

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 5

Artikel: Geothermische Energie

Autor: Rybach, L.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915263>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.01.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Geothermische Energie¹⁾

Von L. Rybach

Die geothermischen Energieträger (natürlicher Dampf, Heisswasser, heisse Gesteine) werden in nächster Zukunft weder die fossilen noch die atomaren Brennstoffe ersetzen können. Ihre Nutzung steckt jedoch erst in den Anfängen und ist noch sehr entwicklungsfähig. Auch in der Schweiz bestehen Chancen, geothermische Energiequellen (insbesondere Thermalwasser für Raum- und Fernheizung) zu finden. Ein diesbezügliches Explorationsprogramm wird vorgeschlagen.

Les agents énergétiques géothermiques (vapeurs naturelles, sources d'eaux thermales, roches chaudes) ne pourront dans un proche avenir remplacer les combustibles ni fossiles ni nucléaires. Leur utilisation n'en est aujourd'hui qu'à ses débuts et est encore susceptible de grands développements. En Suisse également s'offrent des chances de découvrir des sources géothermiques d'énergie (en particulier des eaux thermales pour le chauffage local et à distance). Un programme d'exploration dans ce sens est proposé.

1. Einleitung

Man kann die geothermische Energie als eine Art fossile Kernenergie bezeichnen: sie hat ihren Ursprung im Zerfall radioaktiver Elemente im Erdinnern. Die geothermischen Energieträger sind an sich zwar nicht unerschöpflich, die *Vorräte* jedoch, insbesondere die in heissen Gesteinen gespeicherten Wärmemengen, *enorm gross*. Sie könnten, sobald die zur Erschliessung dieser Quellen notwendige Technologie entwickelt ist (diesbezügliche Forschungsarbeiten sind insbesondere in den USA im Gange), die Menschheit von Energielosigkeiten befreien.

Gegenwärtig findet eine Nutzung der geothermischen Energie fast ausnahmslos nur an jenen Orten der Erde statt, wo sie sich sozusagen selbst anbietet (untiefe Dampf- und Heisswasservorkommen, welche sich durch spektakuläre Oberflächenerscheinungen wie Geysire manifestieren). Durch gezielte Prospektionsarbeiten, insbesondere in tektonisch aktiven Zonen, könnten mit Sicherheit weitere, wesentliche Nutzungsgebiete erschlossen werden.

Der Produktionszyklus besteht bei der Elektrizitätsgewinnung aus geothermischem Dampf, im Gegensatz zu den Primärträgern Kohle, Erdöl und Kernbrennstoffe, nur aus wenigen Einzelschritten am Standort des Kraftwerkes. Die *Nettokosten der Energiegewinnung* liegen dementsprechend niedriger; sie betragen etwa die Hälfte der Kosten bei konventioneller Stromerzeugung. Dies sollte Anreiz genug sein, die Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet zu intensivieren.

2. Die Erde als Wärmequelle

Die Temperaturverhältnisse an der Erdoberfläche werden weitgehend von der aufgenommenen Sonnenstrahlung bestimmt. Die täglichen bzw. jährlichen Temperaturschwankungen machen sich nur in den obersten Schichten bemerkbar, bereits in etwa 30 m Tiefe findet man konstante, dem Jahresmittel entsprechende Werte. Von hier an *steigt die Temperatur*

mit zunehmender Tiefe, zunächst um rund 30 °C pro Kilometer. Eine Extrapolation mit diesem Gradienten (dT/dz) bis zum Erdmittelpunkt würde dort allerdings einen – geophysikalisch gesehen – völlig absurden Wert von beinahe 200000 °C ergeben (nach neuesten Erkenntnissen beträgt die Temperatur im Erdmittelpunkt etwa 6000 °C). Im allgemeinen nimmt die Temperatur mit zunehmender Tiefe immer langsamer zu (Tabelle I).

Die Temperaturzunahme mit der Tiefe steht in ursächlichem Zusammenhang mit dem *Wärmestrom*, welcher ständig aus dem Erdinneren gegen die Oberfläche fliesst. Dieser Wärmestrom (q) kann gemäss der Fourierschen Theorie der Wärmeleitung aus Temperaturgradient und Gesteins-Wärmeleitfähigkeit (K) berechnet werden:

$$q = -K \frac{dT}{dz}$$

In geothermisch «normalen» Gebieten, wo kein Wärmetransport durch Konvektion stattfindet, beträgt der Wärmestrom im Mittel $1,5 \mu\text{cal}/\text{cm}^2\text{s} = 63 \text{ mW}/\text{m}^2$. Dies ist ein recht bescheidener Energiefluss, jedenfalls zu gering für eine direkte Nutzung. Es ist auch nicht dieser beständige Wärmefluss, auf welchen sich das Augenmerk der Gewinnung geothermischer Energie richtet; vielmehr sind die *gewaltigen Wärmemengen* interessant, welche sich im Laufe der Erdgeschichte infolge der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Gesteine in der Erdkruste und im Erdmantel angesammelt haben.

