Portugal, 27-30 November 2007, veranstaltet von Cenertec - Centro de Energie e Tecnologia, Rio Tinto, Portugal

Lambauer, J., Fahl, U., Ohl, M., Blesl, M., Voß, A.:

Large scale industrial heat pumps - Market analysis, potentials barriers and best-practice-examples -, in Proceedings of the 9th International Energy Agency Heat Pump Conference 2008, Advances and Prospects in technology, Applications and Markets, Zürich, Schweiz, 20-22 Mai 2008, veranstaltet von der International Energy Agency

Beiträge in Zeitschriften:

Lambauer, J., Ohl, M.:

Großwärmepumpen - zu niedrige Temperaturen, in energiespektrum, 23. Jahrgang, Heft 4/2008, S. 34 - 35 , Hrsg. Heinrich Publikationen GmbH

Lambauer, J., Fahl, U., Ohl, M., Blesl, M.:

Einsatzmöglichkeiten von Großwärmepumpen zur Effizienzsteigerung in der Industrie, in HLH Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik, Band 59, 2008, Heft Nr. 4, S. 30 – 35, Hrsg. Springer-VDI-Verlag

Lambauer, J., Fahl, U., Ohl, M., Blesl, M.:

Großwärmepumpen für die Industrie, in Der Facility Manager, Heft 5, Jahrgang 15, Mai 2008, Hrsg. Forum Verlag Herkert GmbH

Lambauer, J., Fahl, U., Ohl, M., Blesl, M.:

Raum- und Prozesswärme mit Großwärmepumpe - Potenziale nutzen, in industrieBAU, 4/2008, 54. Jahrgang, Hrsg. Verlag georg D.W. Callwey GmbH & Co. KG

Weitere Vorträge:**Lambauer, J., Ohl, M., Fahl, U., Blesl, M., Voß, A.:**

Energieeffiziente Nutzung von Abwärme in der Industrie durch Wärmepumpen und mobile thermische Energiespeicher, Vortag gehalten anlässlich des 8. Netzwerktreffen EnBW Netzwerk Energieeffizienz Ravensburg am 14. Februar 2008 in Ochsenhausen, veranstaltet von der EnBW Vertriebs- und Servicegesellschaft mbH, Niederlassung Ravensburg

Lambauer, J., Ohl, M., Fahl, U., Blesl, M., Voß, A.:

Energieeffiziente Nutzung von Abwärme in der Industrie durch Wärmepumpen und mobile thermische Energiespeicher, Vortag gehalten anlässlich des 8. Netzwerktreffen Energieeffizienz Mitteldeutschland am 14. Mai 2008 in Bebitz, veranstaltet von der EnBW Vertriebs- und Servicegesellschaft mbH, Niederlassung Berlin

Durchführung eines Symposiums:

Am Donnerstag, 12. Juni 2008, hat im VDI-Haus in Stuttgart-Vaihingen das erste Groß-Wärmepumpen-Symposium „Wärmepumpen in Industrie- und Großbauten - Energie sparen und Umwelt schützen“ stattgefunden. Veranstalter waren das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, die OCHSNER Wärmepumpen GmbH und der VDI-Arbeitskreis Energietechnik des WIV Württembergischer Ingenieurverein e.V. in Stuttgart.



Über 110 fachlich hoch qualifizierte Besucherinnen und Besucher, 11 Referenten und Vorsitzende sowie 8 Aussteller waren vor Ort. Präsentiert in Wort, Bild und Anschauungsobjekten wurden die neuesten Informationen zur Technologie von Groß-Wärmepumpen für größere Gebäudekomplexe sowie viele aktuelle Anwendungsbeispiele aus diversen Branchen. Die Vorträge sowie der Tagungsband sind unter www.industrielle-waermepumpen.de verfügbar.



