

UG 2 **Hans-Heinrich Schmidt-Kanefendt:**
UG 3 **Umgebungswärme & Geothermie -**
Basisdaten für 100%-Szenarien

UG 4 Untersuchung zu Möglichkeiten und Grenzen der Energiegewinnung aus Umgebungswärme, auch 'Oberflächennahe Geothermie' genannt, und aus Tiefen-Geothermie unter den Bedingungen von 100%-Erneuerbare-Energie-Regionen in Deutschland.

UG 5 Version: 110301

UG 7 Wegen der grundlegend unterschiedlichen Bedingungen ist die Unterscheidung zwischen oberflächennaher Geothermie bis in eine Tiefe von 400 m und Tiefen-Geothermie in tieferen Erdschichten sinnvoll, wie sie beispielsweise in der VDI-Richtlinie 4640 [113] festgelegt ist.

UG 8 Zur besseren Unterscheidbarkeit wurde hier die oberflächennahe Geothermie einschließlich der Wärmeabgewinnung aus Umgebungsluft unter dem Begriff 'Umgebungswärme' zusammengefasst, da die Energie wegen des niedrigen Temperaturniveaus in beiden Fällen nur durch Einsatz von Wärmepumpen nutzbar gemacht werden kann.

UG 10 **1. Umgebungswärme (UW)**

UG 11 Die Gewinnung nutzbarer Wärme aus oberflächennahen Bodenschichten mittels Erdkollektoren bzw. Erdsonden und elektrisch betriebenen Wärmepumpen, landläufig auch als Erdwärme bezeichnet, ist Gegenstand dieses Kapitels.

UG 12 Mit Wärme der Umgebungsluft betriebene Wärmepumpen sind nicht in die Betrachtung einbezogen, wegen der wesentlich geringeren Jahresarbeitszahlen und des daraus resultierenden höheren Strombedarfs.

UG 13 Auf elektrisch betriebene Wärmepumpen bleibt die Betrachtung beschränkt, weil andere Energieträger, wie beispielsweise Biogas oder Pflanzenöl, nur in begrenztem Maß als Antriebsenergie bereit gestellt werden könnten und für andere Anwendungen, wie Treibstoff für Luftverkehr oder Prozesswärme, künftig sehr viel sinnvoller eingesetzt sein dürften.

UG 15 **1.1. Wärmeangebot UW**

UG 16 In oberflächennahen Bodenschichten wirken zwei sich überlagernde Energieströme:

UG 17 Aus dem Erdinneren der Erdwärmestrom mit einer Intensität von durchschnittlich 0,063 Watt pro Quadratmeter [115] und von oben der Solarwärmestrom mit einer mittleren Intensität von 115 Watt pro Quadratmeter [117].

UG 18 Mit einem Anteil von einem halben Promille ist die Erdwärme dabei praktisch ohne Bedeutung, es handelt sich also um eine spezielle Form der Solarwärmenutzung.

UG 19 Pro Hektar lässt sich dem Boden jährlich eine Wärmemenge von 1000 MWh entziehen [120].

UG 20 Regionale Unterschiede bleiben hier unberücksichtigt.

UG 22 **1.2. Flächen UW**

UG 23 **Status**

UG 24 Als Grundlage für die Abschätzung der bereits in Anspruch genommenen Flächen eignet sich am ehesten die im Referenzjahr 2007 gewonnene Wärmemenge, weil auf diesem Weg die tatsächlichen Verhältnisse im Erdreich nicht nur bei Erdkollektoren, sondern auch bei Sonden oder Grundwasser-Wärmetauschern gut erfasst werden können.

UG 25 Falls die im Referenzjahr 2007 gewonnene Wärmemenge für die Zielregion nicht bekannt ist, kann behelfsweise der deutsche Durchschnitt angesetzt werden:

UG 26 Im Jahr 2007 wurden deutschlandweit 2.139 GWh Wärme aus Umgebungswärme mittels Wärmepumpen bereitgestellt [122], mit dem durchschnittlichen Energieertrag des heutigen Anlagenbestandes [40] ergibt das eine beanspruchte Fläche von 1.426 Hektar.