Zur Berechnung des Wärmehaltes (Q) in einem gegebenen Gesteinskomplex dient die Formel

$$Q = \frac{1}{2} c \rho \frac{dT}{dz} h^2 F \text{ [cal]},$$

wo c die mittlere spezifische Wärme und ρ die mittlere Dichte der Gesteine, dT/dz den Temperaturgradienten, h die Mächtigkeit und F die Flächenausdehnung des Komplexes bedeutet. Berechnet man damit z. B. den Wärmehalt der obersten 10 km der Erdkruste auf Kontinenten, so kommt man auf etwa $3 \cdot 10^{26}$ cal oder $3,5 \cdot 10^{20}$ kWh; eine eindruckliche Zahl, wenn man sie mit dem Weltenergieverbrauch von rund $6 \cdot 10^{13}$ kWh/Jahr vergleicht [2]. Damit könnte man (theoretisch) den Energiebedarf der Menschheit für Jahrtausende decken! Den Wärmehalt der gesamten Erde schätzt man auf rund 10^{24} kWh

¹⁾ Mitteilung Nr. 109, Institut für Geophysik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

Temperaturzunahme mit der Tiefe nach [1]

Tabelle I

Tiefe	Alpenvorland		Zentralalpen	
	dT/dz [°C/km]	T [°C]	dT/dz [°C/km]	T [°C]
10 km	18	220	22	250
20 km	12	360	18	450
50 km	10	690	11	860

3. Gewinnung geothermischer Energie

Für eine praktische Nutzung ist jedoch weniger die Wärmemenge als das *Temperaturniveau* massgebend, bei welchem diese Wärmemenge zur Verfügung steht (T_1). Der Wirkungs-

grad der Umwandlung von Wärme in andere Energieformen ist thermodynamisch begrenzt und beträgt im Idealfall (Carnot-Zyklus)

$$\eta = 1 - \frac{T_2 [^{\circ}\text{K}]}{T_1 [^{\circ}\text{K}]}$$

wo T_2 die Umgebungstemperatur (= Temperatur an der Erdoberfläche) bedeutet. Aus diesem Grunde wird heute geothermische Energie ausschliesslich in Gebieten gewonnen, wo schon in relativ geringer Tiefe (wenige km) *erhöhte Temperaturen* (200–300 °C) herrschen und zudem auch *geeignete Energieträger* (Dampf, Heisswasser) vorhanden sind.

Die Wärmeleitung in den Gesteinen ist viel zu langsam für einen wirkungsvollen Wärmetransport vom Wärmereservoir zur Erdoberfläche. Als Transportmittel muss im Untergrund ein *Konvektionssystem mit zirkulierendem Wasser* vorhanden sein (Fig. 1). Ein solches geothermisches Feld kann in der Natur nur durch das Zusammenwirken verschiedener günstiger Faktoren entstehen: magmatischer Wärmeherd in geringer Tiefe, genügende Durchlässigkeit der Deckgesteine für die Speisung des Systems mit Niederschlagwasser, Reservoirbildung durch lokal undurchlässige Schichten usw.

Im Reservoir sammelt sich überhitzter Dampf bzw. überhitztes Wasser an. Wenn das Reservoir durch eine Bohrung erschlossen wird, kann reiner Dampf, heisses Wasser oder ein Gemisch produziert werden, je nach den Druck- und Temperaturverhältnissen (vgl. die Siedepunktkurve in Fig. 1).

Im bekannten geothermischen Kraftwerk *Larderello* in der Toscana (Italien) werden die Turbinen mit trockenem Dampf angetrieben, welcher aus etwa 200 Bohrungen stammt. Der im Vergleich mit thermischen oder Kernkraftwerken wesentlich geringere Dampfdruck (3–7 at) erfordert spezielle Turbinenkonstruktionen. Weitere geothermische Kraftwerke stehen in Kalifornien (USA), in Neuseeland, in Island, in der UdSSR sowie in Japan in Betrieb (Tabelle II). Die gesamte, weltweit installierte Kapazität beträgt gegenwärtig rund 1200 MW. Sie soll bis zum Jahre 1985 allein in den USA auf 20000 MW ausgebaut werden.

