

# Potentiale hydrothermaler Erdwärme in Deutschland

*Martin Kayser und Martin Kaltschmitt, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendungen, Universität Stuttgart*

<b>Abstract</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Definition der Potentialbegriffe</b> .....	<b>8</b>
2.1 Theoretisches Potential .....	8
2.2 Technisches Potential.....	9
2.3 Wirtschaftliches Potential.....	10
2.4 Erschließbares Potential .....	10
<b>3 Theoretisches und technisches Angebotspotential</b> .....	<b>10</b>
<b>4 Technisch deckbares Nachfragepotential</b> .....	<b>14</b>
4.1 Wärmenachfrage der Haushalte und Kleinverbraucher .....	14
4.1.1 Wärmenachfrage in den alten Bundesländern.....	14
4.1.2 Wärmenachfrage in den neuen Bundesländern.....	18
4.1.3 Zusammenfassung.....	18
4.2 Wärmenachfrage in der Industrie .....	19
4.3 Gesamtes deckbares Potential .....	20
<b>5 Bestehende Fernwärmeversorgung</b> .....	<b>20</b>
<b>6 Zusammenfassung</b> .....	<b>21</b>
<b>7 Literatur</b> .....	<b>23</b>

## **Abstract**

The available potential is one of the mayor criterion concerning the possibilities of the use of geothermal energy resources within the energysystem of Germany. Until now, studies have only analyzed resources and/or reserves of geothermal energy. Those results are not relevant for energypolitical and economic discussions. Therefore the following study describes not only the geothermal heat resources, but the share which can be utilized from the technical and structural (demandside) points of view. The study shows that geothermal energy in Germany has relevant potential, but is only able to cover a small share of the demanded amount of energy.

## **1 Einleitung**

Die Potentiale einer Energiebereitstellung aus regenerativen Energien sind eines der wesentlichen Kriterien für eine energiewirtschaftliche Bewertung. Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel der folgenden Ausführungen, die theoretischen und technischen Potentiale einer Wärmebereitstellung aus hydrothermalen Wärmevorkommen in der Bundesrepublik Deutschland darzustellen.

Das Energieangebot hydrothermalen Erdwärmes in Deutschland wurde bereits vielfach untersucht. Hier sollen deshalb zum einen die bereits erzielten Ergebnisse zusammengefaßt dargestellt werden. Zum anderen soll aber auch das Nachfragepotential in Gebieten mit hydrothermalen Erdwärmevorkommen bestimmt werden und damit die Wärmemenge, die aus hydrothermalen Wärmevorkommen im Energiesystem Deutschland auch genutzt werden kann.

Dazu werden zunächst die Potentialbegriffe definiert. Anschließend werden die verschiedenen Potentiale zusammenfassend für die in Deutschland gegebenen Möglichkeiten einer Nutzung hydrothermalen Energievorkommen dargestellt und diskutiert. Dabei wird ausschließlich auf die theoretischen und technischen Potentiale eingegangen; die wirtschaftlichen und erschließbaren Potentiale werden nicht näher diskutiert, da sie von energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängen und damit einen erheblichen Zeitbezug haben. Da die Nutzung hydrothermalen Erdwärmes in Deutschland mit relativ hohen Kosten verbunden ist und es deshalb sinnvoll sein könnte, für die Verteilung der gewonnenen Wärme bereits bestehende Wärmenetze zu nutzen, werden die hierfür in Deutschland nutzbaren Wärmenetze und die darin verteilten Wärmemengen ebenfalls dargestellt. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefaßt und diskutiert.

## **2 Definition der Potentialbegriffe**

Grundsätzlich kann bei den verfügbaren Potentialen unterschieden werden zwischen den theoretischen, den technischen, den wirtschaftlichen und den erschließbaren Potentialen. Sie werden im folgenden definiert.

### **2.1 Theoretisches Potential**

Das theoretische Potential einer regenerativen Energie beschreibt das innerhalb einer gegebenen Region zu einer bestimmten Zeit bzw. innerhalb eines bestimmten Zeitraumes theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot (z. B. die von der Sonne auf die Erde eingestrahlte Energie, die potentielle Energie des in den Flüssen enthaltenen Wassers, die kinetische Energie des Windes, die in oberflächennahen Erdschichten gespeicherte Energie). Seine Bandbreite resultiert allein aus den Schwankungen des primären Energieangebots bzw. der ge-

gebenen physikalischen Nutzungsgrenzen. Es markiert damit die Grenze des theoretisch realisierbaren Beitrages einer regenerativen Energie zur Energiebereitstellung. Wegen vorhandener technischer, ökologischer, struktureller und administrativer Schranken kann das theoretische Potential meist nur zu sehr geringen Teilen erschlossen werden. Ihm kommt deshalb zur Beurteilung der tatsächlichen Nutzbarkeit erneuerbarer Energien keine praktische Relevanz zu.

## 2.2 Technisches Potential

Das technische Potential regenerativer Energien beschreibt den Anteil des theoretischen Potentials, der unter Berücksichtigung der gegebenen technischen Restriktionen nutzbar ist. Zusätzlich dazu werden i. allg. strukturelle und ökologische Restriktionen, gesetzliche Vorgaben und weitere nicht-technische Restriktionen berücksichtigt, da sie letztlich auch - ähnlich den technisch bedingten Eingrenzungen - zunächst "unüberwindbar" sind. Damit gibt es immer verschiedene technische Potentiale in Abhängigkeit der zugrunde gelegten Technik. Es wird unterschieden hinsichtlich in

- technische Primärenergiepotentiale (z. B. die in heißwasserführenden Aquiferen gespeicherte Wärme)
- technische Sekundärenergiepotentiale (z. B. die thermische Energie am Heizwerksausgang)
- technische Endenergiepotentiale (z. B. thermische Energie beim Endverbraucher) und
- technische Nutzenergiepotentiale (z. B. Energie des heißen Wassers aus der Dusche).

Zusätzlich kann auch unterschieden werden zwischen den

- technischen Angebotspotentialen, die die unter Berücksichtigung ausschließlich technischer Restriktionen bereitstellbare Energie beinhalten (z. B. die hydrogeothermisch bereitstellbare Niedertemperaturwärme) und den
- technischen Nachfragepotentialen, bei denen zusätzlich nachfrageseitige Restriktionen berücksichtigt werden (z. B. die hydrogeothermisch bereitstellbare Niedertemperaturwärme, die auch im Energiesystem Deutschlands genutzt werden kann).

Diese Unterscheidung ist immer dann notwendig, wenn das regenerative Angebotspotential die potentielle Energienachfrage übersteigt. So kann z. B. unter ausschließlicher Berücksichtigung der gegebenen technischen Restriktionen eine Niedertemperaturwärme in Deutschland solarthermisch bereitgestellt werden, die die Nachfrage nach Warmwasser mit Temperaturen unter 100 °C deutlich übersteigt.

Diese so definierten Potentiale sind technische "Erzeugungspotentiale", d. h. die technisch gewinnbare Energie am Ausgang einer definierten Stufe der Wankungskette der jeweiligen erneuerbaren Energie. Von Interesse ist oft aber auch die Energie, die damit z. B. im Energiesystem Deutschlands substituiert werden kann. Bei diesem Substitutionsenergiepotential unterscheidet man die technisch substituierbare End-, Sekundär- und Primärenergie. Zu ihrer Berechnung ist die Energiewandlungskette, mit der ursprünglich die jeweilige Endenergie bereitgestellt wurde, bis zur jeweils betrachteten Energiewandlungsebene (Endenergie, Sekundärenergie, Primärenergie) zurückzuverfolgen.

Die technisch substituierbare Endenergie ist mit dem technischen Endenergiepotential identisch, sofern es sich um elektrische Energie handelt. Die technisch substituierbare Sekundärenergie ist dann der vermiedene Strom am Ausgang des konventionellen Kraftwerks, dessen Stromerzeugung aufgrund der Netzeinspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien vermindert wird. Dementsprechend ist die technisch substituierbare Primärenergie z. B. der Energieinhalt der Kohle, die dadurch nicht mehr gefördert werden muß.

Bei der Wärmebereitstellung berechnet sich die technisch substituierbare Endenergie aus der aus erneuerbaren Energien technisch erzeugbaren Wärme und dem mittleren Nutzungsgrad

der Anlagen, in denen beispielsweise fossile Brennstoffe substituiert werden. Die technisch substituierbare Endenergie ist damit in diesem Fall die technisch substituierbare Brennstoffenergie. Daraus kann durch weiteres Zurückverfolgen der Energiewandlungskette, mit der ursprünglich die Endenergie bereitgestellt wurde, die technisch substituierbare Sekundärenergie und daraus die technisch substituierbare Primärenergie berechnet werden.