UG 27 Durch die vergleichsweise niedrigen Bereitstellungstemperaturen von 40 bzw. 55° C ist die Anwendung auf die Gebäudebeheizung und Brauchwassererwärmung beschränkt. Wegen hoher Verluste beim Transport von Niedertemperaturwärme über längere Distanzen wird davon ausgegangen, dass Umgebungswärme überwiegend siedlungsnah gewonnen wird. Folglich dient hier die statistische Größe 'Gebäude- und Freiflächen' als Bezugsfläche.

UG 28 Bezogen auf 2.393.839 Hektar Gebäude- und Freiflächen in Deutschland 2007 [125] hatte die mit Gewinnung von Umgebungswärme beanspruchte Fläche einen Anteil von 0,060 Prozent.

UG 30 **Vertretbare Zielwerte**

UG 31 Mit Rücksicht auf andere Nutzungen, wie beispielsweise Infrastruktur, können bis zu 13 Prozent der Gebäude- und Freiflächen für die Gewinnung oberflächennaher Erdwärme als nutzbar gelten [128].

UG 32 Es ist aber kaum zu erwarten, dass diese Grenze einmal zum Tragen kommen könnte. In der Regel wird die für die Wärmepumpen erforderliche Antriebsenergie den begrenzenden Faktor bilden.

UG 34 **1.3. Energieerträge UW**

UG 35 Der gesamte Energieertrag einer Wärmepumpen-Anlage setzt sich zusammen aus der dem Erdreich entzogenen Wärme und der elektrischen Antriebsenergie, die ebenfalls nahezu vollständig als Nutzwärme wirksam wird. Zur Bestimmung der erforderlichen Antriebsenergie ist die Kenngröße Jahresarbeitszahl gebräuchlich, definiert als Verhältnis der über ein Jahr bereitgestellten Nutzenergie zur aufgewendeten Antriebsenergie.

UG 36 In Feldtests wurden für ab 1995 installierte Erdreich-gespeiste Anlagen in Niedrigenergiehäusern (max. Vorlauftemp. 40° C) Jahresarbeitszahlen von im Mittel 3,8 gemessen [130], dieser Wert wird hier konservativ für die Zukunft angesetzt.

UG 37 Für den heutigen Gesamtbestand wird wegen eines erheblichen Anteils wenig effizienter Altanlagen eine Jahresarbeitszahl von 3,0 angesetzt.

UG 39 **Status**

UG 40 Aus der für den heutigen Anlagenbestand charakteristischen Jahresarbeitszahl von 3,0 [37] und der dem Boden jährlich entziehbaren Wärmemenge von 1.000 MWh pro Hektar [19] resultiert eine elektrische Antriebsenergie von 500 MWh und eine nutzbare Wärmemenge von 1.500 MWh pro Hektar und Jahr.

UG 41 In die Energiebilanz geht die aufzubringende Antriebsenergie mit negativem Vorzeichen ein, da es sich hier nicht um einen Ertrag, sondern um einen Aufwand handelt.

UG 43 **Realistische Zielwerte**

UG 44 Aus der für den künftigen Anlagenbestand mindestens zu erwartenden Jahresarbeitszahl von 3,8 [36] und der dem Boden jährlich entziehbaren Wärmemenge von 1.000 MWh pro Hektar [19] resultiert eine verringerte elektrische Antriebsenergie von 357 MWh und eine nutzbare Wärmemenge von 1.357 MWh pro Hektar und Jahr.

UG 45 (Negatives Vorzeichen Antriebsenergie: siehe [44])

UG 47 **1.4. Künftige Bedeutung UW**

UG 48 Der Einsatz elektrischer Wärmepumpen kann zu einem ausgeglichenen Energiemix beitragen, indem ein Überhang von Strom genutzt wird, um einen Teil der Heizwärme bereitzustellen.

UG 49 Durch Einspeisung der gewonnenen Wärme in Wärmespeicher wird eine sinnvolle Nutzung von überschüssigen Stromspitzen, beispielsweise in Starkwindzeiten, ermöglicht und damit ein wertvoller Beitrag zum zeitlichen Ausgleich von Angebot und Bedarf geleistet.