Abbildung 10.1: Referenten und Organisatoren des Symposiums am 12. Juni 2008 in Stuttgart

Programm des Symposiums:

| | |
|---|--|
| <p>Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß Leiter des VDI-Arbeitskreises Energietechnik des WIV Württembergischer Ingenieurverein e.V., Stuttgart IER, Universität Stuttgart</p> | <p>Begrüßung</p> |
| <p>DI Karl Ochsner Ochsner Wärmepumpen GmbH</p> | <p>Einführung in das Thema: Was ist der Nutzen von Groß-Wärmepumpen?</p> |
| <p>Dipl.-Ing. Jochen Lambauer IER, Universität Stuttgart</p> | <p>Großwärmepumpen in der Industrie - Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice-Beispiele</p> |
| <p>Ing. Alfred Buchmayr Ochsner Wärmepumpen GmbH</p> | <p>Einsatzmöglichkeiten & Leistungen von Großwärmepumpen</p> |
| <p>Dipl.-Ing. Tomasz Ciepiela Ochsner Wärmepumpen GmbH</p> | <p>Kältekreis-Optimierung, Regelung und Planungshinweise zu Großwärmepumpe</p> |
| <p>Dipl.-oec. Steffen Klein Combitherm Apparate- und Anlagenbau GmbH</p> | <p>Ansatzpunkte und Beispiele für energieeffiziente Wärmepumpen</p> |
| <p>Dipl.-Ing. (FH) Rolf Blumhardt Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH</p> | <p>Kältemittel und Verdichter für Industrierärmepumpen</p> |
| <p>Dipl.-Ing. FH Ulrich Pietrucha Friotherm AG, Winterthur</p> | <p>Großwärmepumpen zur Fernwärme- und Kälteversorgung</p> |
| <p>Ernst A. Müller Institut Energie in Infrastrukturanlagen, Bundesamt für Energie, Schweiz</p> | <p>Abwasser - Wärmequelle für Groß-Wärmepumpen</p> |
| <p>Dipl.-Ing. (FH) Martin Windhab Robert Bosch GmbH</p> | <p>Erforderliche Rahmenbedingungen für den erfolgreichen Einsatz einer Großwärmepumpe, am Beispiel eines Büro- und Entwicklungstandortes</p> |
| <p>Dipl.-Ing. Karsten Rasche Ingenieurbüro Rasche Wärmetrans</p> | <p>„Wärmetrans“ - ein patentiertes Wärmeerzeugungsverfahren</p> |
| <p>Dipl.-Ing. (BA) Armin Schreijäg EnBW Vertriebs- und Servicegesellschaft mbH, Ravensburg</p> | <p>Abwärme-Erfahrungen aus EnBW Netzwerk Energieeffizienz</p> |
| <p>DI Karl Ochsner Ochsner Wärmepumpen GmbH</p> | <p>Schlusswort</p> |

11 Quellenverzeichnis

/ASUE 2006/

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), Heizen und Kühlen mit Gaswärmepumpen / Gasklimageräten, Juni 2006

/BFE 2006/

Bundesamt für Energie (BFE): „Potenziale von Gross-Wärmepumpen besser nutzen - Konzeption, Anwendungen, Kundensicht“, 13. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte des Bundesamts für Energie (BFE), Burgdorf Juni 2006

/BFE 2006a /

Bundesamt für Energie (BFE): „Grosswärmepumpen - Energetische und planerische Analyse von 10 Anlagen Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte“, Schlussbericht, Auftraggeber: Bundesamt für Energie Sektion erneuerbare Energie, September 2006

/BFE 2008/

Homepage des Bundesamts für Energie der Schweiz, <http://www.bfe.admin.ch/>, aufgerufen am 10.07.2008

/BINE 2002/

BINE Informationsdienst (Hrsg.): Heizen mit Wärmepumpen, TÜV-Verlag GmbH, Köln 2002; ISBN 3-8249-0641-4

/BINE 2003/

BINE Internetforum "Innovative Energie-Projekte": Nullemissionsfabrik Braunschweig. Projekt-Nr: 134. Fertigstellung August 2002. (<http://www.energieprojekte.de/>)

