

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 95 (2004)
Heft: 9

Artikel: Energie aus der Tiefe
Autor: Bitschi, Andreas / Fröhlich, Klaus / Gehrer, Willy R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857938>

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: 14.05.2025

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

Energie aus der Tiefe

Geothermische Stromerzeugung – eine Lösung für die Zukunft?

Um Ressourcenknappheit, Umweltprobleme und wirtschaftliche Abhängigkeiten von anderen Regionen zu vermindern und langfristig sogar zu lösen, bedarf es einer unerschöpflichen, umweltfreundlichen Energiequelle, die nachhaltig genug ist, um aktuelle Formen der Energieerzeugung weltweit zu ersetzen. Die Geothermie hat das Potenzial, diese Energiequelle zu sein. 99% der Erdmasse sind wärmer als 1000 °C und nur gerade 0,1% kälter als 100 °C. Die Erdwärme ist ein unerschöpfliches Energiepotenzial, das kaum genutzt wird.

Bei einem Weltjahresverbrauch an fossilen Energieträgern (Bild 1) von 20 Mrd. Tonnen SKE¹⁾ reichen die heute bekannten Erdölreserven noch rund 40, die Erdgasreserven etwa 80–100 und die

Andreas Bitschi, Klaus Fröhlich, Willy R. Gehrler

Kohlereserven noch gegen 200 Jahre. Dabei ist nicht berücksichtigt, dass heute noch rund 2 Mrd. Menschen keinen Zugang zu elektrischer Energie, Erdöl oder Erdgas haben und die Weltbevölkerung jährlich um 1,3% wächst. Unter diesem Aspekt sind die Zahlen zu relativieren. Jüngste Verbraucherzahlen zeigen auf, dass China zum zweitgrössten Erdölverbraucher der Welt aufgestiegen ist. Gleichzeitig hat Shell seine Erdölvorräte kürzlich um 20% nach unten korrigiert.

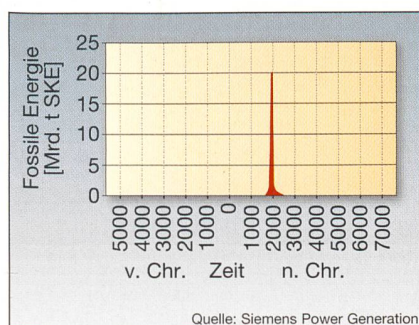


Bild 1 Verbrauch der fossilen Energieträger

Die Kernenergie wird auch in Zukunft eine wichtige Rolle zur Stromerzeugung spielen, auch wenn die Akzeptanz in der Öffentlichkeit unsicher bleibt. Bei der Kernfusion ist der entscheidende Durchbruch noch nicht gelungen und im Moment auch noch nicht absehbar. Das Potenzial der Wasserkraft ist in Europa praktisch ausgeschöpft, kann aber ausserhalb Europas noch ausgebaut werden. Es ist jedoch klar limitiert. Sonnenenergie und Windkraftanlagen sollen als additive Energieträger genutzt werden. Sie können aber die heutigen grossen fossilthermischen Kraftwerke nicht ersetzen, da sie keine konstante und regelbare Energie liefern. Die Anforderungen an eine zukünftige Energiequelle, vor allem für das «postfossile» Zeitalter, sind hoch. Sie soll nicht nur nachhaltig, umweltverträglich, wirtschaftlich und wenn möglich politisch unabhängig sein, sondern auch zukünftigen Generationen zur Verfügung stehen. Vor allem aber soll sie kontinuierlich das ganze Jahr über nutzbar und überall auf der Welt vorhanden sein. Eine Studie des Büros für Technikfolgen-Abschätzung des Deutschen Bundestages [1] kommt zur Einschätzung, dass das bis in 7 km Tiefe reichende Wärmepotenzial auf deutschem Gebiet ausreicht, um mehr als das 600fache des deutschen Jahresstrombedarfs zu decken; bei einer Nutzung der Abwärme zusätzlich das 350fache des Wärmebedarfs. In der Schweiz

kann man von vergleichbaren Voraussetzungen ausgehen.

Um mit bestehenden Energieerzeugungsformen konkurrieren zu können oder diese gar zu ersetzen, müssen auch die Wirtschaftsfaktoren stimmen: Während sich die Stromgestehungskosten bei konventionellen thermischen Kraftwerken (Tabelle I) in einem Bereich von knapp 5 Rp. (Gaskraftwerk) bis etwa 8 Rp. (Kernkraft) bewegen, ist die Bandbreite und die Obergrenze bei den regenerativen Energieerzeugungsanlagen wesentlich grösser. Zu berücksichtigen ist aber, dass bei den fossilthermischen Kraftwerken und Kernkraftwerken die Gestehungskosten stark vom Preis der Primärenergie abhängig sind und auch ein Anteil an indirekten Kosten dazugerechnet werden muss. Bei einem Kohlekraftwerk sind dies bis 6 Rp., bei einem Gaskraftwerk 1–2 Rp. Bei der regenerativen Stromerzeugung (Tabelle II) müssen bei der Kostenberechnung auch das Thema Regenergie und allfällige zusätzliche Übertragungskapazitäten berücksichtigt werden.

Erste Abschätzungen zeigen, dass die Kosten bei der geothermischen Stromerzeugung schon heute im Bereich der Windenergie liegen, mit dem unschätzbaren Vorteil, dass geothermische Energie dauernd zur Verfügung steht und dezentral realisiert werden kann. Bei einem 40-MW-Kraftwerk muss mit einem Investitionsaufwand von rund 300 Mio. Franken gerechnet werden. Davon sind etwa 70–75% für die Exploration und die Bohrungen aufzuwenden, der Rest für das Kraftwerk. Diesen hohen Investitionskosten stehen dafür sehr bescheidene Betriebskosten gegenüber. Bei 7500 Betriebsstunden pro Jahr und einer Amortisationszeit von 20 Jahren ergeben sich für ein solches Kraftwerk Stromgestehungskosten von 12–15 Rp./kWh. Wird berücksichtigt, dass die Exploration, die Bohrtechnik, aber auch die Energiekonversion einiges an Optimierungspotenzial aufweisen, dürften die Gestehungskosten noch stark reduziert werden können. Nicht berücksichtigt ist auch eine allfällige Nutzung der Wärmeenergie. Die oben genannten hohen Kosten für die Bohrungen hängen stark mit der konventionellen Tiefbohrtechnik zusammen, die