UG 50 Eine konsequente Beschränkung der Betriebszeiten auf Phasen mit überschüssigem Strom würde zu einer besseren Auslastung der vorhandenen Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen führen und eine Vergrößerung des Anlagenparks erübrigen.

UG 51 Voraussetzung ist die Kombination mit Wärmespeichern; in Frage kommen dezentrale Speicher in PCM-Technologie (Phase Change Material) oder Koppelung mit den ohnehin für die Solarwärme notwendigen Saisonspeichern, die aufgrund der zwischenzeitlichen Nachladung in der kalten Jahreszeit kleiner dimensioniert werden könnten.

UG 52 Für eine Anwendung der Technologie in breitem Maßstab erscheinen folgende Maßnahmen sinnvoll bzw. erforderlich:

UG 53 1. Weiterentwicklung zur zuverlässigen Erreichung höherer Jahresarbeitszahlen.

UG 54 2. Entwicklung von Verfahrensweisen zur Vermeidung von Umweltbeeinträchtigung im Anlagenbetrieb.

UG 55 3. Entwicklung von Wärmespeicherkonzepten für geringe Temperaturdifferenzen.

UG 57 **2. Tiefen-Geothermie (TG)**

UG 58 Tiefen-Geothermie basiert auf der Tatsache, dass die Temperatur in der Erdkruste mit zunehmender Tiefe steigt und so im Unterschied zur Umgebungswärme eine direkte Nutzung ohne Wärmepumpe möglich ist.

UG 59 Ursache für die erhöhten Temperaturen ist der Erdwärmestrom, der vom heißen Erdkern und aus radioaktiven Zerfallsprozessen in der Erdkruste gespeist wird und zur kälteren Erdoberfläche hin gerichtet ist.

UG 60 Der Erdwärmestrom ist mit einer Dichte von 0,063 Watt pro Quadratmeter [115] vergleichsweise schwach.

UG 61 Seine Intensität liegt bei nur einem halben Promille des Solarwärmestroms, der in Deutschland mit ca. 115 Watt pro Quadratmeter auf die Erdoberfläche einwirkt [117].

UG 63 Die bisher realisierten oder geplanten Geothermieprojekte sind durchweg so ausgelegt, dass weitaus mehr Energie gefördert wird, als der Erdwärmestrom nachliefern kann.

UG 64 Die gewonnene Energie stammt dabei fast ausschließlich von gespeicherter Erdwärme aus Tiefenwasser oder Gestein, welches durch die Entnahme abkühlt.

UG 65 Damit ist die Nutzungsdauer begrenzt auf die Zeitspanne, innerhalb der die Temperatur des erschlossenen Speichervolumens auf einen nicht mehr nutzbaren Wert absinkt.

UG 66 Die anschließende Wiederaufladung durch den Erdwärmestrom nimmt ein Vielfaches dieser Zeitspanne in Anspruch.

UG 67 Bei der heute typischen Auslegung der Fördermengen auf eine Ausbeutungsdauer von 30 bis 100 Jahren [133] kann die Tiefen-Geothermie nicht als erneuerbare Energiequelle gelten.

UG 68 Nur bei extensiver Nutzung wäre die Tiefen-Geothermie dauerhaft nutzbar und damit auch als regenerative Energie anzusehen: Wenn nicht mehr entnommen wird, als der Erdwärmestrom nachliefern kann [135].

UG 69 Allerdings befände sich die Tiefen-Geothermie bei derartig geringen förderbaren Wärmemengen weit ab von jeder Wirtschaftlichkeit.

UG 70 Zur Überwindung dieses Problems ist eine feldweise Bewirtschaftung vorstellbar, bei der nacheinander immer nur ein kleiner Teil des unterirdischen Wärmespeichers entladen wird, während die übrigen Felder sich regenerieren können. Voraussetzung für dieses Verfahren ist allerdings die Eignung sämtlicher im Laufe der Zeit benötigter Felder.

UG 72 Auch für die Nutzung der Wärme von Tiefen-Wasser, sogenannte Aquifere, gelten prinzipiell die Zusammenhänge zwischen schwachem Erdwärmestrom und beanspruchter Fläche.

UG 73 Zwar kann durch das flüssige Medium ein unterirdischer Wärmetransport stattfinden, so dass der Erdwärmestrom einer räumlich entfernten Fläche genutzt wird. Das ändert aber nichts an der Inanspruchnahme der entsprechenden Fläche.

UG 75 **2.1. Wärmeangebot TG**

UG 76 Der Erdwärmestrom kann in geologischen Störungszonen um Größenordnungen höher sein. Allerdings handelt es sich dabei immer um räumlich eng begrenzte Ausnahmen, die ggf. gesondert betrachtet werden müssen. Solche regionalen Besonderheiten bleiben hier unberücksichtigt.

UG 78 **2.2. Flächen TG**

UG 79 **Status**

UG 80 Die durch Tiefen-Geothermie-Projekte bereits in Anspruch genommenen Flächen sind nicht sichtbar. Sie stellen vielmehr eine rechnerische Größe dar, die zur Ermittlung einer dauerhaft aufrecht zu erhaltenden Nutzung dienen kann.

UG 81 Als Grundlage für die Flächen-Abschätzung dienen die jährlich gewonnene Wärmemenge und der Energieertrag [93][97][99].

UG 82 Wenn anstelle der Wärmemenge die installierte Leistung der in der Region vorhandenen Anlagen bekannt ist, kann unter Annahme eines ganzjährigen Volllastbetriebes daraus die im Referenzjahr 2007 gewonnene Wärmemenge abgeschätzt werden.

UG 84 **Vertretbare Zielwerte**

UG 85 Theoretisch kommt die gesamte Fläche der Zielregion für die Wärmegewinnung aus Tiefen-Geothermie in Betracht. Wegen geologischer, technischer und ökonomischer Restriktionen dürfte die künftig tatsächlich erschließbare Fläche aber nur bei einem Bruchteil der Gesamtfläche liegen.

UG 87 **2.3. Energieerträge TG**

UG 88 Selbst bei Beschränkung der Fördermenge auf die durch den Erdwärmestrom nachgelieferte Wärmemenge würde die Temperatur mit Abzug der gespeicherten Energie so stark sinken, dass lange vor dem sich einstellenden Gleichgewichtszustand ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlagen nicht mehr möglich wäre.

UG 89 Für eine Nutzung über sehr lange Zeit darf daher nur ein Teil der Wärmemenge entnommen werden, die aus dem Erdinnern nachgeliefert wird. Wie groß dieser Teil sein kann, hängt davon ab, wie weit die Temperatur für eine noch wirtschaftliche Nutzung absinken darf.

UG 90 Da die erreichbaren Temperaturen ohnehin nicht besonders hoch sind (im Bereich zwischen 40 - 200 Grad) und außerdem von der mit hohen Kosten verbundenen Bohrtiefe abhängen, sind die Spielräume besonders bei der Stromgewinnung, aber auch bei der Heizwärme, nicht besonders groß.

UG 91 Maßgeblich ist die minimal noch nutzbare Temperaturdifferenz, dazu ein praxisnahes Beispiel: Temperatur des geförderten Wassers bei Betriebsaufnahme $T_1=140^\circ$, im Rahmen der Nutzung wird das geförderte Wasser auf $T_2=40^\circ$ abgekühlt, die genutzte Temperaturdifferenz beträgt anfänglich also $TD_1=100^\circ$. Für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage muss die Temperatur des geförderten Wassers mindestens noch $T_2=80^\circ$ betragen, das entspricht einer minimalen Temperaturdifferenz von $TD_2=40^\circ$. Das Verhältnis der Temperaturdifferenzen $VT=TD_2/TD_1 = 40\%$.

UG 92 Bei einer minimal noch nutzbaren Temperaturdifferenz von 40 Prozent vom Anfangswert und einem Erdwärmestrom von 0,063 Watt pro Quadratmeter [115] entsprechend 5,52 MWh pro Hektar und Jahr ergibt sich gemäß [138] ein Brutto-Energieertrag von 3,31 MWh pro Hektar und Jahr.

UG 93 Bei reiner Wärmenutzung mit 60 Prozent angenommenem Wirkungsgrad für Förderung und Verteilung [142] bleibt ein Netto-Energieertrag von 1,99 MWh pro Hektar und Jahr.

UG 95 Für Heizkraftwerke, die neben Niedertemperaturwärme auch Strom liefern, sind höhere Temperaturen erforderlich, dazu hier eine Variation des Beispiels aus [91]:

UG 96 Für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage muss die Temperatur des geförderten Wassers mindestens noch $T_2=120^\circ$ betragen, das entspricht einer minimalen Temperaturdifferenz von $TD_2=80^\circ$. Das Verhältnis der Temperaturdifferenzen $VT=TD_2/TD_1 = 80\%$.

UG 97 Bei einer minimal noch nutzbaren Temperaturdifferenz von 80 Prozent vom Anfangswert und einem Erdwärmestrom von 0,063 Watt pro Quadratmeter [115] entsprechend 5,52 MWh pro Hektar und Jahr ergibt sich gemäß [138] ein Brutto-Energieertrag von 1,10 MWh pro Hektar und Jahr.

UG 98 Der Wirkungsgrad für die Stromerzeugung aus Erdwärme wird hier mit 10 Prozent angesetzt [140], daraus ergibt sich ein Stromertrag von 0,11 MWh pro Hektar und Jahr.

UG 99 Unter der optimistischen Annahme, dass die verbleibenden 90 Prozent voll als Nutzwärme bereitgestellt werden können, ergibt sich mit einem Wirkungsgrad für Förderung und Verteilung von 60 Prozent [142] ein Wärmeertrag von 0,60 MWh pro Hektar und Jahr.

UG 101 **2.4. Künftige Bedeutung TG**

UG 102 Sämtliche heute in Betrieb oder in der Planung befindlichen Geothermie-Projekte weltweit entziehen dem Tiefengestein um Größenordnungen mehr Wärme, als der Erdwärmestrom nachliefern kann [63].

UG 103 Daher ist die Betriebszeit von vorn herein auf die Förderung der im Tiefengestein gespeicherten Wärme beschränkt. Diese Projekte können daher nicht den regenerativen Energien zugeordnet werden, sondern allenfalls als Brückentechnologie gelten.

UG 104 Nur bei extensiver Auslegung ist eine dauerhaft aufrecht zu erhaltende Nutzung möglich.

UG 105 Eine Beispielrechnung zeigt, dass für den theoretischen Fall einer vollflächigen Nutzung der Tiefen-Geothermie mit Heizkraftwerken weniger als 1% des Strombedarfs und weniger als 6% des Wärmebedarfs in Deutschland nachhaltig gedeckt werden könnten [138].

UG 106 Da die künftig tatsächlich erschließbare Fläche jedoch nur bei einem Bruchteil der Gesamtfläche liegen dürfte [85], ist anzunehmen, dass die Tiefen-Geothermie nicht mehr als ein Nischenprodukt bleiben wird.

UG 108 **4. Anhang**

UG 109 [Anhang A: Wertetabelle](#)

UG 111 **5. Endnoten**

UG 113 Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt, Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Streicher, Dr.-Ing. Andreas Wiese; "Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte", 2006 - Seite 396.

UG 115 Quelle [113] - Seite 106.

UG 117 BINE Informationsdienst; "basisEnergie 3 - Photovoltaik"; Dezember 2007; FIZ Karlsruhe GmbH; ISSN1438-3802 - Seite 2: "In Mitteleuropa liegt die Energie der Einstrahlung, bezogen auf eine horizontale Fläche, bei ca. 1000 kWh pro Quadratmeter und Jahr entsprechend einer Durchschnittsleistung von 114 Watt.

UG 118 http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis_Energie/Basis_Energie_Nr._03/Basis_03_internetx.pdf

UG 120 Quelle [113] - S. 410: Jährlich dem Boden entziehbare Wärmemenge: 360 Megajoule pro Quadratmeter entsprechend 100 kWh pro Quadratmeter bzw. 1000 MWh pro Hektar.