/BINE 2003a/

BINE Internetforum "Innovative Energie-Projekte": Zukunftsfabrik mit Wasserkraftwerk Gutach. Projekt-Nr: 88. Einweihung Mai 2000. (<http://www.energieprojekte.de/>)

/BWP 2005/

Bundesverband Wärme Pumpe (BWP) e. V., Heizen und Kühlen mit Abwasser - Ratgeber für Bauherren und Kommunen, Oktober 2005

/DBU 2005/

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Energie aus Kanalabwasser - Leitfaden für Ingenieure und Planer, Osnabrück/Bern, November 2005

/DKV 2000/

Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV): IZW-DKV Wärmepumpenstatusbericht Nr. 2: Wärmepumpen in gewerblichen und industriellen Anwendungen. Stuttgart: DKV 2000

/DKV 2001/

Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV): IZW-DKV Wärmepumpenstatusbericht Nr. 4: Wärmerückgewinnung durch Wärmepumpen. Stuttgart: DKV 2001

/Energys 2/

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Vorlesungsskript Energiesysteme 2

/Feist, Baffia 1998/

Feist, W.; Baffia, E.: Heizung im Niedrigenergiehaus – ein Systemvergleich. Passivhausinstitut, Darmstadt 1998

/Fischedick et al. 1997/

Fischedick, M.; Schmutzler, T.: Elektrische Wärmepumpen – Eine Analyse aus ökologischer Sicht. Wuppertal Papers Nr. 77. August 1997

/Friootherm 2008/

Homepage der Friootherm AG, Schweiz, http://www.friootherm.com/deu/index_d.htm , aufgerufen am 10.07.2008

/Heidelck et al. 2000/

Heidelck, R.; Kruse, H.; Laue, H.-J. (IZW): Wärmepumpen in Gewerbe und Industrie – Ein Überblick. In: IZW-DKV Wärmepumpenstatusbericht Nr. 2: Wärmepumpen in gewerblichen und industriellen Anwendungen. Stuttgart: DKV 2000

/Hoffmann et al. 1999/

Hoffmann, E.; Frey, H.; Klipfel, V.: Ökologischer Vergleich verschiedener Heizsysteme für Wohngebäude. EnBW Energie 1999

/IEA 1995/

IEA Heat Pump Center: Industrial Heat Pumps. Final Report from Annex 21 of the Heat Pump Programme. April 1995

/IWP 1996/

Initiativkreis Wärmepumpe (IWP) (Hg.): Arbeitsordner Wärmepumpe. Marketing + Wirtschaft, München 1996

/Kobel 2004/

Kobel, Beat; Ryser Ingenieure AG: „Wärmenutzung aus Abwasserkanälen – Eine regenerative Energiequelle mit großem Potenzial“ (2004)

/Leven et al. 2001/

Leven, B.; Neubarth, J.; Weber, C.: Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen. IER-Forschungsbericht Band 80. Universität Stuttgart 2001 (Auftraggeber: Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg)

/LGA 1999/

Landesgewerbeamt Baden-Württemberg (LGA) Informationszentrum Energie: Umweltwärme für Gebäude und Betrieb – Mittelgroße Wärmepumpenanlagen -. Stuttgart: LGA, 1999

/LGA 2000/

Landesgewerbeamt Baden-Württemberg, IE Informationszentrum Energie (Hg.): Energiesparende Heizung und Trinkwassererwärmung in wärmegeprägten Wohngebäuden (2. Auflage), Stuttgart 2000.

/LGA 2003/

Landesgewerbeamt Baden-Württemberg (LGA) Informationszentrum Energie: Energie sparen durch Wärmepumpenheizanlagen. 4. Auflage. Stuttgart: LGA, 2003

/Müller 2004/

Müller, Ernst A.; Büro eam: „Wärmenutzung aus Abwasserkanälen – Eine regenerative Energiequelle mit großem Potenzial“ (2004)

/Ochsner 2007/

Ochsner, K.: Wärmepumpen in der Heizungstechnik, 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg 2007

/Reiner 1994/

Reiner, G.: Ammoniak-Wärmepumpe für 65 °C Heizwasser. In: Luft und Kältetechnik 1994, Vol. 30, Nr. 11, S. 541 f.