Die erwähnten geothermischen Kraftwerke sind durch beachtliche Installationen gekennzeichnet: Förderbohrungen, Leitungssysteme, Kühltürme usw. prägen das *Landschaftsbild* um eine solche Anlage. Auch verursacht die Abfallwärme,

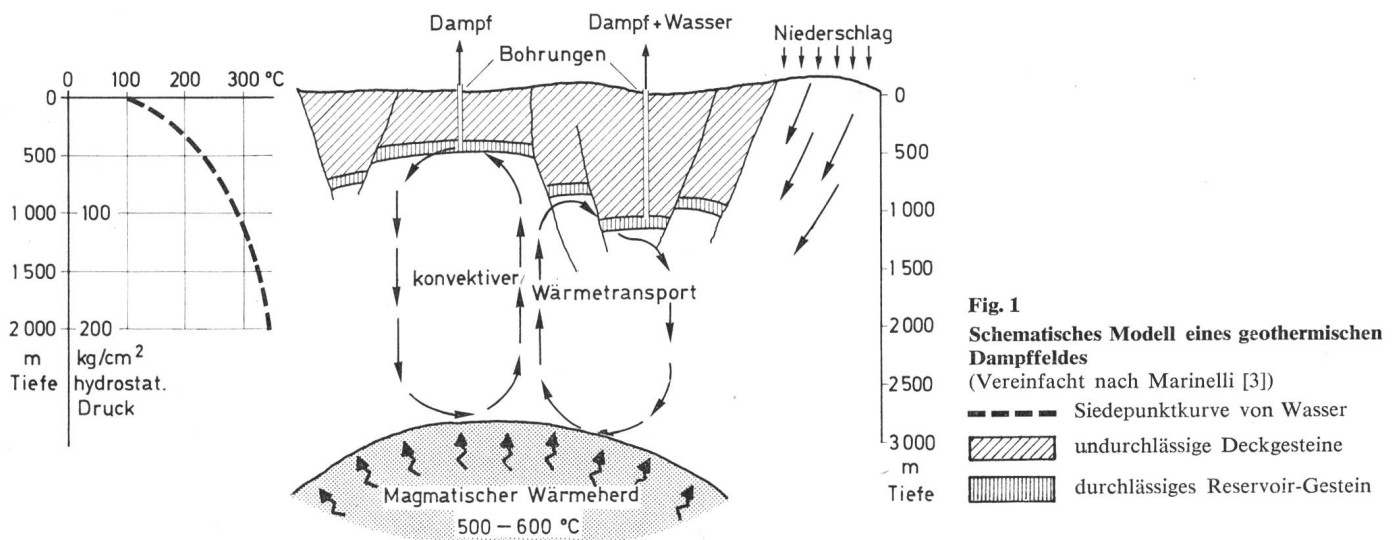
welche infolge des niedrigen Wirkungsgrades der Elektrizitätsgewinnung entsteht, immer eine gewisse *thermische Umweltbelastung*. Ferner treten gelegentlich, wenn auch in kleinen Mengen, Abgase (meist H_2S und CO_2) und mineralisierte Abwässer auf. Allen diesen Begleiterscheinungen gilt besondere Aufmerksamkeit.

Gegenwärtig sind der Elektrizitätsgewinnung aus *Heisswasser* recht enge Grenzen gesetzt durch die relativ niedrige Temperatur bzw. Enthalpie dieses Energieträgers. Dazu kommen noch Korrosionsprobleme bei Turbinenteilen und Rohrleitungen. Eine Abhilfe schafft hier die Verwendung von *Wärmeaustauschern mit einer Sekundärflüssigkeit* mit niedrigem Siedepunkt (z. B. Isobutan oder Freon), wobei die geothermische Energie an die Sekundärflüssigkeit abgegeben wird [4]. Dabei entsteht einerseits hochgespannter Dampf zum Turbinenantrieb, und andererseits kommt das mineralhaltige Heisswasser mit der Turbine nicht mehr in Berührung (Fig. 2). Dies ist zweifelsohne ein noch sehr entwicklungsfähiges Gebiet. In der UdSSR wird eine *Versuchsanlage* mit 680 kW installierter Leistung mit *Thermalwasser* (81,5 °C) betrieben.