### **2.3 Wirtschaftliches Potential**

Unter dem wirtschaftlichen Potential einer regenerativen Energie wird der Anteil des technischen Potentials verstanden, der wirtschaftlich sinnvoll genutzt werden kann. Neben den Parametern, die auch das technische Potential beeinflussen, wird seine Bandbreite daneben sehr stark von den konventionellen Vergleichssystemen und den Energieträgerpreisen beeinflusst. Das wirtschaftliche Potential ist daher und aufgrund der Abhängigkeit des technischen Potentials vom betrachteten Zeitpunkt auch zeitabhängig. Außerdem ist die Wirtschaftlichkeit selbst eine relative Größe, da sie von einer Reihe unterschiedlicher Parameter abhängig ist (u. a. Zinssatz, Abschreibungsdauer, Eigenkapitalanteil). Desweiteren ist zwischen einem wirtschaftlichen Potential aus volks- und aus betriebswirtschaftlicher Sicht zu unterscheiden.

### **2.4 Erschließbares Potential**

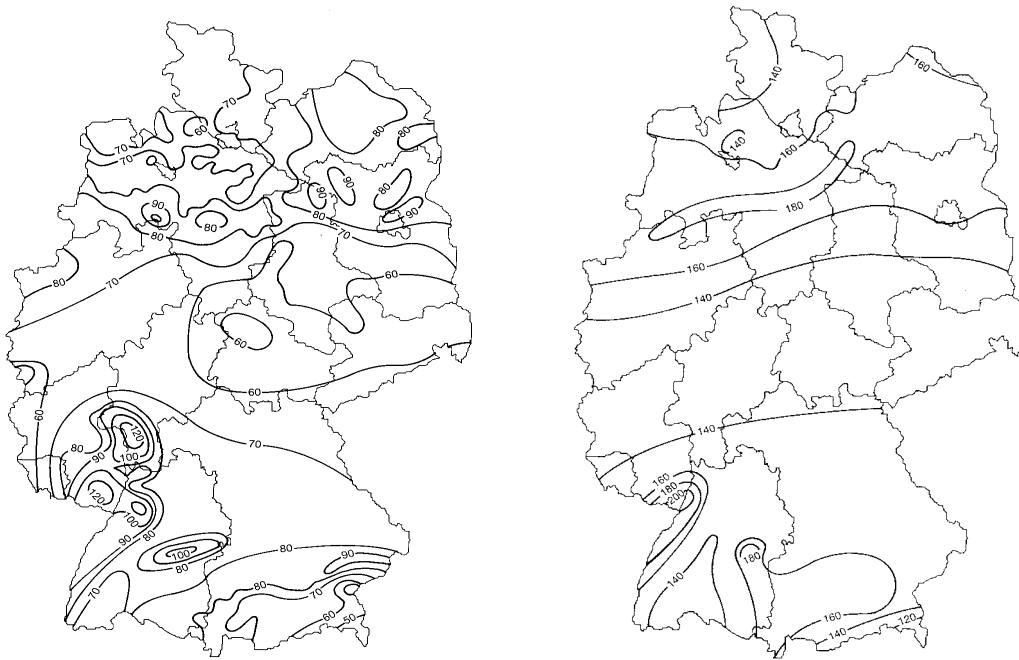
Das erschließbare bzw. Erschließungspotential regenerativer Energien beschreibt den zu erwartenden tatsächlichen Beitrag einer regenerativen Energie zur Energieversorgung. Dieses erschließbare Potential ist in der Regel zumindest zeitweise geringer als das wirtschaftliche Potential; das wirtschaftliche Potential ist nämlich i. allg. nicht sofort, sondern nur innerhalb eines längeren Zeitraums infolge einer Vielzahl unterschiedlichster Restriktionen vollständig erschließbar. Dies liegt u. a. an den begrenzten Herstellkapazitäten, der Funktionsfähigkeit der vorhandenen, noch nicht abgeschriebenen Konkurrenzsystemen sowie einer Vielzahl weiterer Hemmnisse (z. B. mangelnde Information, rechtliche und administrative Begrenzungen). Das Erschließungspotential kann aber auch größer als das wirtschaftliche Potential sein, wenn beispielsweise die betreffende erneuerbare Energie aufgrund administrativer oder sonstiger Maßnahmen subventioniert wird (z. B. 100 Mio. DM-Programm zur Förderung regenerativer Energien des Bundesministeriums für Wirtschaft).

Da die wirtschaftlichen und insbesondere die erschließbaren Potentiale erheblich von den sich u. U. schnell ändernden energiewirtschaftlichen und -politischen Randbedingungen abhängig sind, wird auf diese Potentiale hier nicht weiter eingegangen; es werden ausschließlich die theoretischen sowie verschiedene technische Potentiale diskutiert. Darüber hinaus wird die gegenwärtige Nutzung hydrogeothermaler Energie in Deutschland dargestellt. Damit kann abgeschätzt werden, welchen Beitrag die derzeitige Nutzung hydrogeothermaler Energie zur Deckung der Energienachfrage bereits leistet und welcher Anteil des ausgewiesenen Potentials schon genutzt ist.

## **3 Theoretisches und technisches Angebotspotential**

Als hydrothermale Erdwärmenutzung wird der Gebrauch des energetischen Potentials warmer bis heißer ( $\geq 40\text{ °C}$ ) aus der Erdkruste gewinnbarer oder ausfließender Wässer für Wärmeversorgungsaufgaben bezeichnet.

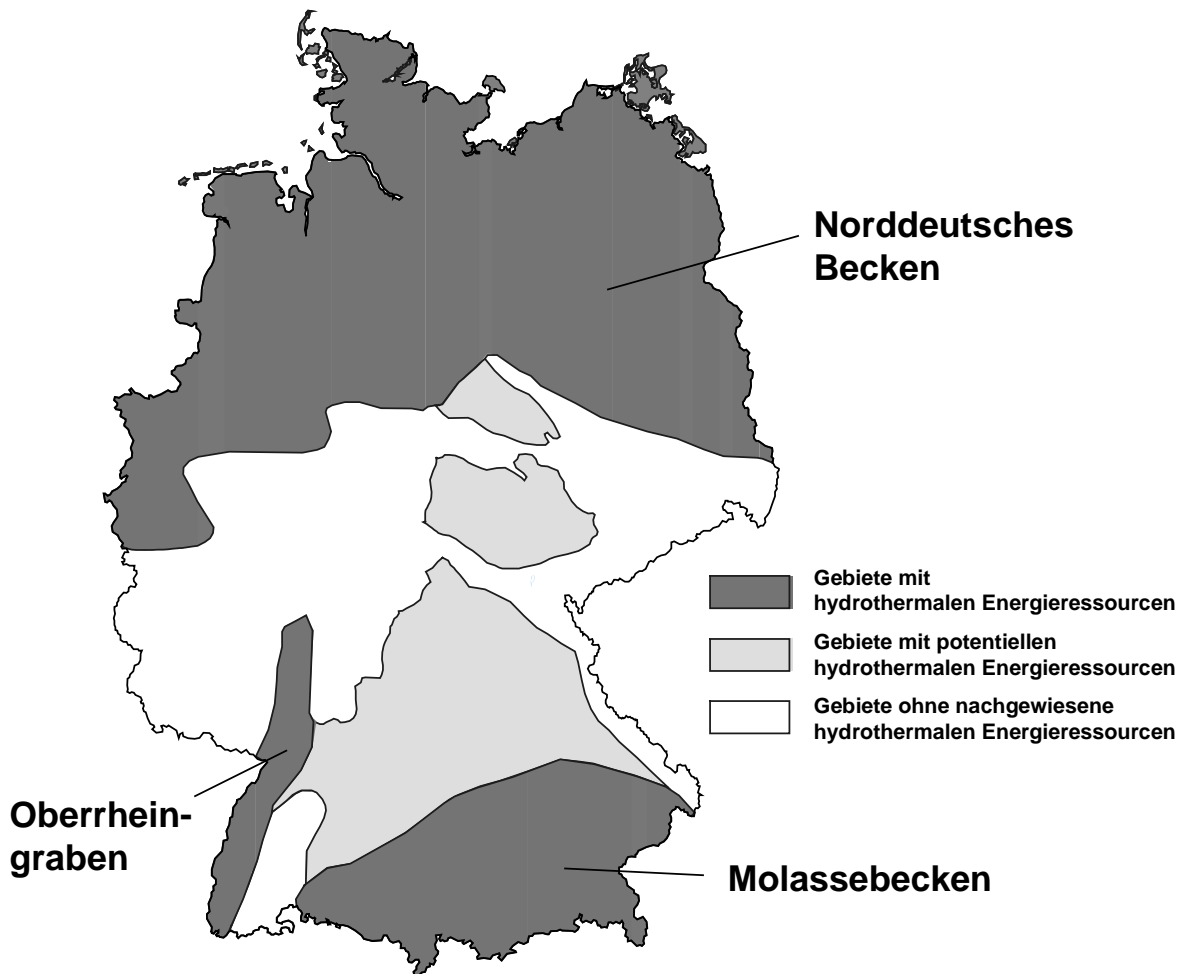
Werden normale Temperaturverhältnisse unterstellt (d. h. ein Temperaturgradient von  $30\text{ mK/m}$ ), ergibt sich für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland ein zugänglicher Energievorrat in bis zu  $7\,000\text{ m}$  Tiefe von etwa  $650\,000\text{ EJ}$  [Rummel, 1992].