/RWE 1998/

RWE Energie AG: Bau-Handbuch (12. Auflage). Energie-Verlag, Heidelberg 1998.

/VDI 2067-6/

Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinien, VDI 2067 Blatt 6, Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen - Wärmepumpen, September 1998

/WBA 2001/

Wärmeversorgung Binningen AG: „Wärmenutzung aus Abwasser“, Projekteingabe der Wärmeversorgung Binningen AG zum „Energy Globe 2002“

/Weber 1995/

Weber, R.: Ammoniak-Wärmepumpe erschließt Abwärmenutzung. In: Heizung Klima 1995, Vol. 22, Nr. 8, S. 66 f.

/Wirtschaftsministerium BW 2005/

Wirtschaftsministerium BW: Mittelgroße Wärmepumpenanlagen – Nutzung der Umweltwärme für Gebäude und Betrieb, Stuttgart, März 2005

/Ziegler et al. 1994/

Ziegler, F. , Spindler, U. , Alefeld, G.: Wärme-Kälte-Kopplung mit einer Kompressions-Absorptions-Wärmepumpe: Betriebserfahrungen und Einsatzmöglichkeiten. In: DKV TAGUNGSBERICHT 1994, Vol. 21, Nr. 2//PT1, S. 267 f.

12 Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 2-1: | Funktionsschema einer Kompressionswärmepumpe | 7 |
| Abbildung 2-2: | Vergleich Kompressions- und Absorptionswärmepumpe (rechts) | 8 |
| Abbildung 4-1: | Investitionskosten für Wärmepumpen | 25 |
| Abbildung 4-2: | Installationskosten für Wärmepumpen | 25 |
| Abbildung 4-3: | Vergleich des Endenergieverbrauchs pro Nutzenergiebereitstellung | 26 |
| Abbildung 4-4: | Vergleich des Primärenergieverbrauchs pro Nutzenergiebereitstellung | 27 |
| Abbildung 4-5: | CO ₂ -Emissionen nach Installation der Wärmepumpenanlage im Gesamtsystem (Emissionsfaktor Strom: Deutschland-Mix) | 27 |
| Abbildung 4-6: | Übersicht der statischen Amortisationszeiten (Industriepreise) | 28 |
| Abbildung 4-7: | Vergleich der Nutzenergiebereitstellungskosten (Industriepreise) | 29 |
| Abbildung 4-8: | Relativer Endenergieverbrauch der Wärmepumpenanlage | 30 |
| Abbildung 4-9: | Relativer Primärenergieverbrauch der Wärmepumpenanlage | 30 |
| Abbildung 4-10: | Relative CO ₂ -Emissionen der Wärmepumpenanlage | 30 |
| Abbildung 4-11: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall C | 31 |
| Abbildung 4-12: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall C | 32 |
| Abbildung 4-13: | Einsparungen an CO ₂ -Emissionen in Relation zum COP (Mittellast-Mix) - Fall C | 32 |
| Abbildung 4-14: | Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis - Fall C | 33 |
| Abbildung 4-15: | Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell - WP) [Cent/kWh] - Fall C | 34 |
| Abbildung 7-1: | Potenzial zur Wärmebereitstellung für ausgewählte Branchen bis 70 °C | 41 |
| Abbildung 7-2: | Potenzial zur Wärmebereitstellung für ausgewählte Branchen bis 80 °C | 42 |
| Abbildung 7-3: | Potenzial zur Wärmebereitstellung für ausgewählte Branchen bis 100 °C | 43 |
| Abbildung 7-4: | Schematische Darstellung des Wärmepumpeneinsatzes in einem Galvanikbetrieb (stark vereinfachte Darstellung) | 45 |
| Abbildung 7-5: | Prinzipskizze des Wärmepumpeneinsatzes in einem Kunststoff verarbeitenden Betrieb (vereinfachte Darstellung) | 47 |
| Abbildung 9-1: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall A | 51 |
| Abbildung 9-2: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall A | 51 |
| Abbildung 9-3: | Einsparungen an CO ₂ -Emissionen in Relation zum COP - Fall A | 52 |
| Abbildung 9-4: | Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis - Fall A | 52 |
| Abbildung 9-5: | Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall A | 53 |
| Abbildung 9-6: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall B | 54 |
| Abbildung 9-7: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall B | 54 |
| Abbildung 9-8: | Einsparung an CO ₂ -Emissionen in Relation zum COP - Fall B | 55 |
| Abbildung 9-9: | Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis - Fall B | 55 |
| Abbildung 9-10: | Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall B | 56 |
| Abbildung 9-11: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall D | 57 |
| Abbildung 9-12: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall D | 57 |
| Abbildung 9-13: | Einsparungen an CO ₂ -Emissionen in Relation zum COP - Fall D | 58 |
| Abbildung 9-14: | Amortisationszeit in Abhängigkeit des Gaspreises - Fall D | 58 |