Kraftwerkstyp	Leistungs-klasse [MW]	Kosten			Kostenent-wicklung
		Gesamte Strom-gestehung	davon variabel	Indirekte	
Kohle	700	5	2	3–6	Variable Kosten ↗
Gas	500	4,8	3,1	1–2	Variable Kosten ↗
Gas und Dampf	800	5,2	3,2	1–2	Variable Kosten ↗
Kernkraft	1350	7,5	1	0,5	Variable Kosten →

Tabelle I Stromgestehungskosten thermischer Kraftwerke (nicht regenerative Stromerzeugung)

Kraftwerkstyp	Totale Geste-hungskosten	Anteil			Kostenent-wicklung
		Amortisation (+Betrieb +Steuern)	Regel-energie	Übertragungs-leitungen	
Wasser	5–22	5–20	–	2	↗
Photovoltaik	94–124	90–120	4	–	↘
Wind	18–39	13–20	4	1–15	→
Geothermie (P < 3 MW)	18–29	18–27	–	0–2	↘

Tabelle II Stromgestehungskosten bei der regenerativen Stromerzeugung

Angaben in Rp./kWh

seit ihren Anfängen nicht wesentlich weiter entwickelt wurde.

Bohrtechnik-Perspektiven

Die konventionelle Tiefbohrtechnik, wie wir sie aus der Erdöl- bzw. Erdgasgewinnung kennen, arbeitet mit Bohrgeräten, die aus Segmenten von mehreren Metern Länge zusammengesetzt sind. Jeder Wechsel des Bohrmeissels auf Grund der Abnutzung oder zwecks Anpassung an neue geologische Formatio-

nen hat das Rückziehen und Wiedereinführen des gesamten Bohrgestänges zur Folge. Das stückweise Kuppeln von Rohrsegmenten ist extrem zeitaufwändig und teuer. Das in Zusammenarbeit mit dem Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie der ETH Zürich durchgeführte europäische Forschungsprojekt PDT-Coil²⁾ hat deshalb das Ziel, die bisherigen Stahlstangen durch einen hochfesten, temperaturbeständigen und korrosionsbeständigen Schlauch (Bild 2) aus einem Karbon-Verbundwerkstoff zu ersetzen, der im fertig montierten Zustand von grossen Trommeln abgewickelt werden kann [2].

Durch Integration elektrischer Leiter in die Schlauchwandung kann ein elektrischer Bohrmotor, der direkt hinter dem Bohrkopf am Ende des Bohrstranges positioniert ist, mit Energie versorgt werden. Diese Position des Bohrmotors erfordert somit keine Drehung des Bohrstranges mehr. Es können aber auch Mess- und Regeldaten vom und zum Bohrkopf bzw. Bohrmotor übertragen werden. Wegen der schwierigen Einsatzbedingungen und der Kosten eines allfälligen Bruchs des PDT-Coils ist ein Überwachungssystem erforderlich. Dazu messen in die Schlauchwand integrierte Glasfasern über die gesamte Länge des Bohrstranges von bis zu 7 km wichtige thermische und mechanische Grössen während allen Betriebsphasen. Diese Technologie würde einen wesentlichen



Bild 2 Schematische Darstellung des «Power and Data Transmitting Composite Coiled Tubing»

Beitrag zur ökonomischen und auch zur ökologischen Erschliessung von geothermischen Reservoiren leisten.

Das «Hot Dry Rock»-Verfahren

Um die thermische Energie aus dem heissen Wirtgestein zu extrahieren, stellt das überall anwendbare «Hot Dry Rock»-Verfahren³⁾ (Bild 3) als offenes Verfahren die beste Möglichkeit dar. Das Prinzip ist relativ einfach. Über eine Tiefenbohrung auf 4–6 km Tiefe erreicht man kristallines Gestein. In diesen Tiefen beträgt die Gesteinstemperatur 150–250 °C.

Wird nun Wasser in diese Bohrung gepresst, so verteilt es sich in natürlichen kleinen und grösseren Rissen und Spalten (Klüften) und erwärmt sich. Zur Vergrösserung der Oberfläche können die Klüfte hydraulisch erweitert werden. Weitere Bohrlöcher nehmen das durch die Klüfte gepresste Wasser wieder auf und fördern es an die Oberfläche. An der Oberfläche wird das unter Druck stehende heisse Wasser über einen Wärmetauscher geleitet, dessen Sekundärkreislauf eine Dampfturbine mit Generator zur Stromproduktion treibt bzw. ein Fernwärmenetz speist. Das abgekühlte Wasser des Primärkreislaufes wird im geschlossenen Kreislauf wieder in die Tiefenbohrung gepresst. Selbst wenn nur die obersten 10 km der Erdkruste genutzt werden, kann mit diesem Verfahren 30 Mal mehr

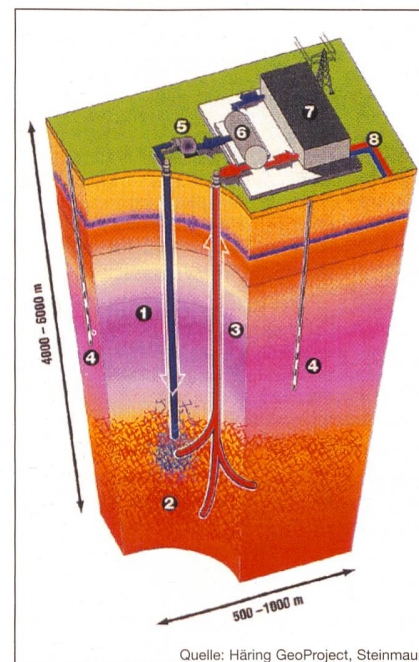


Bild 3 Schematische Darstellung des «Hot Dry Rock»-Verfahrens

1: Injektionsbohrung; 2: Stimuliertes Kluftsystem (Tiefe etwa 4–5 km; Temperatur 200 °C); 3: Produktionsbohrung; 4: Beobachtungsbohrung; 5: Förderpumpe; 6: Wärmetauscher; 7: Zentrale; 8: Fernwärme

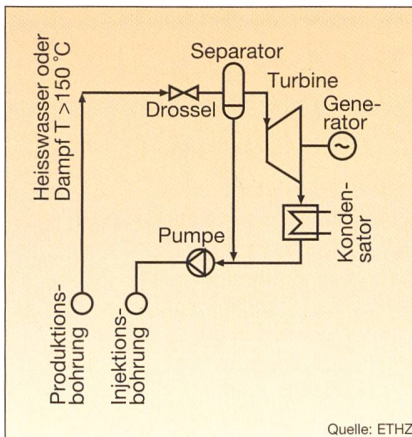


Bild 4 Blockschaftbild für die direkte Nutzung des geothermischen Fluids

Energie gewonnen werden als mit sämtlichen fossilen Reserven von Kohle, Gas und Öl zusammen.

Bereits realisierte Methoden der Energiekonversion

Die aus der Tiefe gewonnene Energie stellt aus thermodynamischer Sicht Niedertemperaturenergie dar und enthält somit einen grossen Anteil an Anergie, der nicht in Exergie (technisch nutzbare Energie) umgewandelt werden kann. Die Effizienz der Umwandlung, beschrieben durch den Carnot-Wirkungsgrad, ist dadurch relativ begrenzt. Um die Wärme aus der Erde in elektrische Energie umzuwandeln, stehen heute verschiedene Prozesse zur Verfügung. Neben Reservoirtemperatur, Dampfgehalt und Druck legen der Gehalt an nicht kondensierbaren Gasen, die Mineralisation und auch die Ergiebigkeit des Wärmervorkommens die Art der Energiekonversion fest.

Direkte Nutzung der geothermischen Fluide

Falls die Temperatur und die Qualität des geothermischen Fluids ausreichend sind, kann es direkt (Bild 4) genutzt werden.

Tritt aus dem geothermischen Reservoir Dampf aus, so kann er, nachdem dieser im Separator von Unreinheiten und Wassertropfen getrennt wurde, direkt in der Turbine entspannt werden. Heisswasser mit einer Temperatur $> 150^{\circ}\text{C}$ und entsprechenden Drücken kann über eine Drossel entspannt werden. Durch den Druckabfall verdampft (flash) sofort ein Teil des Wassers. Der Dampf wird im Separator von Unreinheiten befreit und dann in der Turbine entspannt. Das kondensierte Wasser wird anschliessend wieder in die Injektionsbohrung verpresst.

Problematisch sind mögliche Ablagerungen in der Turbine, die zu Leistungsverminderungen führen können, sowie der relativ bescheidene Wirkungsgrad.

Binäre Systeme

Um Mineralisation, nicht kondensierbare Gase, aggressive Fluide usw. besser zu beherrschen, ist es sinnvoll, die Dampfturbine über einen Sekundärkreislauf zu betreiben. In vielen Fällen sind die oben genannten Energiekonversionsverfahren nicht anwendbar, da die nötigen Temperaturen im geothermischen System nicht erreicht werden und dadurch der Wärmeübergang in den Turbinenkreislauf nicht ausreicht. Der Wärmeübergang kann aber durch Verwendung anderer Arbeitsfluide anstelle von Wasser verbessert werden.

ORC-Prozess

Der ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle) verwendet als Arbeitsmittel organische Fluide wie etwa Iso-Pentan oder Iso-Butan. Diese Fluide besitzen günstigere Verdampfungseigenschaften – niedrigere Siedepunkte ($< 100^{\circ}\text{C}$) – bei tieferen Drücken. Durch die richtige Wahl kann das Arbeitsmedium ideal an die Wärmequelle angepasst werden. Die Probleme bei diesem Prozess liegen bei den nicht gerade umweltfreundlichen Arbeitsfluiden (kurzkettige Kohlenwasserstoffe) und den grösseren Aufwendungen für die Dichtheit der Kreisläufe. Trotzdem werden ORC-Anlagen im elektrischen Leistungsbereich von 0,5 bis 1,54 MW weltweit seit über 15 Jahren betrieben.

Kalina-Prozess

Beim Kalina-Prozess (Bild 5) besteht das Arbeitsmedium im Sekundärkreislauf aus einem Zweistoffgemisch wie beispielsweise Ammoniak-Wasser.

Im Gegensatz zu Wasser, das bei einem gegebenen Druck bei konstanter Temperatur (isotherm) verdampft bzw. kondensiert, siedet das Ammoniak-Wasser-Gemisch bei ständig steigenden Temperaturen bzw. kondensiert bei ständig sinkenden Temperaturen. Nach dem Verdampfen werden in einem Separator ammoniakreicher Dampf und ammoniakarme Lösung getrennt. Die ammoniakarme Lösung wird direkt dem Hochtemperatur-Vorwärmer zur Wärmeabgabe zugeführt. Der Dampf wird über die Turbine entspannt. Der energiearme Dampf und die Lösung werden zusammengeführt, vollständig kondensiert und wieder in den Vorwärmer gepumpt. Insgesamt erreicht man damit einen geringeren Verlust bei der Wärmeübertragung sowie

eine höhere obere und eine tiefere untere Prozesstemperatur. Dies führt zu einer spürbaren Verbesserung des Carnot-Wirkungsgrades gegenüber den oben beschriebenen Prozessen. Die beschriebenen Verfahren sind grundsätzlich alle Varianten des Clausius-Rankine-Prozesses. Die Optimierungspotenziale sind noch nicht vollständig ausgereizt, jedoch sicher limitiert. Für die bei der Geothermie zur Verfügung stehenden Temperaturen werden die Wirkungsgrade auf ihrem jetzigen Niveau bleiben. Deshalb ist es wichtig, neue Ansätze zu verfolgen, die nach Möglichkeit auch in bestehende Systeme integriert werden können, um die Gesamteffizienz zu verbessern.

Die Rolle der Forschung

Die geothermische Forschung hat weltweit nur einen kleinen Stellenwert. Soweit bekannt, gibt es keinen Lehrstuhl, der sich mit diesem Thema befasst. Dabei könnten optimale Standorte für die geothermischen Kraftwerke mit verbesserten Kenntnissen der Wärmeausbreitung im Erdinnern und entsprechenden Messmethoden sehr viel leichter bestimmt werden. Verbesserungspotenziale bieten neben der Geologie auch die Energiekonversion und die Bohrtechnik. Am Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie der ETH Zürich wird mit dem Projekt GECKO (Geothermal Energy Conversion Key Objectives) auf dem Gebiet der Energiekonversion Forschung betrieben. Dieses junge Projekt umfasst neben Systemintegra-

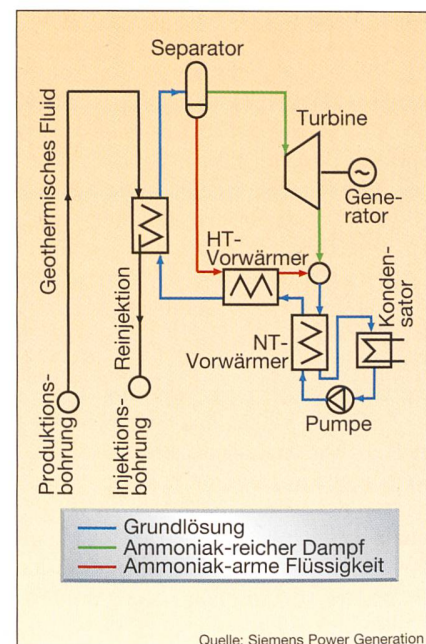


Bild 5 Blockschaftbild des Kalina-Prozesses
HT: Hochtemperatur; NT: Niedertemperatur

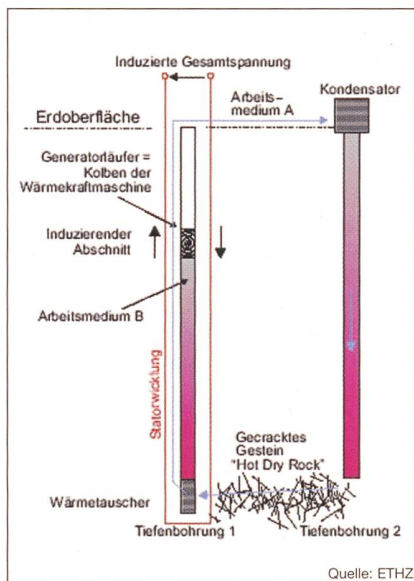


Bild 6 Einbezug eines linear wandelnden Generators in ein «Hot Dry Rock»-Schema

tionsaspekten und dem Aufzeigen von Synergien die visionären Ansätze eines Lineargenerators (einer elektrischen Sondermaschine mit dampfbetriebenen Läufer) und die Verwendung von statischen Wandlern zur Energiekonversion. Beiden gemeinsam ist die Idee der im folgenden Abschnitt beschriebenen Downhole-Konversion.

Der Lineargenerator – ein visionärer Ansatz zur Downhole-Konversion

Die Idee des Lineargenerators besteht darin, die in der Tiefe zur Verfügung stehende thermische Energie einer geothermischen Bohrung mittels eines bewegten Kolbens bereits im Bohrloch (Downhole-Prinzip) in elektrische Energie zu wandeln und diese im Anschluss an die Oberfläche zu transportieren. Der Aufbau (Bild 6) des elektromagnetischen Wandlers besteht vereinfacht aus dem induzierenden Teil der Maschine – einem elektrisch aktiven Kolben (Läufer) – und dem induzierten Teil der Maschine – einem im Erdboden versenkten Rohr, in das Wicklungen (Stator) eingearbeitet sind.

Zwischen Läufer und Stator befindet sich ein Abschnitt niedriger Permeabilität im Magnetkreis, der die Rolle eines Luftspaltes zu spielen und gleichzeitig mechanische Aufgaben zu erfüllen hat, wie etwa die Führung des Kolbens und die Aufnahme der Druckbelastung. Ein Arbeitszyklus wird ausgelöst, indem ein durch die geothermische Energie verdampftes Arbeitsmedium unter dem Läufer eingespritzt wird und expandiert. Da-

durch wird der Kolben nach oben bewegt und gibt die dabei entstehende Energie an das Wicklungssystem des Stators ab. Ein Teil der Energie wird in potenzieller Energie des Läufers gespeichert und kann in der darauf folgenden Abwärtsbewegung wieder gewonnen werden. An der Erdoberfläche wird eine Wechselspannung abzugreifen sein, deren Betrag und Frequenz in einem bestimmten Zusammenhang mit der augenblicklichen Bewegungsgeschwindigkeit des Läufers stehen. Für die Anbindung an ein elektrisches Netz muss die erzeugte elektrische Energie auf die Vorgaben des Netzbetreibers (Qualität der Klemmengrößen, konstante Leistung) abgestimmt werden.

Die Umwandlung von geothermischer Energie in elektrische Energie im Bohrloch auf elektromagnetischem Weg ist physikalisch gesehen ohne weiteres möglich. Erste Vorabrechnungen haben ergeben, dass der zu erwartende elektrische Wirkungsgrad eines aus konventionellen Materialien des Elektromaschinenbaus aufgebauten linearen Wandlers schlechter ist als der einer rotierenden Maschine derselben Nennleistung. Mittels des Einsatzes leistungselektronischer Elemente zur Regelung der Bewegung ist es aber möglich, für diese Applikation praktisch jede Topologie von Lineargeneratoren einzusetzen. Die auffälligsten Design-Empässe dieses Konzepts sind in der Dimensionierung des Magnetkreises sowie der Ausleitung der elektrischen Energie zu sehen. Als positiv zu beurteilen sind der extrem einfache mechanische Aufbau sowie der minimale Platzbedarf an der Oberfläche. Die Entwicklung neuartiger Composite-Materialien (SMC⁴⁾), mit denen auch komplizierteste magnetische Pfade modellierbar werden, könnte jedenfalls zum künftigen Erfolg derartiger Sondermaschinen beitragen. Welches Potenzial in der Ausnutzung synergetischer Effekte zwischen thermodynamischem und elektromagnetischem Teil dieser kombinierten Maschine liegt, ist Gegenstand interdisziplinärer Untersuchungen.

Statische Wandler

Neben den oben genannten klassischen thermodynamischen Kreisprozessen in ihren verschiedenen Ausführungsformen stellen die statischen Wandler eine weitere Möglichkeit für die Konversion von Wärme in elektrische Energie dar.

Der thermostatische Generator (Bild 7) als Erzeuger von elektrischer Energie besteht prinzipiell aus folgenden Teilsystemen:

- der Wärmequelle (geothermisches Reservoir) mit Übertragungskomponen-

ten, die den Wandlerelementen die thermische Energie mit der vorgesehenen Wärmestromdichte zuführt;

- den Wandlermodulen, in denen der Prozess der Energiewandlung von Wärme in elektrische Energie stattfindet;
- der Wärmesenke mit Übertragungskomponenten, die die Abwärme der Energiewandlung und die Verlustanteile des Generators aufnimmt und bei den erforderlichen Wärmestromdichten und Temperaturen an die Umgebung abgibt;
- dem elektrischen Energieaufbereitungssystem, das die Strom- und Spannungswerte nach der Energiewandlung für die weitere Übertragung anpasst.

Für die Nutzung geothermischer Energie stellt die Verwendung von heissem und kaltem Wasser als Medium zur Übertragung der Wärme von der ursprünglichen Wärmequelle zum Konverter und für die Zuführung der kalten Quelle die einfachste Möglichkeit dar. Die Zuführung erfolgt über Strömungskanäle (z.B. konzentrische Rohre), zwischen denen die Wandlermodule eingebaut sind. Als kalte Quelle stellt das Kühlen mit Luft, wegen der selbst unter Zwangskonvektion sehr begrenzten Wärmeübertragung an der Schnittstelle Metall/Luft, keine interessante Variante dar. Soll Wärme bei sehr kleinen Temperaturunterschieden gegenüber der Umgebung abgeführt werden, werden sehr grosse Wärmetauscherflächen benötigt, die unvermeidbar mit hohen Kosten verbunden sind. Kalte Flüsse, Seen und Kühltürme erweisen sich als der beste Weg, um Wärme vom

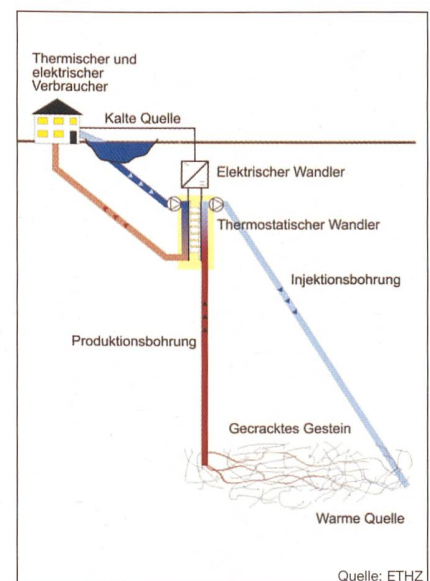


Bild 7 Schematische Darstellung eines thermostatischen Generators für die Geothermie

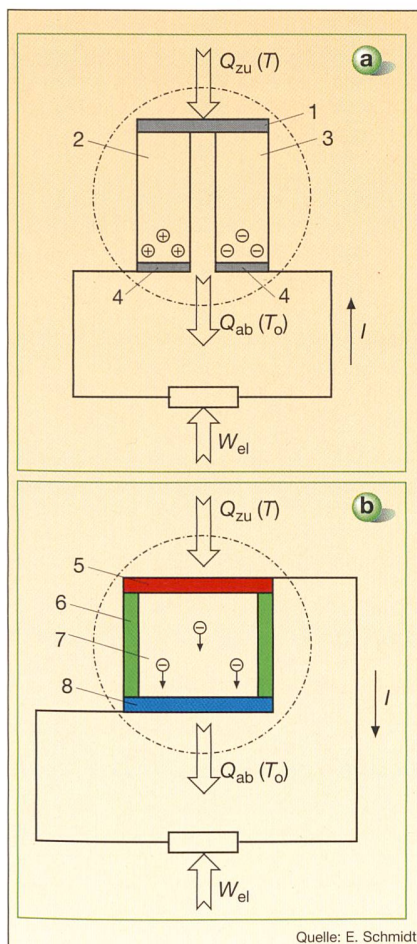


Bild 8 Schematischer Aufbau des sekundären Energiewandlers

Bild a: Halbleiter-Thermoelement; Bild b: Thermionikelement; 1: Brücke; 2: P-Schenkel; 3: N-Schenkel; 4: Kontakt; 5: Kathode; 6: Isolierung; 7: Vakuum; 8: Anode; $\oplus$: Elektron; $\ominus$: Defektelektron; W : Arbeit; Q : Wärme

Wandler abzuführen. Die Effektivität von Kühltürmen hängt allerdings stark von den Parametern der Verdampfung ab.

Eine elementare Entwurfsrichtlinie für einen Wärmeübertrager zur geothermischen Energiewandlung ist das Aufrechterhalten des Temperaturunterschieds an den Arbeitsoberflächen des Wandlerrmoduls. Entscheidend für die Erfüllung dieser Bedingung ist der Wärmeübertragungskoeffizient zwischen dem Wärme zuführenden Fluid und der Aussenwand des Strömungskanals sowie der thermische Gesamt Widerstand zwischen der Aussenwand und der Arbeitsoberfläche der Module. Für das Erreichen eines guten Wärmeübertragungskoeffizienten haben die Strömungsverhältnisse (Turbulenzen) eine grosse Bedeutung. Der thermische Gesamt widerstand kann durch geeignete Werkstoffwahl relativ einfach kontrolliert werden. Konstante Druckverhältnisse sind wichtig für einen guten

thermischen Kontakt zwischen Strömungskanal und Moduloberfläche.

Thermoelektrik – Thermo-tunnel

Für den Aufbau der Wandlermodule stehen zurzeit nur Thermoelemente (Bild 8, oben) zur Verfügung. Sie arbeiten nach dem Seebeck-Effekt [3] und konvertieren eine Temperaturdifferenz in eine elektrische Spannung. Thermoelektrische Module sind Massenprodukte, gepackt zu flachen Zellen mit Flächen von wenigen Quadratzentimetern. Im Inneren der einzelnen Module sind Felder von Halbleiter-Kristallen (z.B. Bismut-Tellurid) in Serie geschaltet. An den beiden Enden der Kristallkette kann eine zum Temperaturunterschied proportionale Spannung abgegriffen werden. Während auf diese Weise elektrische Energie erzeugt wird, wird auch ein grosser Teil der Wärme über die Kristalle von der heissen Seite zur kalten Seite geleitet. Dieser Wärmeleitungsmechanismus limitiert die Effektivität der Thermoelemente relativ stark. Heute erhältliche Thermoelemente erreichen Wirkungsgrade von 4–10% bei Temperaturdifferenzen zwischen 90 °C und 150 °C.