**Abbildung 3-1:** Temperaturverteilung in Deutschland in 2000 m (links) und 5 000 m (rechts) Tiefe [Hurtig, 1992]

Die regionale Temperaturverteilung kann aber von den Durchschnittswerten wesentlich abweichen. Abbildung 3-1 zeigt deshalb beispielhaft die Temperaturverteilung in 2 000 und 5000 m unter der Erdoberfläche für Deutschland [Hurtig, 1992]. Auffällig sind die erhöhten Temperaturen im Oberrheingraben, der Schwäbischen Alb südlich von Stuttgart und in der Norddeutsch-Polnischen Senke.

Da sich die trockene Gewinnung der Erdwärme aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten des Wärmetransportes an die Erdoberfläche als schwierig erweist, ist für die Nutzung der Erdwärme das Temperaturniveau nur einer von vielen Parametern. Entscheidend für die Nutzung der Wärme ist unter anderem die Existenz von Aquiferen mit genügend großer Wasserführung. Aufgrund von Wirtschaftlichkeitskriterien ist zudem derzeit eine maximale Tiefe von ca. 3000 m anzusetzen. Solche, für die Nutzung hydrothermaler Erdwärme geeigneten Aquifere sind in Deutschland im wesentlichen in den drei Gebieten: Norddeutsches Becken, Oberrheingraben und süddeutsches Molassebecken bekannt. Abbildung 3-2: zeigt diese Gebiete mit möglichen hydrothermalen Erdwärmevorkommen. Im folgenden wird für die drei Gebiete jeweils das technische Angebotspotential aufgezeigt.



**Abbildung 3-2:** Gebiete mit möglichen hydrothermalen Energievorräten in Deutschland

**Süddeutsches Molassebecken.** Die hydrothermalen Energievorräte im süddeutschen Molassebecken sind in Frisch (1989) detailliert abgeschätzt. Es werden dort die Schichten des Tertiärs, der Kreide und des Malmkarst untersucht. Der grundwasserführende Malmkarst des süddeutschen Molassebeckens zwischen Bodensee im Westen, der Donau im Norden und Osten sowie dem Alpennordrand im Süden gilt als das bedeutendste Reservoir hydrogeothermischer Energievorräte in Deutschland. Er stellt, grob gesehen, eine schräggestellte Karbonat-Tafel dar, die im allgemeinen nördlich der Donau zutage ausstreicht und die Schwäbische und Fränkische Alb bildet. Nach Süd-Südosten taucht sie unter die tertiären Sedimente der Molasse ab, um am Alpennordrand Teufen um 5 500 m unter NN zu erreichen [Frisch, 1989].

Es wird zur Berechnung der technisch gewinnbaren Energievorräte des Malmkarst davon ausgegangen, daß das gesamte Molassebecken im Modell mit einem Raster von Doubletten überzogen wird, wobei der Abstand der einzelnen Bohrungen jeweils etwa 1 000 m beträgt. Dazu werden nur Aquiferbereiche mit einer Temperatur von mehr als 30 °C betrachtet; als Injektionstemperatur wird 15 °C gewählt. Für jede einzelne Doublette werden dann die gewinnbaren Energiemengen und thermischen Leistungen, die am Bohrlochkopf zur Verfügung stehen, abgeschätzt.

Nach Norden wird der Malmkarst mit technisch-wirtschaftlich gewinnbaren Energievorräten durch eine Null-Linie begrenzt, die in etwa die Lage der 30 °C-Isotherme der Temperaturen an der Malmoberkante entspricht. Die südliche Null-Linie ist größtenteils mit dem nördlichen Rand der sogenannten helvetischen Fazies gleichzusetzen. Hier kann aufgrund der geringen hydraulischen Durchlässigkeiten mit keiner nennenswerten Fördermenge gerechnet werden

[Jobmann und Schulz, 1989] Insgesamt wird ein technisches Angebotspotential von 53,6 EJ ausgewiesen [Kaltschmitt, 1995].

In einer weiteren Studie werden in Haenel (1988) auch die Schichten des Tertiärs und der Kreide im süddeutschen Molassebecken untersucht. Das technische Angebotspotential beträgt hier etwa 34,4 EJ [Kaltschmitt, 1995].

Insgesamt ergibt sich für das süddeutsche Molassebecken ein technisches Angebotspotential von etwa 88 EJ (vergleiche Tabelle 3-1).

**Oberrheingraben.** Im Oberrheingraben sind die für die Nutzung hydrothermalen Erdwärme interessantesten Aquifere der Buntsandstein, der obere Muschelkalk sowie im Südteil des Grabens der Hauptrogenstein des Jura. Insgesamt kann von einem technischen Angebotspotential von etwa 60 EJ ausgegangen werden (vergleiche Tabelle 3-1) [Haenel, 1988]. Im Gegensatz zum süddeutschen Molassebecken ist mit salzhaltigen Wässern zu rechnen, wobei der Salzgehalt mit der Tiefe zunimmt.

**Norddeutsches Becken.** Die Quantifizierung der zu erwartenden Potentiale für das Gebiet des Norddeutschen Beckens, welches mit ca. 100 000 km<sup>2</sup> ein Viertel der deutschen Landesfläche und einen etwa viermal größeren Raum als das süddeutsche Molassebecken und der Oberrheingraben zusammen einnimmt, wurde bisher noch nicht zusammenhängend und umfassend untersucht. Die besonders in Nordostdeutschland untersuchten Nutzhorizonte sind ausschließlich Porenspeicher (Sandsteine) des Mesozoikums. Praktische Bedeutung wird aufgrund ihrer regionalen Verbreitung, relativ konstanten Mächtigkeit und lithologischen Ausbildung insbesondere den Schichten der Unterkreide, des unteren und mittleren Jura (Aalen, Pliensbach, Hettang) des oberen Keuper (Rhät) und dem mittleren Buntsandstein beigemessen. Für den Ostteil des Beckens kann davon ausgegangen werden, daß nördlich der Linie Magdeburg-Berlin-Cottbus geothermische Schichtwässer in flächenhafter Verbreitung mit Temperaturen von 40 bis 100 °C in Tiefen von 1 000 bis 2 500 m vorhanden sind [Schön, 1991; Rockel, 1991]. Im NW-Teil des Beckens wurden besonders die Unterkreide-Sandsteine als potentielle Nutzaquifere untersucht [Haenel, 1988].

Aufbauend darauf erfolgt in Kaltschmitt (1995) eine Abschätzung der insgesamt vorhandenen technischen Angebotspotentiale. Die Fläche mit thermalwasserführenden Aquiferen, die Mindestforderungen an eine geothermische Nutzung genügen (z. B. Thermalwassertemperatur > 40°C; Förderrate > 50 m<sup>3</sup>), wird mit 50 000 km<sup>2</sup> angenommen; das entspricht der Hälfte der Gesamtfläche des Norddeutschen Beckens. Es wird von einer mittleren Thermalwassertemperatur für dieses Gebiet von 60 °C ausgegangen und eine Injektionstemperatur nach der Nutzung von 20 °C sowie eine Doublettenförderung unterstellt. Daraus ergibt sich bei einer durchschnittlichen Zirkulationsmenge je Doublette von 75 m<sup>3</sup>/h einer Lebensdauer von 50 Jahren und einer jährlichen Mindestnutzung von 5 000 h/a bei einer Anzahl von 17 000 Doubletten ein technisches Potential von etwa 50 EJ (vergleiche Tabelle 3-1).

**Zusammenfassung.** Eine Zusammenfassung der technischen Potentiale für die drei hydrothermalen Hauptverbreitungsgebiete gibt Tabelle 3-1. Danach ergibt sich, daß in Deutschland ein Potential der hydrogeothermalen Erdwärmenutzung von rund 200 EJ gegeben ist. Wird unterstellt, daß diese Wärme im Verlauf von 100 Jahren genutzt werden soll, entspricht dies einer jährlich bereitstellbaren Wärmeenergie von rund 1 980 PJ/a. Bezogen auf den Endenergieverbrauch in Deutschland von knapp 9 200 PJ in 1995 [VDI, 1996] entspricht dies etwa einem Fünftel. Damit liegt das technischen Angebotspotential hydrothermalen Erdwärme durchaus in einer energiewirtschaftlich relevanten Größenordnung.

	<b>Fläche in km<sup>2</sup></b>	<b>Technisches Potential in EJ</b>
Süddeutsches Molassebecken	20 000	88
Norddeutsches Becken	100 000	50
Oberrheingraben	5 000	60
<b>Deutschland gesamt</b>	<b>125 000</b>	<b>198</b>

**Tabelle 3-1:** Technische Potentiale einer hydrothermalen Erdwärmesnutzung in Deutschland

#### **4 Technisch deckbares Nachfragepotential**

Aufgrund der Temperaturen der erschlossenen bzw. der nutzbaren Vorkommen kann in Deutschland hydrothermale Erdwärmes nur im Temperaturbereich bis etwa 100 °C, also für die Bereitstellung von Niedertemperaturwärmes genutzt werden. Somit kommt in erster Linie die Bereitstellung von Raumwärmes für Haushalte und Kleinverbraucher in Frage. Darüber hinaus können auch Industriebetriebe mit einer Nachfrage an Niedertemperaturwärmes versorgt werden.

##### **4.1 Wärmesnachfrage der Haushalte und Kleinverbraucher**

Die Nutzung hydrothermalen Erdwärmes setzt eine regionale Infrastruktur mit einer genügend hohen Siedlungsdichte und eine entsprechende Wärmesnachfrage voraus. Neben einer effizienten Bereitstellung von Fernwärmes spielen dabei auch der Transport und die Verteilung der Fernwärmes eine bedeutende Rolle. Im folgenden wird ein Ansatz zur Berücksichtigung von Siedlungsstrukturen bei der Ermittlung der technisch mit hydrothermalen Erdwärmes deckbaren Nachfrage nach Niedertemperaturwärmes entwickelt. Aufgrund der verfügbaren Datenlage wird die deckbare Nachfrage für die alten und neuen Bundesländer getrennt ermittelt.

##### **4.1.1 Wärmesnachfrage in den alten Bundesländern**

Für eine möglichst genaue Ermittlung der Wärmesnachfrage ist eine Einbeziehung der Siedlungsstrukturen hilfreich. Erste Ansätze hierzu finden sich in Roth (1980), wo der Zusammenhang zwischen der Siedlungsstruktur und den Wärmesverteilungssystemen untersucht wird. Dabei wird die Bebauung der Bundesrepublik Deutschland mit sogenannten Siedlungstypen klassifiziert. Darauf aufbauend werden in der "Untersuchung einer zum Heizöl alternativen Energiebedarfsdeckung für den Rhein-Neckar-Raum" [Winkens, 1984] die von Roth (1980) entwickelten Siedlungstypen innerhalb des Untersuchungsgebietes entsprechend der folgenden Aufteilung detailliert analysiert.

Unter "Streusiedlungen" (Typ 1) werden lockere, unregelmäßige Bebauungen, meist mit kleinen Gebäuden, vor allem in Stadtrandgebieten und Vororten, verstanden. "Einfamilienhaussiedlungen" (Typ 2) finden sich an Stadträndern und in Vorortgemeinden. Sie zeichnen sich häufig durch ein dichtes, geometrisches Erschließungsnetz aus. "Dorfkerne" (Typ 3) weisen eine dichte Bebauung mit kleinen, niedrigen Häusern auf. Meist sind dies Dörfer im ländlichen Raum oder ehemalige Dorfkerne mit eigenen Ortsnamen in größeren Städten. "Reihenhaussiedlungen" (Typ 4) sind fast immer engmaschig, geometrisch erschlossen, an Stadträndern oder in Vororten gelegen. Der Siedlungstyp "Wohnblocks 3- bis 5-geschossig" (Typ 5) beinhaltet überwiegend mittelgroße Wohnbauten, die größer sind als bei den vier zuvor beschriebenen Siedlungstypen; das Erschließungsnetz ist relativ grobmaschig. "Hochhäuser und große Zeilenbauten" (Typ 6) sind durch große Gebäudebestände und ein



großmaschiges Erschließungsnetz gekennzeichnet. Meist sind diese in Randlagen von Städten als sogenannte Trabantenstädte angelegt. In den Siedlungstyp "Städtische Randbebauung" (Typ 7) fallen städtische Mehrfamilienhäuser. Sie befinden sich fast ausschließlich in Großstädten in Gebieten, die an den Innenstadtbereich angrenzen. Sie weisen geschlossene Baublocks, Innenhöfe und ein regelmäßiges Straßennetz auf. Citybauten aus der Zeit der Jahrhundertwende mit sehr hoher Dichte im Innenstadtbereich, die meistens an historische Altstädte angrenzen, werden in der Gruppe "City-Bebauung" (Typ 8) hoher Dichte zusammengefaßt. Unter "Historischen Altstädten" (Typ 9) werden mittelalterliche Stadtkerne hoher Dichte mit geschlossener Bebauung, verwinkelten Straßen und zahlreichen Kirchen verstanden. "Große Sonderbauten" (Typ 10) sind große Einzelbauten mit ungewöhnlichen Grundrissen, die meist freistehend gebaut werden.

Die oben aufgeführten Siedlungstypen von Roth (1980) werden für die weiteren Ermittlungen in vier Kategorien, entsprechend der Eignung für eine Nah- bzw. Fernwärmeversorgung aggregiert; hier wird die Besiedlungsdichte als Kriterium gewählt.

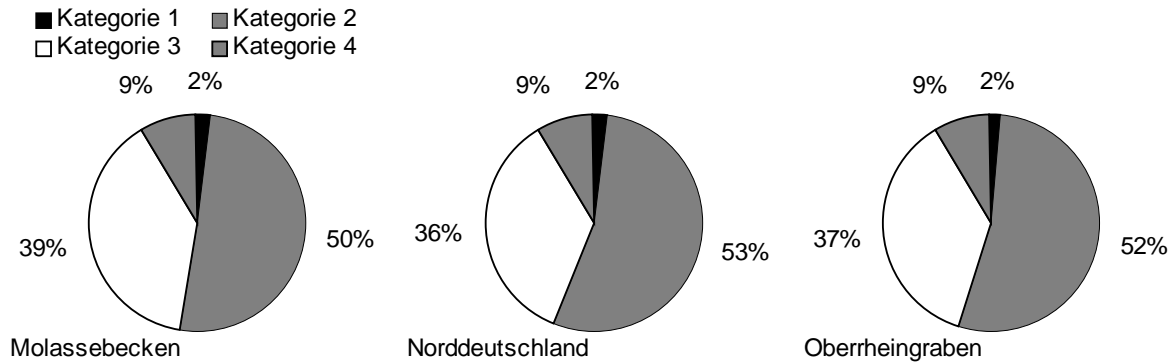
"Streusiedlungen" (Typ 1) kommen für eine Einbindung in Fern- und Nahwärmesysteme normalerweise nicht in Betracht, es sei denn, lokal stehen sehr günstige Wärmequellen zur Verfügung; sie werden in der Kategorie 1 bilanziert. "Reihenhaussiedlungen" (Typ 4), "Dorfkerne" (Typ 3) und "Einfamilienhaussiedlungen" (Typ 2) haben dagegen aufgrund einer höheren Siedlungsdichte eine entsprechend höhere Wärmenachfrage. Sie werden zur Kategorie 2 zusammengefaßt. "Historische Altstädte" (Typ 9), "Stadtrandbebauungen aus Mehrfamilienhäusern in geschlossenen Baublocks" (Typ 7) sowie "3- bis 5-geschossige Wohnblocks" (Typ 5) weisen jeweils relativ geringe Gebäudeabstände auf und bilden deshalb die Kategorie 3. Günstigste Bedingungen für die Wärmeverteilung sind aufgrund der hohen Wärmenachfrage auf relativ geringem Raum im Falle "großer Sonderbauten" (Typ 10), bei "Hochhäusern und großen Zeilenbauten" (Typ 6) sowie bei der "Citybebauung" hoher Dichte (Typ 8) gegeben. Diese Siedlungstypen werden in der Kategorie 4 zusammengefaßt. Damit ergeben sich folgende, nach Eignung geordnete Kategorien:

- Kategorie 1: Siedlungstyp 1                      kaum geeignet
- Kategorie 2: Siedlungstypen 2, 3, 4            geeignet
- Kategorie 3: Siedlungstypen 5, 7, 9            gut geeignet
- Kategorie 4: Siedlungstypen 6, 8, 10        sehr gut geeignet

Mit Hilfe eines in Schaumann (1996) vorgestellten Modells lassen sich für alle Gemeinden der alten Bundesländer anhand eines Kriterienkataloges aus Parametern der Arbeitsstättenzählung, der Gebäude- und Wohnungszählung und der Volkszählung aus dem Jahr 1987 die jeweiligen Anteile der verschiedenen Kategorien an der Gesamtbebauung ermitteln. Weiterhin kann die Art der Wärmeversorgung der Gebäude bestimmt werden [Bayern, 1994; Bremen, 1994; Niedersachsen, 1994; Hamburg, 1992; Hessen, 1993; NRW, 1994; Holstein, 1994; Pfalz, 1994; Baden, 1994]. Im folgenden werden die Ergebnisse für die drei Gebiete mit hydrothermalen Energievorkommen (Süddeutsches Molassebecken, Oberrheingraben, Norddeutsches Becken, vgl. Abbildung 3-2:) entsprechend der oben dargestellten Aufschlüsselung ausgewertet.