| | | |
|------------------------|--|-----------|
| Abbildung 9-15: | Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall D | 59 |
| Abbildung 9-16: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall E | 60 |
| Abbildung 9-17: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall E | 60 |
| Abbildung 9-18: | Einsparungen an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall E | 61 |
| Abbildung 9-19: | Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis - Fall E | 61 |
| Abbildung 9-20: | Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall E | 62 |
| Abbildung 9-21: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall F | 63 |
| Abbildung 9-22: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) Fall F | 63 |
| Abbildung 9-23: | Einsparungen an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall F | 64 |
| Abbildung 9-24: | Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis Fall F | 64 |
| Abbildung 9-25: | Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall F | 65 |
| Abbildung 9-26: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall G | 66 |
| Abbildung 9-27: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall G | 66 |
| Abbildung 9-28: | Einsparung an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall G | 67 |
| Abbildung 9-29: | Amortisationszeit in Abhängigkeit der Gas- und Strompreise - Fall G | 67 |
| Abbildung 9-30: | Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall G | 68 |
| Abbildung 9-31: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Industriepreise) - Fall H | 69 |
| Abbildung 9-32: | Kosteneinsparung in Relation zum COP (Durchschnittskunde) - Fall H | 69 |
| Abbildung 9-33: | Einsparung an CO₂-Emissionen in Relation zum COP - Fall H | 70 |
| Abbildung 9-34: | Amortisationszeit in Abhängigkeit von Gas- und Strompreis - Fall H | 70 |
| Abbildung 9-35: | Differenz der Nutzenergiebereitstellungskosten (konventionell-WP) [Cent/kWh] - Fall H | 71 |
| Abbildung 10.1: | Referenten und Organisatoren des Symposiums am 12. Juni 2008 in Stuttgart | 74 |

13 Tabellenverzeichnis

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| Tabelle 4-1: | Analysierte Best-Practice-Beispiele | 20 |
| Tabelle 4-2: | Technische Daten der analysierten Anlagen | 22 |
| Tabelle 4-3: | Energiepreise | 23 |
| Tabelle 4-4: | CO₂-Emissionsfaktoren | 24 |
| Tabelle 4-5: | Primärenergiefaktoren | 24 |
| Tabelle 4-6: | Annahmen für die Investitionsrechnung | 24 |
| Tabelle 6-1: | Prozessspezifische Beispiele für Anwendungsfälle | 39 |
| Tabelle 7-1: | Wärmespezifische Rahmendaten der Einzelprozesse der Galvanisierung | 46 |
| Tabelle 7-2: | Wärmespezifische Rahmendaten der Einzelprozesse der Kunststoffverarbeitung | 47 |