UG 122 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; "Erneuerbare Energien in Zahlen"; 06.06.2008 - Seite 14

UG 123 http://www.erneuerbare-energien.de/files/erneuerbare_energien/downloads/application/pdf/broschuere_ee_zahlen.pdf

UG 125 Statistische Ämter des Bundes und der Länder; "Regionaldatenbank Deutschland"; Online-Angebot - Tabelle 449-01-1: 2.393.839 Hektar Gebäude- und Freiflächen in Deutschland zum 31.12.2004.

UG 126 <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/loqon>

UG 128 Quelle [113] - S. 452: "...ist nur ein Drittel der Gebäude- und Freiflächen (...) technisch verfügbar (...) Aufgrund weiterer Effekte sind (...) nur rund 40 % auch tatsächlich nutzbar." Das entspricht einem maximalen Nutzungsgrad der Gebäude- und Freiflächen von 13 Prozent.

UG 130 Jens Schuberth, Helmut Kaschütz; "Elektrische Wärmepumpen - eine erneuerbare Energie? Wie ist die Umweltbilanz elektrischer Wärmepumpen im Vergleich zu anderen Heizungssystemen?", Umweltbundesamt 29.05.2008.

UG 131 <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3192.pdf>

UG 133 Quelle [113] - S. 486.

UG 135 Hans-Heinrich Schmidt-Kanefendt; "Geothermie in 100% Erneuerbare Energie-Regionen"; 04.10.2009. [28] , Seite 2 ff.

UG 136 <http://skn.privat.t-online.de/wattweg/files/Geothermie.pdf>

UG 138 Quelle [135] - S. 4 ff.

UG 140 Quelle [113] - S. 516.

UG 142 Quelle [113] - S. 570.

Anhang A: Wertetabelle

Bedeutung	räumlich	zeitlich	Textbezug	Einheit	Basis/Status	Ziel
Umgebungswärme & Geothermie - Basisdaten für 100%-Szenarien						
Intensität Umgebungswärme:						
(Regionale Unterschiede in der Intensität bleiben hier unberücksichtigt.)			UG20			
Umfang Umgebungswärme:						
Nutz-Anteil Umweltwärme = Anteil der tatsächlich beanspruchten Gebäude- und Freiflächen in Deutschland	Refreg.	2007	UG28	Prozent	0,060	
Vertretbarer Nutzanteil = Empfehlung für maximalen Anteil der Umgebungswärme-Gewinnung an Gebäude- und Freiflächen	Refreg.	Zielzeit	UG31	Prozent		13
Ertrag Umgebungswärme:						
Energieertrag Umgebungswärme-Gewinnung im deutschen Durchschnitt (Strombetriebe Erdwärmepumpen)	Refreg.	2007	UG40	MWh/ha/a	1.500	
	Refreg.	Zielzeit	UG44			1.357
Ertrag Strom (negativ, da Aufwand für Wärmepumpen-Antrieb).	Refreg.	2005	UG40	MWh/ha/a	-500	
	Refreg.	Zielzeit	UG44			-357
Intensität Tiefen-Geothermie:						
(Regionale Unterschiede in der Intensität bleiben hier unberücksichtigt.)			UG76			
Umfang Tiefen-Geothermie:						
Nutz-Anteil Geothermie = Anteil der tatsächlich beanspruchten Fläche	Refreg.	2007	UG81	Prozent	-	
Maximaler Nutzanteil = Gesamtfläche der Region (theoretisch)	Refreg.	Zielzeit	UG85	Prozent		100
Ertrag Tiefen-Geothermie:						
1. Energieertrag Tiefen-Geothermie regenerativ, reine Wärmenutzung in deutschen Regionen.	Refreg.	2007	UG93	MWh/ha/a	1,99	
	Refreg.	Zielzeit	UG93	MWh/ha/a		1,99
2.1 Energieertrag Tiefen-Geothermie regenerativ, Stromgewinnung in deutschen Regionen.	Refreg.	2007	UG98	MWh/ha/a	0,11	
	Refreg.	Zielzeit	UG98	MWh/ha/a		0,11
2.2 Energieertrag Tiefen-Geothermie regenerativ, Abwärmertzung bei Stromgewinnung in deutschen Regionen.	Refreg.	2007	UG99	MWh/ha/a	0,60	
	Refreg.	Zielzeit	UG99	MWh/ha/a		0,60