In Abbildung 4-1 sind die Anteile der Kategorien an den Wohnflächen in den jeweiligen Regionen dargestellt. Die Verteilung der Wohnflächen zeigt jeweils für die Kategorie 2 ein Maximum.

In der Region Molassebecken beträgt der Anteil der Kategorie 2 50 %, in der Region Norddeutschland 53 % und in der Region Oberrheingraben etwa 52 %.



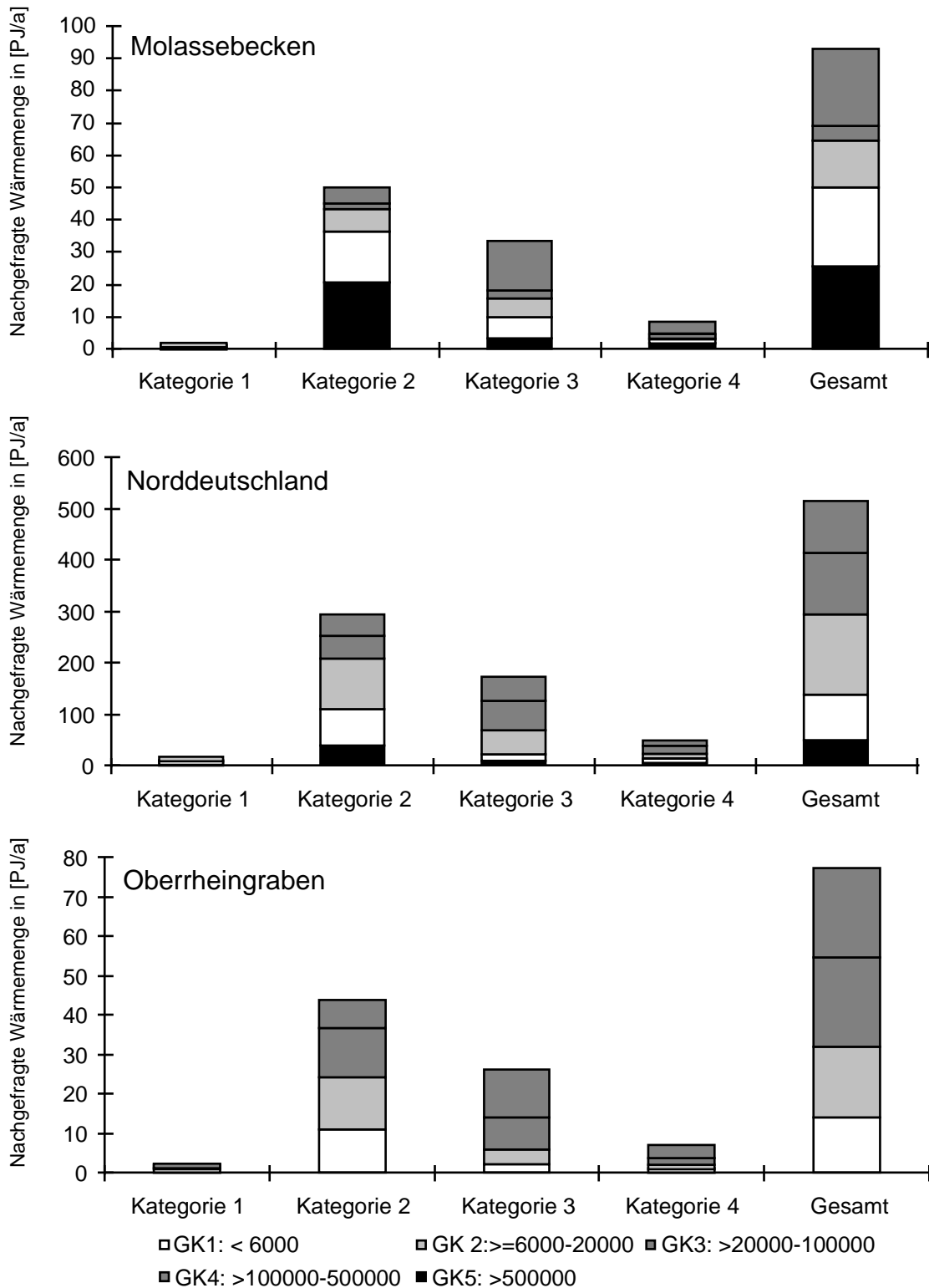
**Abbildung 4-1:** Anteile der nach Eignung für eine zentrale Wärmeversorgung aggregierten Kategorien an den Wohnflächen der Regionen mit hydrothermalen Energievorkommen

Der Anteil der Kategorie 3 beträgt in den drei Regionen zwischen 35 % und 39 %. Damit vereinen diese beiden Kategorien nahezu 90 % der Wohnflächen in den Regionen auf sich, die Kategorien 1 und 4 haben bezüglich der Wohnflächen nur eine untergeordnete Bedeutung (etwa 2 bzw. 9 %).

Auf Basis der zuvor beschriebenen Verteilung der Wohnflächen kann die Wärmenachfrage für Raumwärme der Haushalte nach Regionen ermittelt werden. Da für die aus Siedlungstypen gebildeten Kategorien die entsprechenden Angaben nicht vorliegen, wird eine durchschnittliche Gebäudeinnentemperatur nach der VDI 2067 angesetzt und mit Hilfe eines in Winkens (1994) vorgestellten Verfahrens eine Berechnung der Wärmetransmissionen durchgeführt. Dieses Nachweisverfahren orientiert sich an der Wärmeschutzverordnung und geht von den Wärmeverlusten der Außenflächen der Gebäude aus. Mit diesen Annahmen wird die nachgefragte Wärmemenge der Regionen ermittelt. Ein Vergleich der nachgefragten Wärme bezogen auf Größenklassen der Gemeinden und Städte spiegelt die Siedlungsstrukturen der Gebiete wider. In Abbildung 4-2 werden Gemeinden und Städte mit weniger als 6 000 Einwohnern (GK 1), 6 000 bis 20 000 Einwohnern (GK 2), 20 000 bis 100 000 Einwohnern (GK 3), 100 000 bis 500 000 Einwohnern (GK 4) und mit mehr als 500 000 Einwohnern (GK 5) ausgewiesen.

Es zeigt sich beispielsweise, daß in der Region Molassebecken die Wärmenachfrage der Größenklasse 4 mit nur etwa 8 % an der gesamten in der Region nachgefragten Wärme relativ gering ist. Gleiches gilt für die Wärmenachfrage in der Region Norddeutschland innerhalb der Größenklasse 1; dort beträgt dieser Anteil an der gesamten nachgefragten Wärme im Gebiet nur etwa 10 %. In der Region Oberrheingraben dagegen gibt es keine Städte der Größenklasse 5.

Für die weitere Untersuchung wird davon ausgegangen, daß sich die Kategorien 3 und 4 vollständig und 50 % der Kategorie 2 für eine Fernwärmeversorgung eignen. Zusammenfassend lassen sich somit nachgefragte Wärmemengen für das Gebiet des Molassebeckens von 66 PJ/a, für das Gebiet Norddeutschland von 355 PJ/a und für das Gebiet Oberrheingraben von 54 PJ/a angeben.



**Abbildung 4-2:** Nachgefragte Wärmemenge nach Regionen, Größenklassen und Kategorien (1987)

Um einen aktuellen Stand zu erhalten, müssen zusätzlich die Veränderungen der Wohnungsstrukturen seit 1987) bis zum Bezugsjahr 1997 berücksichtigt werden. In Eckerle (1995) wird der Wohnflächenbestand für das Jahr 1987 mit  $2\,256 \times 10^6 \text{ m}^2$  beziffert. Davon entfallen auf die Region Molassebecken 6,9 %, auf die Region Norddeutschland 37,3 % und auf die Region Oberrheingraben 5,5 %.

Der Zuwachs an Wohnfläche betrug von 1987 bis 1992 rund  $101 \times 10^6 \text{ m}^2$  für Einfamilienhäuser,  $887 \times 10^6 \text{ m}^2$  für Mehrfamilienhäuser und  $44 \times 10^6 \text{ m}^2$  für Nichtwohngebäude.