Vergleichsweise höhere Wirkungsgrade bei gleichen Temperaturdifferenzen versprechen die Thermo-tunnel-Konverter [4]. Diese beruhen in Anlehnung an die Thermionikelemente (Bild 8, unten) auf dem glühelektrischen Effekt und haben somit auch einen vergleichbaren Aufbau. Der höhere Wirkungsgrad begründet sich dadurch, dass der Elektronen leitende Schenkel des Thermoelementes durch eine Vakuumschicht ersetzt wird. Dadurch ist der parasitäre Wärme-

austausch zwischen den beiden Elektroden auf die Strahlung beschränkt, wodurch die Wärmeleitungsverluste entfallen, was die Effizienz des Wandlers steigert. Die kinetische Mindestenergie, die ein Elektron zum Verlassen des Emitters benötigt, ist die Austrittsarbeit. Diese Austrittsarbeit, im Energiebändermodell (Bild 9, links) als Barriere ersichtlich, muss den Elektronen von aussen zugeführt werden.

Im Falle der thermischen Elektronenemission erhalten die Elektronen des Emitters hohe kinetische Energien durch Zuführung von Wärme. Um eine ausreichende Elektronenemission zu erreichen, müssen Austrittsarbeiten aufgewendet werden, die bei allen in Frage kommenden Werkstoffen in einem Bereich liegen, der Temperaturen über 1000 K erfordert. Zusätzlich erreicht in einem realen Thermionikelement nur ein Teil der emittierten Elektronen den Kollektor, da sich schon bei kleinen Stromstärken eine Raumladungswolke von Elektronen über der Emitteroberfläche ausbildet, welche für die emittierten Elektronen eine Erhöhung der Austrittsarbeit bedeutet und somit zusätzliche thermische Energie bzw. höhere Temperaturen erfordert. Diese Einschränkungen machen die Thermionikelemente angesichts der verwendbaren Temperaturniveaus bei der geothermischen Verstromung wenig interessant, wenn nicht sogar unbrauchbar.

Nun wird aber bei den Thermo-tunnel-Konvertern von sehr kleinen Elektrodenabständen (1–10 nm) ausgegangen. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik ist es möglich, dass Teilchen (Elektronen), abhängig von deren Energie und der Gestalt der Energiebarriere (Höhe und Breite),

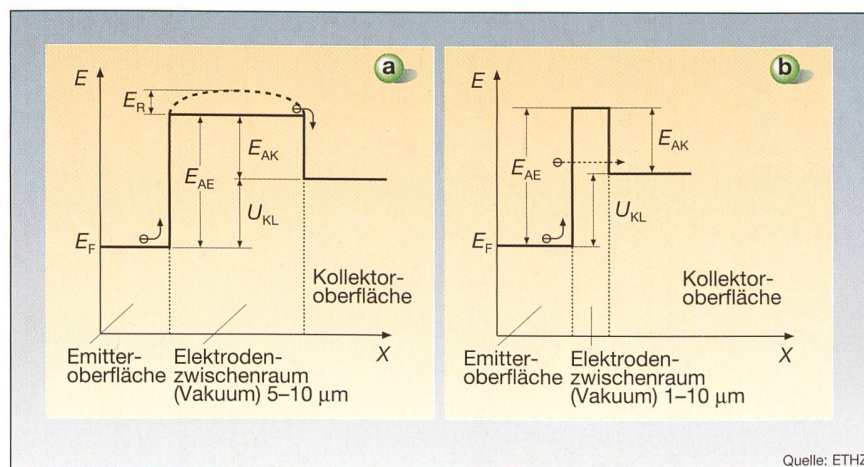


Bild 9 Energiebändermodell der metallischen Oberfläche eines idealen Thermionikelements (links) und eines Thermo-tunnelelements (rechts)

E_{AE} : Austrittsarbeit des Emitters; E_{AK} : Austrittsarbeit des Kollektors; E_F : Fermi-niveau; E_K : Einfluss der Raumladung; U_{KL} : Klemmenspannung

diese im Unterschied zu den Thermionik-elementen auch durchtunneln können (Bild 9, rechts). Die Energie der Teilchen wird durch die Temperatur der Wärmequelle, die Höhe der Energiebarriere durch die Austrittsarbeit des Emittierwerkstoffes und die Breite der Barriere durch den Elektrodenabstand bestimmt. Die Temperaturen geothermischer Reservoirs sind vorgegeben und die Austrittsarbeit ist eine Werkstoffgrösse, die nicht weiter beeinflusst werden kann. Der Elektrodenabstand ist somit jener Parameter, den es im Hinblick auf eine maximale Effizienz zu optimieren gilt. Es wird erwartet, dass die Realisierung solch kleiner Vakuumrücken mit den Fortschritten der Nanotechnologie in naher Zukunft umgesetzt werden kann. Thermotunnel-Konverter besitzen das Potenzial, Wärme mit 60–70% der Carnot-Effizienz über einen weiten Temperaturbereich in elektrische Energie zu konvertieren. Obwohl der Ansatz visionär ist, zeigt er doch, in welche Richtung die Forschung gehen sollte. Thermotunnelkonverter würden nicht nur der Geothermie zum Durchbruch verhelfen, sondern auch die gesamte (Ab-)Wärmenutzung revolutionieren.

Ausblick

Um die Geothermie aus ihrem Schattendasein zu einer wirklichen, weit verbreiteten Alternative zu machen, sind grundsätzlich drei Stossrichtungen nötig:

- **Geologie:** Hier würden weitere Erkenntnisse über die Strömungsverhältnisse in tiefen Gesteinsschichten, die Wärmeausbreitung im Erdinneren und daraus eine exakte Bestimmung der potenziellen Standorte einen grossen Fortschritt bedeuten.
- **Bohrtechnik:** Innovationen in der Bohrtechnik senken die Investitions-

kosten drastisch und verbessern somit die gesamte Wirtschaftlichkeit.

- **Konversion:** Erhöhung der Effizienz der konventionellen Verfahren durch Ausreizen der Optimierungspotenziale. Parallel dazu werden visionäre Ansätze verfolgt, die auch zu Synergien mit bestehenden Konversionstechnologien führen könnten.