In den USA werden im Los Alamos Scientific Laboratory umfangreiche Forschungsarbeiten zur Elektrizitätsgewinnung aus *heissen, aber trockenen Gesteinen* durchgeführt. In 3–4 km Tiefe wird das dichte Gestein (Granit) künstlich zerklüftet, kaltes Wasser durch ein Bohrloch eingeführt, welches nach genügender Erwärmung durch ein zweites Bohrloch wieder an die Oberfläche gefördert wird. Eine Projektstudie zeigte, dass es theoretisch möglich sein sollte, aus einer solchen Anlage 25 Jahre lang 100 MW thermische Leistung jährlich zu gewinnen [4]. Sollten diese Versuche auch in wirtschaftlicher Hinsicht erfolgreich sein, so eröffnen sich der Nutzung geothermischer Energie ungeahnte Perspektiven, denn heisse Gesteine sind, wenn auch in unterschiedlicher Tiefe, unter jedem Punkt der Erde vorhanden.

4. Raumheizung mit Thermalwasser

Während natürliche Dampfvorkommen ausgesprochen selten sind, kennt man viele Thermalwasservorkommen, wobei insbesondere die medizinischen Anwendungsmöglichkeiten ausgeschöpft werden. Seit 1930 heizt man etwa die Hälfte aller Wohnungen auf der Vulkaninsel *Island* mit Thermalwasser



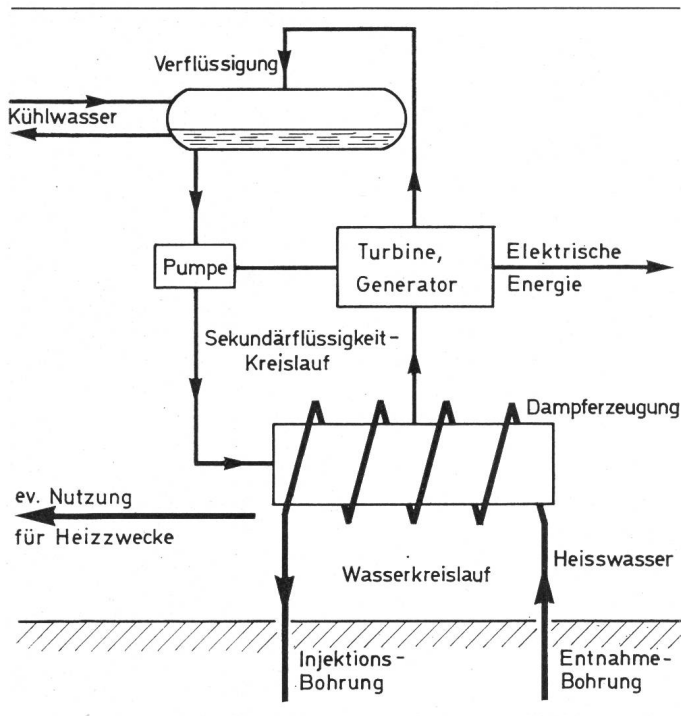


Fig. 2 Geothermische Elektrizitätsgewinnung aus Heisswasser (Schematisch nach Anderson [5])

(Austrittstemperatur 98–146 °C). Auch hat man hier wertvolle Erfahrungen mit dem Wärmetransport für Fernheizung gesammelt: so beträgt der Temperaturabfall in einer genügend isolierten Fernleitung von 18 km Länge nur 5 °C (Anfangstemperatur: 81 °C).

Das Pannonische Becken, welches einen grossen Teil Ungarns einnimmt, ist durch einen erhöhten Wärmefluss gekennzeichnet (der entsprechend erhöhte Temperaturgradient erreicht Werte um 70 °C/km). Zudem sind in den porösen Sedimentgesteinen in tieferen Lagen des Beckens grosse Thermalwasser-Reservoirs vorhanden. Diese werden gegenwärtig durch über hundert rund 2 km tiefe Bohrungen erschlossen, wobei der durchschnittliche Ertrag pro Bohrloch (bei Temperaturen zwischen 70 und 90 °C) um etwa 1500 Liter/min liegt. Mit abnehmender Temperatur wird das Thermalwasser zur Heizung von Wohnhäusern, Thermalbädern, Treibhäusern und zuletzt noch für landwirtschaftliche Bewässerung verwendet.

Bei Melun im Pariser Becken, wo keineswegs anomale geothermische Verhältnisse herrschen (der Wärmefluss zeigt normale Werte um 70 mW/m²), führt die staatliche französische Elektrizitätsgesellschaft Förderversuche durch. Hier wurde kürzlich in porösen Jura-Sandsteinen in 1800 m Tiefe ein

Wasserreservoir mit etwa 70 °C und von rund 7000 km² Ausdehnung entdeckt [4]. Der geschätzte Energieinhalt dieses Reservoirs übertrifft die gesamte installierte Kraftwerkkapazität in Frankreich (30000 MW)! Ein Betriebsversuch (Beheizung von etwa 2000 Wohnungen mit Warmwasser aus diesem Reservoir) ist im Gange.

