

Martin Kaltschmitt · Ernst Huenges · Helmut Wolff
(Herausgeber)

Energie aus Erdwärme

Geologie, Technik und Energiewirtschaft

mit 77 Abbildungen und 45 Tabellen

Unter Mitwirkung von

Jörg Baumgärtner, Peer Hoth, Reinhard Jung, Martin Kayser,
Rainer Lux, Burkhard Sanner, Kuno Schallenberg, Traugott
Scheytt

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung	1
MARTIN KALTSCHMITT	
1.1 Energiesystem von Deutschland	1
1.1.1 Energiebegriffe	2
1.1.2 Primärenergieverbrauch	4
1.1.3 Endenergieverbrauch	5
1.1.4 Umwelteffekte	7
1.2 Erdwärme als regenerative Energie	7
1.2.1 Energiebilanz der Erde	8
Sonne (8); Erdwärme (9); Planetengravitation und -bewegung (11); Bilanz der Energieströme (12)	
1.2.2 Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energien	14
1.2.3 Erdwärme als Energiequelle	15
Geschichtlicher Rückblick (16); Nutzungsmöglichkeiten (20)	
1.3 Aufbau und Vorgehen	22
1.3.1 Geologische Grundlagen	22
1.3.2 Oberflächennahe Erdwärmennutzung	23
1.3.3 Nutzung der Energie des tiefen Untergrunds	23
1.3.4 Energiewirtschaftliche Analyse	24
2 Geologische Grundlagen	26
2.1 Aufbau, Struktur und Geodynamik der Erde	26
PEER HOTH, ERNST HUENGES	
2.1.1 Aufbau und Struktur	26
2.1.2 Geodynamik	31
2.2 Wärmebilanz in der Erde	32
ERNST HUENGES, PEER HOTH	
2.2.1 Temperaturen und Wärmequellen im Erdinnern	33
2.2.2 Temperatur-Tiefenverteilung in der oberen Erdkruste	33
2.2.3 Wärmetransport in der oberen Erdkruste	35
2.2.4 Wärmebilanz an der Erdoberfläche	39
2.3 Technisch nutzbare Erdwärmenvorkommen	40
ERNST HUENGES, PEER HOTH, TRAUOGOTT SCHEYTT	
2.3.1 Wärmenvorkommen in den obersten Erdschichten	41
Hydrogeologische Grundlagen (41); Bedeutung des Grundwassers bei der geothermischen Nutzung (44); Hydrogeologische Aspekte der geothermischen Nutzung (45); Oberflächennahe Wärmeanomalien (46)	
2.3.2 Vorkommen im tiefen Untergrund	46
Geologische Voraussetzungen (48); Geeignete Nutzhorizonte (48); Regionale Verbreitung (52); Temperatur und Chemismus der Tiefenwässer (56); Möglichkeiten einer energetischen Nutzung (58)	

3	Oberflächennahe Erdwärmenutzung	60
	BURKHARD SANNER, MARTIN KALTSCHMITT	
3.1	Wärmequellenanlagen	61
3.1.1	Geschlossene Systeme	63
	Horizontal verlegte Erdreichwärmeübertrager (63); Vertikal verlegte Erdreichwärmeübertrager (65); Erdberührte Betonbauteile (69)	
3.1.2	Offene Systeme	70
3.1.3	Sonstige Systeme	72
	Koaxialbrunnen (72); Gruben- und Tunnelwasser (73); Luftvorheizung/-kühlung (74)	
3.2	Wärmepumpen	74
3.2.1	Prinzip	75
	Kompressionswärmepumpe (75); Sorptionswärmepumpe (76); Vergleich (78)	
3.2.2	Kennzahlen	78
	Leistungszahl (79); Arbeitszahl (80); Heizzahl (80)	
3.2.3	Technische Umsetzung	81
	Wärmeübertrager (81); Verdichter (82); Expansionsventil (84); Schmiermittel (85); Arbeitsmittel (85)	
3.3	Gesamtsysteme	87
3.3.1	Systemkonfigurationen	88
	Heizungsanlagen mit erdgekoppelter Wärmepumpe (88); Wärmepumpenanlagen zum Heizen und Kühlen (91); Unterirdische thermische Energiespeicherung (92); Direkte Erdwärmenutzung (95)	
3.3.2	Gesamtsystemaspekte	97
	Wärmeregime (97); Auslegung (98); Planungshilfen, Genehmigungen (99)	
3.4	Anlagenbeispiele	102
3.4.1	Anlage für Mehrfamilienwohnhaus	103
3.4.2	Anlage mit direkter Kühlung	103
3.4.3	Energiepfahlanlage	105
3.4.4	Anlage mit Energiespeicherung	106
4	Nutzung der Energie des tiefen Untergrunds	109
4.1	Herstellen der Fördersonden	109
	HELMUT WOLFF	
4.1.1	Tiefbohranlage	110
	Bohrplatzerstellung und -einrichtung (111); Bohrverfahren (112); Übertägige Ausrüstung (112)	
4.1.2	Bohrtechnik	115
	Bohrstrangsystem (115); Bohrwerkzeug (116); Bohren mit Versenkbohrhammer (117); Bohrloch- sohlenantriebe (117); Gerichtetes Bohren (119); Neue Bohrverfahren (120)	

4.1.3	Bohrspülungen	120
	Flüssige Bohrspülungen (122); Gasförmige Bohrspülungen (122)	
4.1.4	Verrohrung und Zementation	123
	Verrohrung (123); Zementation (125)	
4.1.5	Komplettierung	126
4.2	Hydrothermale Erdwärmenutzung	129
	KUNO SCHALLENBERG, MARTIN KAYSER, MARTIN KALTSCHMITT	
4.2.1	Förderung	129
	Gestängepumpen (130); Unterwassermotorpumpen (130); Turbopumpen (131); Pumpen mit dem Air Lift Verfahren (131)	
4.2.2	Wärmewandlung	131
	Rohrleitungen für den Thermalwassertransport (131); Wärmeübertrager (132); Wärmepumpen (135); Kesselanlagen für fossile Brennstoffe (135); Sonstige Systemelemente (136); Fernwärmenetze (138)	
4.2.3	Anlagen und Betriebsweisen	140
	Systemtechnische Aspekte (140); Anlagenbeispiele (146)	
4.3	Erdwärmenutzung durch tiefe Einzelsonden	152
	MARTIN KAYSER	
4.3.1	Wärmequellenanlage	152
4.3.2	Wärmewandlung	153
4.3.3	Anlage und Betriebsweise	155
4.4	Nutzung trockener Formationen	155
	JÖRG BAUMGÄRTNER, REINHARD JUNG	
4.4.1	Wärmequellenanlage	161
	HDR Tiefbohrungen (161); Komplettierung (163); Lagerstättenstimulation und -behandlung (164)	
4.4.2	Energiewandlung	167
4.4.3	Anlagenbeispiel	168
5	Energiewirtschaftliche Analyse	175
5.1	Oberflächennahe Erdwärmenutzung	175
	MARTIN KALTSCHMITT, RAINER LUX	
5.1.1	Potentiale und Nutzung	176
	Definition der Potentialbegriffe (176); Theoretische Potentiale (176); Technische Erzeugungspotentiale (177); Technische Nachfragepotentiale (177); Nutzung (178)	
5.1.2	Kosten	182
	Untersuchte Anlagen (182); Investitionen (182); Betriebskosten (182); Wärmegestehungskosten (183)	
5.1.3	Umweltaspekte	184
	Lebenswegbilanzen (185); Umweltauswirkungen im Normalbetrieb (188); Umweltauswirkungen durch Störfälle (189)	
5.2	Nutzung der Energie des tiefen Untergrunds	189
	MARTIN KAYSER, MARTIN KALTSCHMITT	
5.2.1	Potentiale und Nutzung	190

5.2.1.1	Hydrothermale Erdwärmenutzung	190
	Theoretische Potentiale (190); Technische Erzeugungspotentiale (191); Technische Nachfragepotentiale (192); Nutzung (193)	
5.2.1.2	Tiefe Sonden	195
	Theoretische Potentiale (195); Technische Erzeugungspotentiale (196); Technische Nachfragepotentiale (196); Nutzung (197)	
5.2.1.3	HDR-Technik	197
	Theoretische Potentiale (197); Technische Erzeugungspotentiale (197); Technische Nachfragepotentiale (198); Nutzung (199)	
5.2.2	Kosten	199
5.2.2.1	Hydrothermale Erdwärmenutzung	200
	Untersuchte Anlagen (200); Investitionen (201); Betriebskosten (201); Wärmegestehungskosten (202)	
5.2.2.2	Tiefe Sonden	203
	Untersuchte Anlagen (203); Investitionen (203); Betriebskosten (204); Wärmegestehungskosten (204)	
5.2.3	Umweltaspekte	206
5.2.3.1	Hydrothermale Erdwärmenutzung	206
	Lebenswegbilanzen (206); Umweltauswirkungen im Normalbetrieb (208); Umweltauswirkungen durch Störfälle (209)	
5.2.3.2	Tiefe Sonden	209
	Lebenswegbilanzen (209); Umweltauswirkungen im Normalbetrieb (210); Umweltauswirkungen durch Störfälle (210)	
5.2.3.3	HDR-Technik	211
	Umweltauswirkungen im Normalbetrieb (211); Umweltauswirkungen durch Störfälle (211)	
5.3	Erdwärme im Kontext anderer Energieträger	212
	MARTIN KALTSCHMITT	
5.3.1	Potentiale und Nutzung	212
5.3.1.1	Bereitstellung thermischer Energie	213
	Theoretische Potentiale (213); Technische Erzeugungspotentiale (213); Technische Nachfragepotentiale (214); Nutzung (215)	
5.3.1.2	Bereitstellung elektrischer Energie	217
	Theoretische Potentiale (217); Technische Erzeugungspotentiale (217); Technische Nachfragepotentiale (218); Nutzung (219)	
5.3.2	Kosten	220
	Randbedingungen (221); Rahmenannahmen (222); Solarthermische Wärmebereitstellung (223); Wärmebereitstellung aus Biomasse (225); Nutzung oberflächennaher Erdwärme (226); Nutzung hydrothermalen Erdwärme (227); Erdwärmennutzung mit tiefen Sonden (228); Wärmebereitstellung aus fossilen Energieträgern (229); Vergleich (229)	

5.3.3	Umwelteffekte	231
	Rahmenannahmen (232); Solarthermische Wärmebereitstellung (232); Wärmebereitstellung aus Biomasse (232); Nutzung oberflächennaher Erdwärme (233); Nutzung hydrothormaler Erdwärme (233); Erdwärmenutzung mit tiefen Sonden (234); Wärmebereitstellung aus fossilen Energieträgern (234); Vergleich (235)	
5.4	Ausblick	237
	MARTIN KALTSCHMITT	
Literatur	241
	Literatur zu Kapitel 1	241
	Literatur zu Kapitel 2	242
	Literatur zu Kapitel 3	244
	Literatur zu Kapitel 4	251
	Literatur zu Kapitel 5	255
Anhang: Energieeinheiten	259
Sachverzeichnis	260