Der spezifische Wärmeleistungsbedarf für Gebäude, die nach 1987 gebaut wurden, beträgt rund  $68 \text{ W/m}^2$  für Einfamilienhäuser, und etwa  $54 \text{ W/m}^2$  für Mehrfamilienhäuser und Nichtwohngebäude [Eckerle, 1995]. Es ergibt sich daraus eine zusätzlicher Wärmenachfrage für die zwischen 1987 und 1992 gebauten Gebäude von 50,4 PJ/a. Wird von einem regional gleichmäßig verteiltem Zubau in Deutschland ausgegangen, ergibt sich unter Beibehaltung der prozentualen Anteile der drei Regionen an der Gesamtwohnfläche in Deutschland ein Zuwachs der Nutzenergienachfrage für Raumwärme für die Region Molassebecken von 3,5 PJ/a, für die Region Norddeutschland von 18,7 PJ/a und für die Region Oberrheingraben von 2,8 PJ/a für das Jahr 1992. Weiterhin beträgt der Nettozubau an Gebäudefläche nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (1995) von 1992 bis 1993 etwa 1,6 %. Ausgehend von dieser jährlichen Steigerungsrate bis 1997 ergeben sich als nachgefragte Wärmemengen für das Bezugsjahr 1997 für die Region Molassebecken 75 PJ/a, für die Region Norddeutschland 405 PJ/a und für die Region Oberrheingraben 61 PJ/a.

#### 4.1.2 Wärmenachfrage in den neuen Bundesländern

Zur Einschätzung der in den neuen Bundesländern nachgefragten Nutzenergie für Raumwärme ist es notwendig, den bisher nicht betrachteten östlichen Teil der für die Nutzung hydrothormaler Erdwärme in Frage kommenden norddeutschen Tiefebene zu berücksichtigen. Hierbei handelt es sich um das Land Mecklenburg-Vorpommern und Teile der Länder Sachsen-Anhalt und Brandenburg (vergleiche Abbildung 3-2:). Eine Einbeziehung der Siedlungsstrukturen ist hier aufgrund von nicht verfügbarer Daten nicht möglich. Nach Angaben für das Jahr 1993, die die z.Zt. aktuellste Datenbasis darstellen, betrug die Gesamtwärmenachfrage für Raumwärme im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher in Mecklenburg-Vorpommern 67 PJ/a, in Sachsen-Anhalt 112 PJ/a und in Brandenburg 73 PJ/a [Anhalt, 1995A; Brandenburg, 1994; Vorpommern, 1995; Statistisches Bundesamt, 1995].

Mit Hilfe statistischer Erhebungen der einzelnen Länder ist es möglich, die Wohn- und Nutzfläche der Haushalte und Kleinverbraucher in den Regionen mit nutzbaren hydrothermalen Erdwärmevorkommen zu bestimmen. Dies sind aus dem Bereich Haushalte und Kleinverbraucher 100 % des Gesamtbestandes an Gebäuden im Land Mecklenburg-Vorpommern, etwa 16 % im Land Sachsen-Anhalt und etwa 71 % im Land Brandenburg [Brandenburg, 1996; Anhalt, 1995B]. Somit ergibt sich für die Gebiete mit hydrothermalen Erdwärmevorkommen im Bereich der nordostdeutschen Tiefebene, eine jährliche Steigerung der Wohnfläche von jährlich 0,3 % vorausgesetzt, im Jahr 1997 eine Gesamtwärmenachfrage der Haushalte und Kleinverbraucher von 138 PJ/a.

#### 4.1.3 Zusammenfassung

Für die Ermittlung der gesamten Wärmenachfrage ist es notwendig, neben der Raumwärme auch die Prozeßwärme (u.a. für Brauchwasser, technische Geräte) zu berücksichtigen. In Deutschland betrug der Anteil der Prozeßwärme für Haushalte und Kleinverbraucher (einschl. Warmwasser) an der gesamten nachgefragten Nutzwärme (Raumwärme und Prozeßwärme) im Jahr 1995 etwa 12 % (ohne Strom) [VDI 1997]. Die bisher ermittelte Nutzenergienachfrage für Raumwärme muß dementsprechend um die Nutzenergienachfrage für Prozeßwärme ergänzt werden.

Insgesamt ergibt sich dann für Deutschland in den verschiedenen Regionen im Jahr 1997 eine jährlich nachgefragte Nutzwärmemenge im Sektor Haushalte und Kleinverbraucher von 85 PJ/a im Gebiet Molassebecken, 617 PJ/a im Gebiet Norddeutschland und 69 PJ/a im Gebiet Oberrheingraben.

#### 4.2 Wärmenachfrage in der Industrie

Die Nachfrage an Wärme mit einem Temperaturniveau unter 100 °C für Raum- und Prozeßwärme im Industriesektor wird in Hofer (1994) abgeschätzt. Tabelle 4-1 zeigt den prozentualen Anteil der Wärmenachfrage unter 100 °C an der Gesamtwärmenachfrage der verschiedenen Branchen.

<b>Industriesektor</b>	<b>Wärme unter 100°C [%]</b>
Nahrungs- und Genußmittelgewerbe	45
Investitionsgüter produzierendes Gewerbe	40
Textilgewerbe	100
Zellstoff- und Papier- und Pappeerzeugung	20
Chemische Industrie	13
Gewinnung und Verarbeitung von Steinen und Erden	40
Mineralölverarbeitende Industrie	10

**Tabelle 4-1:** Anteil der Wärmemenge unter 100 °C an der gesamten nachgefragten Wärme der verschiedenen Industriesektoren [Hofer, 1994]

Ausgehend von Untersuchungen der statistischen Landesämter ist es möglich, die Gesamtenergienachfrage der entsprechenden Industriesektoren in den einzelnen Bundesländern zu ermitteln. Da nicht die gesamten Landesflächen der Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern in Gebieten mit hydrothermale Potential liegen, ist weiterhin eine Eingrenzung der Gesamtenergienachfrage der Industriesektoren innerhalb der Länder auf Gebiete mit möglicher hydrothermalen Nutzung notwendig. Da eine ausreichend detaillierte, regionale Datenbasis bezüglich der Wärmenachfrage im Industriesektor nicht gegeben ist, wird hier eine Näherung über die Besiedlungsdichte vorgenommen. Hierfür wird zunächst ermittelt, wie groß der prozentuale Anteil der Einwohner der einzelnen Bundesländer in Gebieten mit hydrothermalen Erdwärmenvorkommen bezogen auf die Anzahl aller Einwohner ist. Die Gesamtenergienachfrage aller Industriesektoren in den einzelnen Bundesländern wird dann gemäß dem prozentualen Anteil der Bevölkerung in den hydrothermal nutzbaren Gebieten bestimmt. Im letzten Schritt wird die so errechnete nachgefragte Wärmemenge auf der Basis der Zahlenangaben in Tabelle 4-2, auf den Anteil der Wärmemenge mit einem Temperaturniveaus unter 100 °C reduziert.

Insgesamt ergibt sich für Deutschland in den verschiedenen Regionen im Jahr 1994 eine nachgefragte Nutzwärmemenge im Industriesektor von 16 PJ im Gebiet Molassebecken, 172 PJ im Gebiet Norddeutschland und 19 PJ im Gebiet Oberrheingraben [Anhalt, 1996; Bayern, 1996; Berlin, 1996; Brandenburg, 1996; Bremen, 1996; Hamburg, 1996; Hessen, 1996; Niedersachsen, 1996; Pfalz, 1996; Mecklenburg, 1996; NRW, 1996; Baden, 1996; Holstein, 1996]. Nach Eckerle (1995) wird ein jährlicher Rückgang der gesamten End-Energienachfrage der Industrie von 0,5 % ausgewiesen. Ausgehend davon, daß sich die Nachfrage auf einem Temperaturniveau unter 100 °C analog entwickeln würde, verändert sich die Wärmenachfrage bis zum Jahr 1997 nur unwesentlich (1%).

### 4.3 Gesamtes deckbares Potential

Es zeigt sich sowohl für Haushalte und Kleinverbraucher als auch für die Industrie, daß aufgrund der großen angebotsseitigen Wärmemengen das Potential zur Nutzung hydrothormaler Erdwärme in Deutschland nicht durch das verfügbare Angebot, sondern durch nachfrageseitige Restriktionen eingeschränkt wird.

Insgesamt beträgt die nachgefragte Nutzwärme mit einem Temperaturniveau unter 100 °C in den Sektoren Haushalte und Kleinverbraucher sowie Industrie in den Gebieten mit nachgewiesenen hydrothormalen Erdwärmevorkommen Deutschlands 978 PJ/a. Die Aufteilung auf die verschiedenen Gebiete sieht wie folgt aus:

Molassebecken:	101 PJ
Norddeutschland:	789 PJ
Oberrrheingraben:	88 PJ

Bezogen auf die End-Energienachfrage in Deutschland in 1995 von rund 9 200 PJ entspricht dies einem Anteil 10,6 %.