5. Prospektionsmethoden zur Auffindung geothermischer Energieträger

Die geothermisch «höffigen» Gebiete der Erde liegen in tektonisch aktiven Zonen. Diese langgezogenen Gebiete sind durch erhöhte Erdbebenaktivität sowie meist durch aktive oder junge Vulkane gekennzeichnet. Innerhalb dieser Gebiete stehen die Chancen für die Nutzung der geothermischen Energie insbesondere in jenen Regionen gut, wo im Untergrund nebst hohen Temperaturen auch nutzbare Wassermengen vorhanden sind. Ausser dem reinen Lokalisieren bilden das Erfassen von Tiefe, Temperatur und Volumen von geothermischen Reservoirs, die Ermittlung der Menge und des Chemismus des vorhandenen Wassers sowie die Bestimmung der produktionstechnisch ausschlaggebenden Gesteinsparameter (Porosität, Permeabilität) den Aufgabenkatalog geothermischer Exploration.

Die Lösung dieser vielfältigen Aufgabe erfordert eine sinnvolle Kombination geologischer, geophysikalischer und geochemischer Methoden. Ohne hier auf einzelne Methoden einzutreten, kann festgehalten werden, dass in erster Linie Temperaturmessungen in verschiedenen tiefen Bohrlöchern den Ausgangspunkt jeder geothermischen Prospektion bilden. Da unterirdische Wassersysteme stark durch regionale Grundwasserbewegungen beeinflusst werden, kommt auch hydrogeologischen Studien besondere Bedeutung zu. Einsatz und Kombination weiterer Methoden hängen im wesentlichen von den jeweiligen lokalen Gegebenheiten ab. In jedem Fall muss in späteren Explorationsphasen durch Bohrtests (Tiefbohrungen) abgeklärt werden, ob die Nutzungskriterien (genügend hohe Temperatur, Wassermenge, Permeabilität) erfüllt sind.

6. Ein Explorationsprogramm für die Schweiz

Bestehen überhaupt Chancen, in der Schweiz nutzbare geothermische Energieträger zu finden? Diese Frage kann bejaht werden: die Schweiz liegt grösstenteils in einer tektonisch aktiven Zone, und es existieren auch verschiedene Anzeichen, wie z. B. natürliche Thermalquellen, welche für das Vorhandensein eines gewissen geothermischen Potentials sprechen. Bei der Festlegung von Explorationszielen und -methoden muss auf die geothermischen Gegebenheiten der Schweiz abgestützt werden.

Die grössten geothermischen Kraftwerke (Stand 1973)

Tabelle II

Standort	Installierte Kapazität [MW]	Energieträger	Energieinhalt (Enthalpie) des Energieträgers [cal/g]	Reservoirtemperatur [°C]	Mittlere Tiefe der Förderbohrungen [m]
The Geysers (USA)	396	Dampf	670	245	2500
Larderello (Italien)	365	Dampf	690	245	1000
Wairakei (Neuseeland)	192	Heisswasser	280	270	1000
Matsukawa (Japan)	20	Dampf/Heisswasser	550	230	1100
Paushetsk (UdSSR)	20	Heisswasser	195	200	600
Hveragerdi (Island)	17	Heisswasser	800	260	800

Leider ist das *geothermische Bild der Schweiz noch sehr unvollständig*. Bislang wurden in unserem geologisch sonst gut bekannten Land keine systematischen geothermischen Untersuchungen durchgeführt. Die vorhandenen Daten weisen grosse Lücken auf und sind oft mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet. Die zurzeit greifbaren Daten sind in Fig. 3 kompiliert. Die Karte enthält drei grundsätzlich verschiedenartige Datengruppen:

– *Wärmeflussbestimmungen* in Alpentunnels und Voralpenseen, Daten aus [6] und [7]. Die äusserst spärlichen Daten, deren Genauigkeit zudem noch durch methodische Unsicherheiten begrenzt ist, zeigen durchwegs *erhöhte Werte*, machen aber das Vorhandensein von *Dampflagerstätten*, welche zur Elektrizitätserzeugung erschlossen werden könnten, eher *unwahrscheinlich* (ein Dampfreservoir z. B. in 1500 m Tiefe würde an der Erdoberfläche einen Wärmefluss von rund 450 mW/m² bedingen).