Wenn dies gelingt, bestehen beste Voraussetzungen, eine zusätzliche sehr nachhaltige Quelle zu erschliessen, welche zumindest einen grossen Teil des steigenden Energiebedarfs decken kann.

Referenzen

- [1] H. Paschen, D. Oertel, R. Grünwald: Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland. Büro für Technologiefolgeabschätzung des deutschen Bundestages, TAB-Arbeitsbericht, Nr. 84, Mai 2003.
- [2] S. Neuhold, K. Fröhlich, D. Inaudi: Bohrgestänge von der Rolle, Bulletin SEV/VSE 15/03.
- [3] B. Klöckl: ETG-Informationstagung: Geothermische Energie-Erzeugung, Energiekonversion Downhole – eine Vision. FH Aarau, 19. März 2003.
- [4] S. Kilgus, A. Geirsson, T. Sigfusson: Harnessing of low temperature geothermal and waste heat using power chips in Varmar heat exchangers. Paper to the International Geothermal Conference in Reykjavik, Iceland, September 2003.

Angaben zu den Autoren

Andreas Bitschi, Dipl. Ing., ist seit 2003 Assistent am Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik. Er betreut in dieser Funktion das Projekt GÉCKO.
ETH Zürich, Physikstrasse 3, 8092 Zürich,
abitschi@eeh.ee.ethz.ch

Willy R. Gehrer ist Geschäftsbereichsleiter der Siemens Schweiz AG und Präsident der Energietechnischen Gesellschaft (ETG), eines Fachverbands von Elektrosuisse. In dieser Funktion machte er die Förderung der Geothermie zu einer Hauptaufgabe dieser Vereinigung.
Siemens Schweiz AG, Freilagerstrasse 40,
8047 Zürich, willy.gehrer@siemens.com

Prof. Dr. **Klaus Fröhlich** ist seit 1997 Professor für Hochspannungstechnologie an der ETH Zürich. Zuvor war er sieben Jahre Inhaber eines ähnlichen Lehrstuhles an der TU Wien. Dem voraus gingen elf Jahre Entwicklungstätigkeit bei BBC/ABB Schweiz auf dem Gebiet der Hochspannungsapparate. Klaus Fröhlich ist Vorstandsmitglied von Electrosuisse, Chairman des Cigré-Studienkomitees A3 (High Voltage Equipment) und Fellow Member des IEEE.
ETH Zürich, Physikstrasse 3, 8092 Zürich

¹ Dies entspricht $162 \cdot 10^{12}$ kWh.

² Projekt im Rahmen des 5. Forschungsrahmenprogramms der EU (1.4.b.2 Economic and efficient energy for a competitive Europe). Originaltitel des Projekts: PDT-COIL: Research and development of an intelligent power and data transmission composite coiled tubing for the exploration of hydrocarbons. Laufzeit: 1.9.2000 bis 28.2.2003. E-Projektnummer: ENK6-2000-00074.

³ M. Häring: Häring Geo-Project, 8162 Steinmaur, www.geothermal.ch

⁴ SMC: Soft Magnetic Composite

L'énergie venue des profondeurs

L'électricité géothermique – une solution d'avenir?

En vue de réduire les problèmes de pénurie de ressources, d'environnement et de dépendance économique à l'égard d'autres régions et même de les résoudre à long terme, il faut une source d'énergie inépuisable et respectueuse de l'environnement qui soit suffisamment durable pour remplacer les formes actuelles de production d'énergie au niveau mondial. La géothermie a le potentiel en vue d'être précisément cette source d'énergie. 99% de la masse terrestre ont une température supérieure à 1000 °C et tout juste 0,1% est plus froide que 100 °C. La chaleur géothermique est un potentiel énergétique encore guère utilisé.