### 5 Bestehende Fernwärmeversorgung

Aufgrund der hohen Bohrkosten bzw. aufgrund der zum Teil daraus resultierenden hohen Gesamtinvestitionen für die Erstellung hydrothormaler Nutzungsanlagen ist der Verkauf großer Wärmemengen während des Anlagenbetriebes zwingend erforderlich. Außer durch die Versorgung eines industriellen Abnehmers mit hoher Wärmenachfrage ist dies nur durch eine Anbindung an Nah- oder Fernwärmenetze zu realisieren. Geothermieanlagen konkurrieren jedoch nicht nur mit fossil gefeuerten Heizanlagen, sondern auch oder sogar verstärkt mit dezentralen Wärmebereitstellungssystemen. Diese benötigen keine kostenintensiven Nah- und Fernwärmenetze. Die Einbindung von Geothermieanlagen in bereits bestehende Wärmenetze wäre deshalb aus Kostengründen ein wesentliches Einsatzkriterium für die verstärkte Nutzung hydrothormaler Erdwärmevorkommen.

Die zur Zeit bestehenden Anlagen für die Wärmeversorgung mittels Fern- bzw. Nahwärme wird dem Hauptbericht der Fernwärmeversorgung (Stand 1995) entnommen [AGFW, 1997]. Da dort die Einspeisetemperaturen der Wärmetransportmedien nicht ausgewiesen sind, wird hier näherungsweise davon ausgegangen, daß sich wasserführende Fern- und Nahwärmenetze für eine Einspeisung hydrothormaler Erdwärme eignen; dampfbetriebene Netze aufgrund der erforderlichen höheren Temperaturen jedoch nicht. Diese Näherung ist zulässig, da wasserbetriebene Fern- bzw. Nahwärmenetze in Deutschland gleitend mit maximal 140 °C betrieben werden [Kraaz, 1996]. Außerdem wird davon ausgegangen, daß Geothermieanlagen in Deutschland immer mit fossil gefeuerten Spitzenlastanlagen ausgestattet werden. Die notwendigen Einspeisetemperaturen über 100 °C können somit prinzipiell gedeckt werden.

Analog zu der Untersuchung der Wärmenachfrage im Industriesektor (s. Abschnitt 4.2) werden für die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern nur die in Gebieten mit hydrothormalen Potential installierten Fernwärmenetze berücksichtigt. [AGFW, 1997].

Unter Berücksichtigung von Netzverlusten (von 7 bis 16 %) und Ausnutzungsdauern (von 1 316 bis 2 288 h/a) der verschiedenen Netze ergibt sich aus dem vorliegenden Datenmaterial [AGFW, 1997] für das Gebiet Molassebecken eine durch Fern- und Nahwärmenetze verteilte Wärmemenge von 15,2 PJ, für das Gebiet Norddeutschland von 169 PJ und für das Gebiet Oberrrheingraben von 7,7 PJ.

Die relativ große jährliche Wärmemenge von 169 PJ für das Gebiet Norddeutschland resultiert aus dem dichten Versorgungsnetz bei gleichzeitig höherer Ausnutzungsdauer der

Netze (bezogen auf den Anschlußwert) in den neuen Bundesländern. Darüber hinaus werden in Berlin, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein und Niedersachsen relativ hohe Wärmemengen in Nah- und Fernwärmenetze eingespeist.

Weiterhin werden in Tabelle 5-1 die eingespeisten Gesamtwärmemengen der Fern- und Nahwärmenetze nach 5 Kategorien unterteilt. Die Aufteilung faßt in den verschiedenen Gebieten jeweils Anlagen mit Einspeiseleistungen unter 5 MW, von 5 bis 10 MW, 10 bis 15 MW, 15 bis 20 MW sowie über 20 MW zusammen. Es zeigt sich, daß im Gebiet Molassebecken etwa 25 % und im Gebiet Oberrheingraben etwa 46,2 % der gesamten Fern- und Nahwärmemenge von Heizzentralen mit einer Leistung unter 20 MW eingespeist werden, im Gebiet Norddeutschland sind es hingegen nur etwa 7,5 %.

	<5 MW [PJ/a]	5-10 MW [PJ/a]	10-15 MW [PJ/a]	15-20 MW [PJ/a]	> 20 MW [PJ/a]	Summe [PJ/a]
Molassebecken	1,1	0,7	1,5	0,5	11,4	15,2
Norddeutschland	2,7	2,7	4,9	2,4	156,5	169,2
Oberrheingraben	0,2	1,2	1,9	0,3	4,1	7,7
<b>Deutschland gesamt</b>	<b>4,0</b>	<b>4,6</b>	<b>8,3</b>	<b>3,2</b>	<b>172,0</b>	<b>192,1</b>

**Tabelle 5-1:** Verteilte Gesamtwärmemenge von Nah- und Fernwärmenetzen mit verschiedenen Einspeiseleistungen in den einzelnen Gebieten [AGFW, 1996]

## 6 Zusammenfassung

Schon frühere Arbeiten haben gezeigt, daß in Deutschland das theoretische Angebotspotential einer Nutzung hydrothermalen Erdwärme den Endenergieverbrauch in Deutschland von 9 200 PJ deutlich übersteigt, es liegt, eine Tiefe von 7 000 m vorausgesetzt bei rund 650 000 000 PJ (Rummel et al., 1992). Auch das technische Angebotspotential ist, wie diese Ausführungen zeigen von energiewirtschaftlicher Relevanz. Es liegt, eine 100-jährige Nutzungsdauer unterstellt, bei rund 1 980 PJ/a und damit bei ca. 20 % des derzeitigen Endenergieverbrauchs in Deutschland. Dieses Potential ist jedoch aufgrund geologischer Gegebenheiten nur im Norddeutschen Becken, im süddeutschen Molassebecken und am Oberrheingraben verstärkt nutzbar; in anderen Gegenden der Bundesrepublik Deutschland sind die Möglichkeiten einer hydrothermalen Energiebereitstellung dagegen nur sehr eingeschränkt. Insgesamt übersteigt das technische Angebotspotential die Nachfrage nach Niedertemperaturwärme in Deutschland deutlich, wie die zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse dieser Potentialanalyse in Tabelle 6-1 zeigt.

	Molassebecken	Norddeutsches Becken	Oberrheingraben	Summe
Theoretisches Angebotspotential	104 000 000 PJ	520 000 000 PJ	26 000 000 PJ	650 000 000 PJ
Technisches Angebotspotential	88 000 PJ	50 000 PJ	60 000 PJ	198 000 PJ
Technisches Nachfragepotential				
Haushalte und Kleinverbraucher	85 PJ/a	617 PJ/a	69 PJ/a	771 PJ/a
Industrie	16 PJ/a	172 PJ/a	19 PJ/a	207 PJ/a
<b>Deutschland gesamt</b>	<b>101 PJ/a</b>	<b>789 PJ/a</b>	<b>88 PJ/a</b>	<b>978 PJ/a</b>
Verteilte, netzgebundene Wärme menge	15,2 PJ/a	169,2 PJ/a	7,7 PJ/a	192,1 PJ/a

**Tabelle 6-1:** Potentiale hydrothermalen Erdwärme in Deutschland

In der Summe beträgt das technische Nachfragepotential in den Sektoren Haushalte, Kleinverbraucher und Industrie mit einem Temperaturniveau unter 100 °C, welches durch hydrothermale Erdwärmenvorkommen auch gedeckt werden könnte, 978 PJ/a. Bezogen auf die gesamte

Nachfrage nach Endenergie in der Bundesrepublik Deutschland in 1995 sind dies etwa 11 % und bezogen auf die Nachfrage nach Raum- und Prozeßwärme etwa 28 %.

Es zeigt sich auch, daß die Nutzung bestehender Wärmenetze zwecks Reduzierung der relativ hohen Wärmebereitstellungskosten hydrothormaler Heizzentralen nur sehr eingeschränkt möglich ist. Maximal könnten 192,1 PJJ/a bisher konventionell erzeugter Wärme durch Einspeisung hydrothermal gewonnener Wärme substituiert werden.

Die Möglichkeiten einer Wärmebereitstellung aus hydrothermalen Energievorkommen in Deutschland sind demnach beachtlich: angebotsseitig könnte eine Wärmemenge bereitgestellt werden, die die Nachfrage deutlich übersteigt. Jedoch kann diese Wärme nur zu einem kleinen Teil auch tatsächlich im Energiesystem Deutschland untergebracht werden. Aber selbst bei der Berücksichtigung dieser nachfrageseitigen Restriktionen verbleibt ein Potential von energiewirtschaftlicher Relevanz.

Aufgrund ihrer Umweltverträglichkeit (Kayser et al., 1996) ist die hydrothermale Energiegewinnung somit eine interessante Option für eine zukünftige Deckung der Energienachfrage.



## 7 Literatur

- AGFW, Arbeitsgemeinschaft Fernwärme, Hauptbericht der Fernwärmeversorgung für das Jahr 1995; Frankfurt (Main), 1997.
- Anhalt, Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, Energiebilanz Sachsen-Anhalt 1993, Halle (Saale), 1995a.
- Anhalt, Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, Gebäude und Wohnungszählung '95 (vorläufige Ergebnisse), Halle (Saale), 1995.
- Anhalt, Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Halle (Saale), 1996.
- Baden, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Volks-, Gebäude-, Wohnungs- und Arbeitsstättenzählung am 25. Mai 1987 (auf Diskette); Stuttgart, 1994.
- Baden, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Stuttgart, 1996.
- Bayern, Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung, Volks-, Gebäude-, Wohnungs- und Arbeitsstättenzählung am 25. Mai 1987 (auf Diskette); München, 1994.
- Bayern, Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung, Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; München, 1996.
- Berlin, Statistisches Landesamt Berlin, Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Berlin, 1996.
- Brandenburg, Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie Brandenburg, Gutachten zur Entwicklung der Energieversorgung im Land Brandenburg; Potsdam, 1994.
- Brandenburg, Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Brandenburg, Gebäude und Wohnungszählung '95; Potsdam, 1995.
- Brandenburg, Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Brandenburg, Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Potsdam, 1996.
- Bremen, Statistisches Landesamt Bremen, Volks-, Gebäude-, Wohnungs- und Arbeitsstättenzählung im Lande Bremen am 25. Mai 1987: Ergebnisse für das Land Bremen sowie für die Städte Bremen und Bremerhaven nach Stadtbezirken (auf Diskette); Bremen, 1994.
- Bremen, Statistisches Landesamt Breme,: Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Bremen, 1996.
- Castell-Exner, Fr. Dr., Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e. V., (persönliche Auskunft), Eschborn, 03.06.1996.
- DIN 4701, Norm DIN 4701 Teil 1 03.83: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden; Berlin, 1983.
- Eckerle, P. et al., Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa; Bericht der Prognos AG im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Basel, 1995.
- Frisch, H. et al., Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken, Schlußbericht Forschungsvorhaben 03 E 6240 A/B, 1989.

- Haenel, R., M. Kleefeld und I. Koppe, Geothermisches Energiepotential; Pilotstudie: Abschätzung der geothermischen Energievorräte an ausgewählten Beispielen in der Bundesrepublik Deutschland, Bericht, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (unveröffentlicht); Veröffentlichung der Hauptergebnisse in Haenel Staroste, 1984/1988.
- Haenel, R. und E. Staroste, E. (Hrsg.), Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland; Th. Schäfer, Hannover, 1988.
- Hamburg, Statistisches Landesamt der Freien und Hansestadt Hamburg: Volks-, Gebäude-, Wohnungs- und Arbeitsstättenzählung am 25. Mai 1987 (auf Diskette); Hamburg, 1992/1993.
- Hamburg, Statistisches Landesamt der Freien und Hansestadt Hamburg: Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Hamburg, 1996.
- Hessen, Hessisches Statistisches Landesamt: Volks-, Gebäude-, Wohnungs- und Arbeitsstättenzählung am 25. Mai 1987 (auf Diskette); Wiesbaden, 1993.
- Hessen, Hessisches Statistisches Landesamt: Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Wiesbaden, 1996.
- Hofer, R., Technologiestützende Analyse der Potentiale industrieller Kraft Wärme Kopplung; TU München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik; 1994.
- Holstein, Statistisches Landesamt Schleswig-Holstein: Ausgewählte Daten aus der Gebäude- und Wohnstättenzählung vom 25.05.1987 in Schleswig-Holstein (auf Diskette); Kiel; 1994.
- Holstein, Statistisches Landesamt Schleswig-Holstein: Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Kiel, 1996.
- Hurtig, E., V. Cermak, R. Haenel, und V. Zui (Hrsg.), Geothermal Atlas of Europe; Geografisch-Kartografische Anstalt, Gotha, 1992.
- Jobmann, M. und R. Schulz, Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt im süddeutschen Molassebecken, Teilgebiet: Hydrogeothermik; Bericht, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (unveröffentlicht), 1989.
- Kaltschmitt, M. und A. Wiese (Hrsg.), Erneuerbare Energieträger in Deutschland - Potentiale und Kosten; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993.
- Kaltschmitt, M. und A. Wiese (Hrsg.), Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1995.
- Keller, G. und R. Laroche, Statistik zur Nutzung erneuerbarer Energien - Band 3 1989-1990; Karlsruhe, 1991.
- Kraaz, M., Projektleiter bei: Fernwärme ForschungsInstitut, (mündl. Information ), Hannover, 1996.
- Lux, R., Gas-Wärmepumpenanlagen in Nahwärmeversorgungssystemen; Endbericht, IKARUS, Teilprojekt 4: Umwandlungssektor, Stuttgart, 1994.
- Mecklenburg, Statistisches Landesamt Mecklenburg-Vorpommern: Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Schwerin, 1996.
- Niedersachsen, Niedersächsisches Landesamt für Statistik: Ausgewählte Daten aus der Volks- und Berufszählung, der Gebäude- und Wohnstättenzählung sowie der Arbeitsstättenzählung vom 25.5.1987 in Niedersachsen (auf Diskette-Geheimhaltungsfreier Datenbestand); Hannover, 1994.

- Niedersachsen, Niedersächsisches Landesamt für Statistik: Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Hannover, 1996.
- NRW, Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen: Volks-, Gebäude-, Wohnungs- und Arbeitsstättenzählung am 25. Mai 1987 nach ausgewählten Strukturmerkmalen (auf Diskette); Düsseldorf, 1994.
- NRW, Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen: Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994; Düsseldorf, 1996.
- Pfalz, Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz: Volks-, Gebäude-, Wohnungs- und Arbeitsstättenzählung am 25. Mai 1987 (auf Diskette); Bad Ems, 1994.
- Pfalz, Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz: Energiedaten für Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe 1994, Bad Ems, 1996.
- Pomhoff, C. et al., Technik und Einsatzmöglichkeiten von Wärmepumpen; Untersuchung im Auftrag des bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Verkehr, München, 1993/1994.
- Prushek R., Ermittlung und Verifizierung der Potentiale und Kosten der Treibhausgasminderung durch Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie; Untersuchung im Auftrag der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“, Essen, 1994.
- Rockel, W. und H. Schneider, Die Möglichkeiten der Nutzung geothermischer Energie in Norddeutschland und der Bearbeitungsstand geplanter Vorhaben; in: Geothermie-Wärme aus der Erde; C.F Müller, Karlsruhe, 1991.
- Roth, U., Siedlungstypen: Beschreibung, Datenprofile, Büro für Raumplanung; Zürich, 1980.
- Rummel, F., O. Kappelmeyer und O.A. Herde, Erdwärme - Energieträger der Zukunft?, MeSy GmbH, Bochum, 1992.
- Sanner, B., Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 1992.
- Schaumann, Klimaverträgliche Wege der Entwicklung der deutschen Strom und Fernwärmeversorgung - Systemanalyse mit einem regionalen Energiemodell (unveröffentlicht), 1996.
- Schön, M. und W. Rockel, Nutzung niedrigthermaler Tiefenwässer-Geologische Grundlagen; in: Geothermie-Wärme aus der Erde; Verlag C.F Müller, Karlsruhe, 1991.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Statistisches Jahrbuch 1995 für die Bundesrepublik Deutschland, Metzler Poeschel Verlag, Stuttgart, 1995.
- VDEW, Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (Hrsg.): Ergebnisse der Erhebung über elektrische Wärmepumpen-Heizungsanlagen 1994; Frankfurt am Main, 1996.
- VDI-GET (Hrsg.), Jahrbuch 1996, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996.
- VDI, Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen (VDI 2067), Blatt 6, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1989.
- VDI-Richtlinien 2067, 1988.
- Vorpommern, Wirtschaftsministerium Mecklenburg-Vorpommern: Energiebericht 1993 des Landes Mecklenburg-Vorpommern; Schwerin, 1995.
- Wegmann, H.-E., Stand der Wärmepumpentechnik; VDI-Berichte 1236, Düsseldorf, 1996.

Winkens, H. P., Untersuchung einer zum Heizöl alternativen Energiebedarfsdeckung für den Rhein-Neckar-Raum. Forschungsbericht des BMFT; Energie- und Wasserwerke Rhein-Neckar AG, Mannheim, 1984.

Winkens, H. P., Teilprojekt 4, Daten: Umwandlungssektor, Unterbereich Fernwärmespeicherung, -transport und -verteilung; Forschungsvorhaben IKARUS des Bundesministerium für Forschung und Technologie; Endbericht Nr. 4-15, Stuttgart, Jülich, 1994.