– *Thermalquellen-Temperaturen*, Daten aus [8]. Das Verteilungsmuster ist noch unklar. Ein gewisser Zusammenhang mit der Seismizität (lokale Erdbeben-tätigkeit) scheint zu bestehen. Auffallend ist, dass natürliche Thermalquellen nur in den Alpen bzw. im Jura vorkommen. Die Werte in Fig. 3 geben die Austrittstemperatur der Quellen an der Oberfläche an. Die Thermalwasservorkommen sind ein Indiz für das *Vorhandensein von Wasser im tieferen Untergrund*. Das Fehlen von natürlichen Thermalwasseraufstössen im Molassebecken bedeutet nur, dass es hier offenbar an geeigneten Aufstiegsbahnen (z. B. steilstehende Verwerfungs-klüfte) mangelt.

– *Temperaturmessungen in Explorationsbohrungen auf Erdöl²⁾*. Messungen dieser Art ergeben oft zu niedrige Werte (Einwirkung des Bohrschlammes auf die Felstemperatur). Die Zahlen in Fig. 3 geben die Temperatur in 1 km Tiefe an. Auch

²⁾ An dieser Stelle sei der Swisstopol AG bzw. ihren Forschungsgesellschaften und der Firma Gew. Brigitta & Elwerath Betriebsführungsgesellschaft mbH (Hannover) für die bereitwillige Überlassung dieser noch unveröffentlichten Temperaturdaten, Herrn Dr. U. P. Büchi für die Vermittlung der Daten sowie Herrn Dr. M. Zimmermann von der Pétroles d'Aquitaine (Berne) S.A. für wertvolle Hinweise und Anregungen bestens gedankt.

diese zeigen durchwegs *erhöhte Temperaturen*; vergleichbare Werte findet man in Europa nur im bereits erwähnten Ungarn [9] sowie in gewissen Teilen des Oberrheingrabens in der BRD.

Selbst diese spärlichen und lückenhaften Daten lassen aber bereits den Schluss zu, dass in der Schweiz das Vorhandensein von *Thermalwasservorkommen*, welche für *Heizzwecke* usw. verwendet werden könnten, *wahrscheinlich* ist: es gibt Indizien sowohl für erhöhte Temperaturen als auch für das Vorhandensein von Wasser im tieferen Untergrund. *Diese positiven Anzeichen drängen eine systematische Prospektion nach geothermischen Energieträgern in der Schweiz auf*. Die folgenden Schritte sind angezeigt:

1. Thermische Voruntersuchungen

Kompilation und einheitliche Darstellung bereits existierender geothermischer Daten, Gradientbestimmungen in Flachbohrungen zur Erstellung von geothermischen Tiefenkarten mit Schwerpunkt im Mittelland (Bohrtiefen je nach den lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten), engmaschige Temperaturmessungen in anomalen Gebieten.

2. Regionale geophysikalische Studien

Wärmeflussbestimmungen in Bohrlöchern mit mindestens 300 m Tiefe; Korrelation geothermischer und tektonophysikalischer Daten: Zusammenhang der Temperaturverteilung mit Seismizität, mit rezenten Erdkrustenbewegungen und mit tektonischen Strukturelementen; geoelektrische Tiefensondierungen.

3. Produktionstests

An ausgewählten Bohrpunkten Untersuchung der Wassermenge (vertikale Verteilung) und des Wasserchemismus, Ermittlung der Druckverhältnisse; Porositäts- und Permeabilitätsbestimmungen, insbesondere an Molassesedimenten. Es wäre sinnvoll, diese Untersuchungen auch auf den tieferliegenden *Malm* auszudehnen, sind doch die Malmkalke auch in der Tiefe meist zerklüftet [10] und können deshalb Thermalwasser speichern.