Grossbildrückprojektion ME multiView



Stationsleittechnik

neueste Technologie



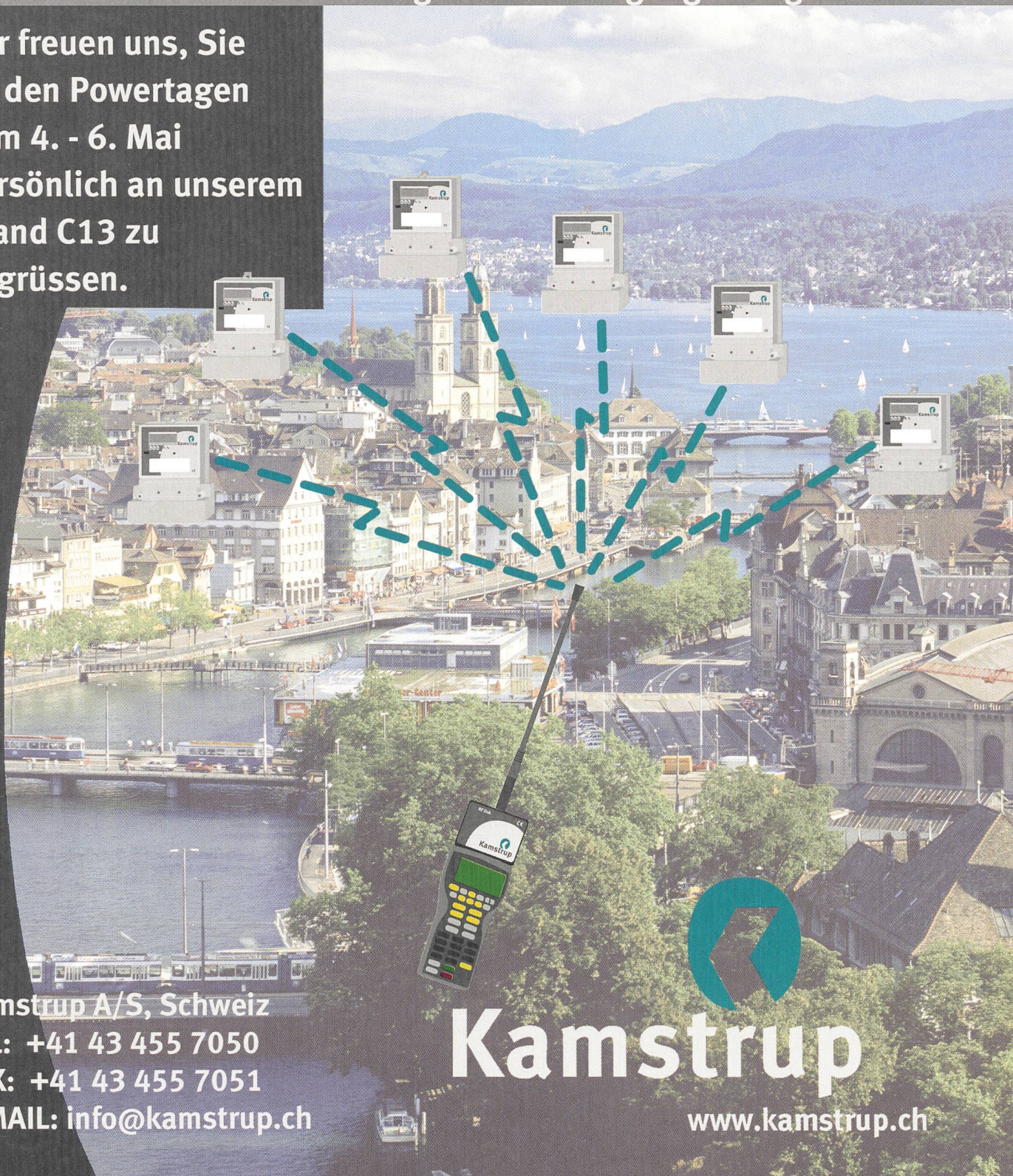
mauell
... liefert Lösungen

MAUELL AG
Furtbachstrasse 17
CH-8107 Buchs
Tel. +41 (0)1 847 42 42
Fax +41 (0)1 844 44 56
Internet: www.mauell.ch
E-Mail: info@mauell.ch

Energiedaten jederzeit abrufbar — durch Funkübertragung

Messtechnische Lösungen für Versorgungsanlagen

Wir freuen uns, Sie
an den Powertagen
vom 4. - 6. Mai
persönlich an unserem
Stand C13 zu
begrüssen.



Kamstrup A/S, Schweiz
TEL: +41 43 455 7050
FAX: +41 43 455 7051
E-MAIL: info@kamstrup.ch


Kamstrup

www.kamstrup.ch

Dem Leben Energie geben

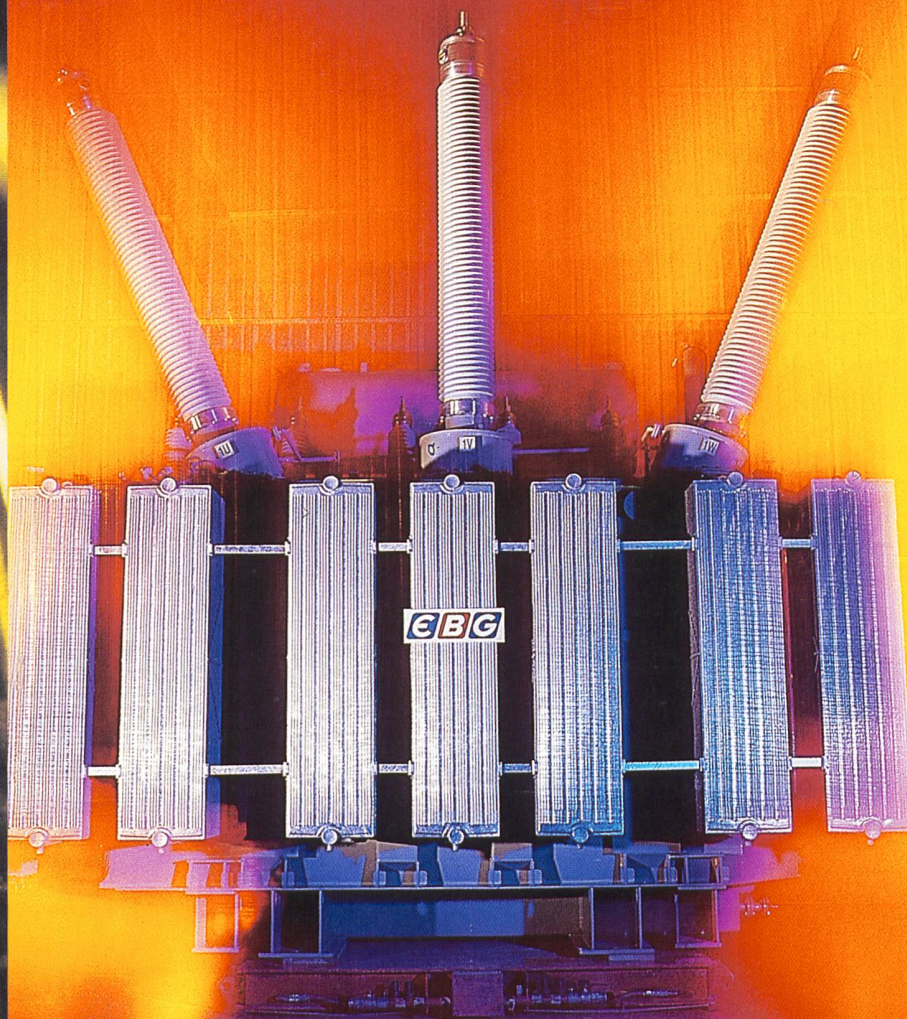
Liefer- und Leistungsprogramm:

Ölisolierte Transformatoren

von 2,5 MVA bis 200 MVA
Nennleistung und 245 kV
Nennspannung, ausgeführt als
Maschinen- oder Netzregel-
transformatoren mit
Lastregelschalter; Kühlung mit
Öl-Luft- oder Öl-Wasser-
Kühlanlagen; Anschlüsse über
Freiluftdurchführungs-
Schienenkanal-, Kabelend-
verschluß- oder SF₆-Systeme;
Bauausführung nach
Kundenwunsch, und gemäß
internationalen Vorschriften

Erdschluß- Schutzeinrichtungen:

- Erdungstransformatoren (Sternpunktbildner)
- Erdschluß-Löschspulen mit fixer Induktivität bzw. umschaltbarer Wicklung
- Tauchkern-Erdschluß-Löschspulen
- Netz-Erdschluß-Analysator (Resonanzregler)
- Belastungswiderstände
- Widerstandssteuerung



T&D