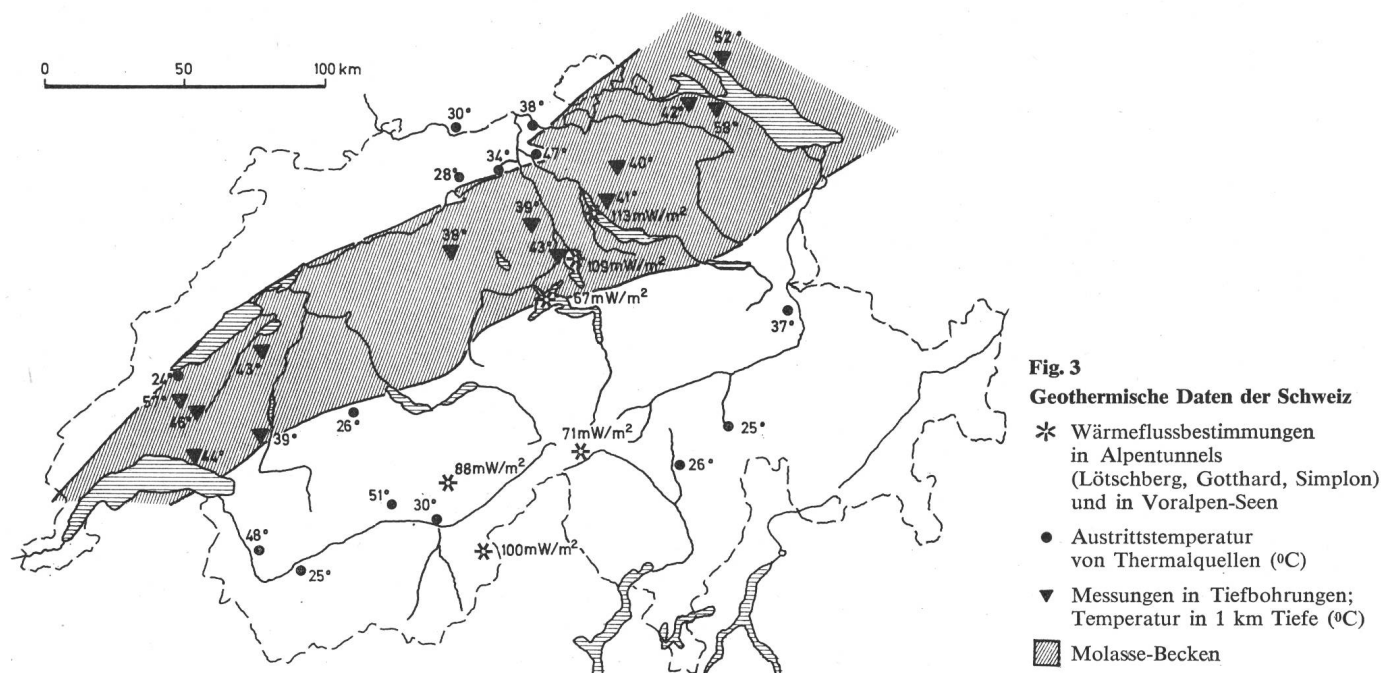


Fig. 3
Geothermische Daten der Schweiz
* Wärmeflussbestimmungen in Alpentunnels (Lötschberg, Gotthard, Simplon) und in Voralpen-Seen
● Austrittstemperatur von Thermalquellen (°C)
▼ Messungen in Tiefbohrungen; Temperatur in 1 km Tiefe (°C)
■ Molasse-Becken

4. Wirtschaftlichkeitsstudien

Förderversuche (Dauerbetrieb), Rentabilitätsberechnungen.

Der Verfasser ist der Ansicht, dass die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein nutzbarer geothermischer Energieträger in der Schweiz mindestens so gross ist wie für Kohlenwasserstoffe (Erdöl, Erdgas), deren Prospektion gerade gegenwärtig energisch vorangetrieben wird.

Literatur

- [1] L. Rybach (1973): Wärmeproduktionsbestimmungen an Gesteinen der Schweizer Alpen. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Ser. 51.
- [2] A. L. Hammond, W. D. Metz und T. H. Maugh (1974): Energie für die Zukunft. Umschau-Verlag, Frankfurt a. M.
- [3] G. Marinelli (1974): L'énergie géothermique. La Recherche 49, 827.
- [4] W. Kertz (1974): Kann Erdwärme unseren Energiebedarf decken? Umschau 74, 661.
- [5] P. Kruger und C. Otte (1973): Geothermal Energy, p. 167. Stanford University Press.
- [6] S. P. Clark und E. Jäger (1969): Denudation rate in the Alps from geochronologic and heat flow data. Am. J. of Sci. 267, 1143.
- [7] R. v. Herzen, P. Finckh und K. J. Hsü (1974): Heat-flow measurements in Swiss lakes. J. Geophys. 40, 141.
- [8] J. Cadisch (1931): Zur Geologie der Schweizer Mineral- und Thermalquellen. Verh. Natf. Ges. Basel 42, 138.
- [9] L. Rybach (1975): Geothermik, allgemeine und angewandte Aspekte. Neue Zürcher Zeitung, Beilage Forschung und Technik (im Druck).
- [10] K. Lemcke und W. Tunn: (1956): Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage. Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. Ing. 23, 35.

Adresse des Autors:

Dr. L. Rybach, Privatdozent, Institut für Geophysik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Postfach 266, 8049 Zürich.

Kernfusion – Energiequelle der Zukunft?

Von H. Knoepfel

Im nachstehenden Bericht, der in ähnlicher Form in der «Neuen Zürcher Zeitung» (27. Mai 1974) erschienen ist, werden die hauptsächlichsten Forschungsrichtungen bei der Kernfusion erläutert und wird insbesondere auf die beiden wichtigsten Arbeitslinien, den Tokamak und die Trägheitseinschlussysteme, näher eingegangen. Obschon noch viele Probleme ungelöst sind und auch nicht vorausgesagt werden kann, ob eine zufriedenstellende Lösung dieser Probleme überhaupt grundsätzlich möglich ist, können aus den bis heute erzielten Forschungsergebnissen doch einige Zukunftsperspektiven abgelesen werden. Die bis anhin noch zu überwindenden Schwierigkeiten werden erläutert.

1. Einleitung

Die Verschmelzung leichter Atomkerne unter kontrollierten Bedingungen – im folgenden kurz *Fusion* genannt – stellt eine potentielle Energiequelle dar, die für die langfristige Deckung des Energiebedarfs der Weltbevölkerung grosse Bedeutung erlangen könnte. Für die praktische Energiegewinnung muss der aus *schwerem Wasserstoff*, namentlich Deuterium und Tritium, bestehende Fusionsbrennstoff auf Temperaturen von mindestens 10 keV gebracht werden, bei denen er sich im *voll-ionisierten Plasmazustand* befindet. (Die Temperaturen werden in der Fusion üblicherweise in Einheiten der mittleren kinetischen Energie ausgedrückt, wobei folgender Zusammenhang gilt: 1 keV [Kiloelektronvolt] = 11,4 Millionen Grad Celsius.) Systematische Untersuchungen auf dem auf die Fusion ausgerichteten Gebiet der Hochtemperatur-Plasmaphysik werden seit nahezu 25 Jahren durchgeführt. Schon ab Anfang der fünfziger Jahre arbeiteten Forscher in den *Vereinigten Staaten*, in der *Sowjetunion* und in *Grossbritannien* unter strenger Geheimhaltung am Problem der gesteuerten Kernfusion. Erst als sich das Problem viel schwieriger erwies, als erwartet worden war, begann ab 1956 die Veröffentlichung der bereits durchgeführten Arbeiten. Diese Periode erreichte ihren spektakulären Höhepunkt 1958 an der zweiten internationalen Konferenz in Genf über die friedliche Anwendung der Kernenergie, an der die USA dem breiten Publikum einen Grossteil ihrer Fusionsexperimente im Betrieb vorstellten. In dieser Zeit wurde die Fusion auch in verschiedenen europäischen Staaten aufgegriffen. In dieser Hinsicht verdient die von 1957 bis 1960 wir-

Le rapport ci-dessous paru dans la Neue Zürcher Zeitung du 27 mai 1974 expose les visées essentielles de recherches dans le domaine de la fusion nucléaire et notamment dans les deux directions essentielles du Tokamak et des systèmes du confinement inertiel. Bien que de nombreux problèmes soient encore sans solution et que l'on ne puisse même prévoir s'ils sont susceptibles d'une solution satisfaisante, les résultats obtenus jusqu'ici permettent cependant d'en espérer quelque avenir. Les difficultés à vaincre jusque-là sont évoquées.

kende «*CERN Study Group on Nuclear Fusion*» erwähnt zu werden, die sich um die Förderung und um die Koordination der im Entstehen begriffenen europäischen Fusionsforschung sehr bemühte. Diese Rolle wurde dann von *Euratom* übernommen, der auch heute die Koordination und die Förderung der Fusion innerhalb der Europäischen Gemeinschaft obliegt.

In der *Schweiz* wurden Vorschläge für eine Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet schon 1956 von einigen jungen Mitarbeitern am Physikalischen Institut der ETH unterbreitet. Trotz der tatkräftigen Unterstützung durch den damaligen Institutsleiter *Prof. Paul Scherrer* gelang es aber nicht, diese neue Tätigkeit damals zu beginnen. Erst später (1961) wurde dann in Lausanne mit der Unterstützung verschiedener Persönlichkeiten aus Industrie und Forschung, insbesondere *Prof. Hans Staub*, und mit finanziellen Beiträgen des Schweizer Nationalfonds ein Plasma-Laboratorium gegründet, das nun der ETH Lausanne angegliedert wurde.

Nach einer nahezu 25jährigen Anstrengung, die trotz den Rückschlägen und den sich auftürmenden Schwierigkeiten immer von einem bemerkenswerten Optimismus begleitet war, kann man heute vom Beginn einer *neuen entscheidenden Phase in der Fusionsforschung* sprechen.

2. Fusionsplasma

2.1 Fusionsenergie

Die Fusionsenergie ergibt sich aus der Verschmelzung einiger leichter Atomkerne. Unter den wichtigsten Kernreaktionen, die praktisch in Frage kommen, sind zu erwähnen: