Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 101 (2010)
Heft: 7

Artikel: Thermoelektrische Systeme in der Stromerzeugung
Autor: Bitschi, Andreas / Fröhlich, Klaus
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856093

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

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

Thermoelektrische Systeme in der Stromerzeugung

Theoretische Modelle und realisierte Demonstratoren – Potenziale und Entwicklungen

Eine effizientere Nutzung der Energie entlang der gesamten Erzeugungs- und Versorgungskette sowie die Nutzung von erneuerbaren Energien sind zwei entscheidende Punkte für das Erreichen eines nachhaltigen Energieversorgungssystems. Heute fallen enorme Mengen an ungenutzter, thermischer Energie bei der Energieerzeugung, bei Industrieprozessen, Transportsystemen, Privathäusern und öffentlichen Gebäuden an.

Andreas Bitschi, Klaus Fröhlich

Die Nutzung dieser sogenannten Abfallwärme erweist sich aufgrund ihrer relativ tiefen Temperaturen und mässigen Energiedichten oft als aufwendig und kompliziert und somit ökonomisch uninteressant, wenn auch die absolute Menge riesig ist. Die thermoelektrische Energiewandlung könnte dafür eine Lösung sein. An der ETH Zürich wurden deshalb mit der Unterstützung des Bundesamts für Energie (BFE) theoretische Modelle entwickelt, auf deren Basis zurzeit ein erster Demonstrator mit einer generierten, elektrischen Leistung von ca. 1 kW aufgebaut wird. Aufgabe dieser Arbeiten ist die gesamthafte, energetische Beurteilung von thermoelektrischen Energieerzeugungssystemen für die Nutzung von Niedertemperaturwärme (< 150 °C) in verschiedenen Leistungsbereichen.

Nach Abschätzungen der U.S. Energy Information Administration (EIA) [1] werden im Jahr 2010 weltweit 75,6 EJ (21 Billionen kWh) an elektrischer Energie erzeugt und verbraucht werden. Bei Annahme eines durchschnittlichen Wirkungsgrads von 40 % bedeutet dies, dass ca. 115 EJ ungenutzt als Abfallwärme anfallen. Zusätzlich erzeugen alleine die Prozesse der amerikanischen Industrie 7,4 EJ an Verlustwärme. Detaillierte Studien des Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) [2] zeigen die Menge der aktiv abgeführten thermischen Energie der chemischen Industrie und der Ölraffination (Bild 1). Jährlich werden in diesen Industriebereichen mehr als 100 PJ an thermischer Energie aus Quellen mit einer Wärmeleistung > 0,5 MW und Temperaturen über 50 °C aktiv gekühlt und somit ungenutzt und mit zusätzlichem Energieeinsatz an die Umgebung abgegeben. Noch weitaus grössere Abfallwärme-Potenziale sind in inaktiv gekühlten Abgasströmen und anderen Industriebereichen vorhanden, was z. B. in Summe eine Menge von 530 PJ/Jahr nur in den Niederlanden ergibt.

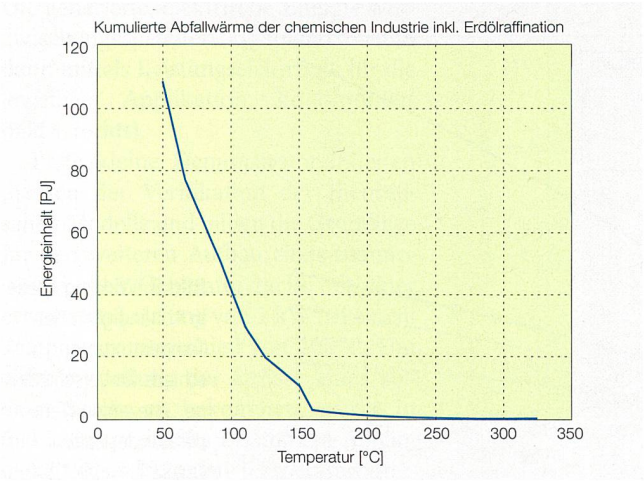


Bild 1 Kumulierter Energieinhalt der Abfallwärme der chemischen Industrie inkl. Erdölraffination in den Niederlanden (Quelle: ECN).

Sehr grosses Nutzungspotenzial von Abwärme

In bestimmten Fällen kann diese Wärme in der gleichen Prozesskette oder zumindest am gleichen Ort genutzt werden. Oft ist die Abfallwärme jedoch nicht auf dem benötigten Temperaturniveau, fällt an, wenn sie nicht eingesetzt werden kann oder die Wege zwischen Quelle und Verbraucher zu lang sind. Aus diesen Gründen wird an kostengünstigen Lösungen für die Aufwertung (Anhebung der Temperatur für Prozesswärme), Speicherung und den Transport von Abfallwärme gearbeitet.

Neben der industriellen Abwärme und den Verlusten bei der elektrischen Energieerzeugung mit thermischen Kraftwerken sind auch noch die Verluste in der Informationstechnologie und im Mobilitätsbereich enorm. Der Wirkungsgrad von Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen liegt im Durchschnitt unter 15 %, wobei ein Grossteil der Verlustwärme bei Temperaturen abgegeben wird, die durchaus genutzt werden könnten.

Die Nutzung der Abgaswärme von Kraftfahrzeugen ist bei den führenden Herstellern seit Langem eine intensiv untersuchte Thematik. Die im Folgenden näher vorgestellte Technologie der Thermoelektrik soll den Durchbruch bringen. In grossen Datenzentren (5–20 MW Anschlussleistung) wird die zugeführte elektrische Energie zu über 99 % in Wärme umgewandelt. Für die Kühlung der Recheneinheiten muss heute bereits gleich viel Geld investiert werden wie in die Recheneinheiten selbst. Im Rahmen von «Green IT»-Projekten wird ebenfalls nach Lösungen für die Verwendung dieser Abwärme gesucht.

Die Nutzung der Abwärme für weitere (untergeordnete) Wärmeversorgungsaufgaben (Kraft-Wärme-Kopplung, Kombination mit Wärmepumpen), die Verwendung in Trockenanlagen oder die Erzeugung von Kälte mit Absorptionskältemaschinen sind Möglichkeiten der Weiterverwendung.

Die weitaus interessantere Alternative ist die Wandlung in elektrische Energie. Für die Generierung von elektrischer Energie aus Niedertemperaturenergie (< 150 °C) sind Modifikationen des Clausius-Rankine-Kreislaufs wie Organic-Rankine-Cyles (ORC), der Kalinaprozess oder Stirlingmaschinen bekannte Technologien. Diese Technologien arbeiten mit bewegten und somit verschleissbehafteten Teilen, was einen relativ grossen Wartungsaufwand bedingt. Die zusätzlichen Begrenzungen wie Unflexibilität gegenüber Temperaturschwankungen der thermischen Quellen, geringe Modularität und die allgemein hohe Komplexität der Prozesse motivieren die Suche nach einer direkten Konversionsmethode ohne bewegte Teile. Eine interessante Möglichkeit in diesem Zusammenhang ist die bereits erwähnte thermoelektrische Energiewandlung.

Thermoelektrische Module und Materialien

Thermoelektrische Wandler ermöglichen die direkte Wandlung von thermischer Energie aus verschiedensten Quellen (z. B. erneuerbare Energien oder Abfallwärme) in elektrische Energie. Die Vorteile sind der geringe Wartungsaufwand, die hohe Modularität und die Möglichkeit der Nutzung von thermischer Energie über einen grossen Temperaturbereich. Für den Einsatz zur Energieerzeugung werden sogenannte thermoelektrische Module verwendet **(Bild 2)**. Dies sind Massenprodukte, gepackt zu flachen Zellen mit Flächen von wenigen Quadratzentimetern. Im Inneren der einzelnen Module sind Felder von Halbleiterkristallen (heute meist Bismut-Tellurid) kontaktiert und in Serie geschaltet. Durch einen angelegten Temperaturgradienten wird (entsprechend dem Seebeckeffekt) eine Spannung generiert und in weiterer Folge durch äussere Beschaltung mit einer Last die erzeugte elektrische Energie umgesetzt.

Effiziente Energiewandlung nach dem Seebeckeffekt erfordert Materialien mit hohem Seebeckkoeffizienten (α), hoher elektrischer Leitfähigkeit (σ) und gleichzeitig geringer thermischer Leitfähigkeit

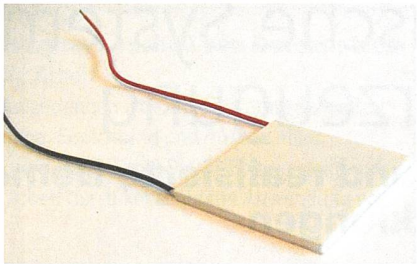


Bild 2 Ein thermoelektrisches Modul. Quelle: thermalforce.de.

(λ). Diese Eigenschaften werden in der sogenannten «Figure of Merit» oder Gütezahl ZT zusammengefasst:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \times \sigma}{\lambda} \times T$$

Heutige Materialien haben maximal ein ZT von 1. Dies bedeutet einen Wirkungsgrad von 10–15 % des jeweiligen Carnot-Wirkungsgrads:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_H \quad T_C}{T_H}$$

mit T_H als Temperatur der warmen und T_C als Temperatur der kalten Quelle. **Bild 3** zeigt den Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Temperaturunterschieds für verschiedene Gütezahlen der thermoelektrischen Materialien.

Es ist ersichtlich, dass der Wirkungsgrad für heute erhältliche Materialien (ZT = 1) noch relativ gering sind. Neueste Publikationen sprechen jedoch von zukünftigen Materialien bzw. Technologien, die einen Wirkungsgrad von über 40 % des Carnot-Wirkungsgrads erreichen. Die Materialwissenschaft verfolgt hierbei gleichzeitig mehrere Ziele. Zum einen ist es die Entwicklung von effizienteren Materialien (hohes ZT) zu günstigeren Preisen. Dabei sollte auf seltene Rohstoffe (Ressourcenknappheit, Preis) verzichtet werden und keine ökologisch bedenklichen Materialien eingesetzt werden, um zukünftige Entsorgungsprobleme zu vermeiden.

Entsprechende Technologien sollen in den nächsten Jahren kommerziell zugänglich gemacht werden. Für diesen wichtigen Bereich konnte mit der Abteilung Festkörperchemie und Katalyse der Empa Dübendorf ein im Bereich Thermoelektrika führender Partner gefunden werden.

Arbeiten an der ETH Zürich – theoretische Modelle und realisierte Demonstratoren

Für die Erzeugung von elektrischer Energie aus thermischer Energie müssen die Module in eine Wärmeübertragungseinheit integriert werden, um die thermische Energie möglichst direkt und verlustfrei zu- bzw. auch abführen zu können. Dabei ist der Wärmeübergang an den jeweiligen Kontaktflächen (warme und kalte Seite) von grosser Bedeutung.

Am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik der ETH Zürich wurden mit der Unterstützung des Bundesamts für Energie (BFE) in den vergangenen Jahren theoretische Modelle [3] für die thermoelektrische Energiewandlung entwickelt und mit ersten Demonstratoren validiert. Die Modellierung wurde in zwei verschiedenen Grössenordnungen durchgeführt, welche bidirektional ineinandergreifen. Einerseits wurden physikalische Modelle von einzelnen Modulen aufgebaut, welche in Kooperation mit der Empa Dübendorf durch Aufbau von Modulprototypen mit dort neu entwickelten Materialien (TOMs) validiert wurden.

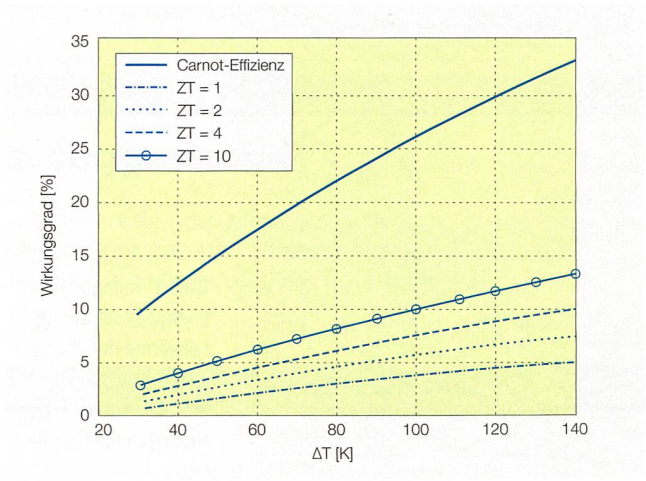


Bild 3 Wirkungsgrade in Abhängigkeit des Temperaturunterschieds für verschiedene Gütezahlen (Temperatur der kalten Quelle T_C = 10 °C).

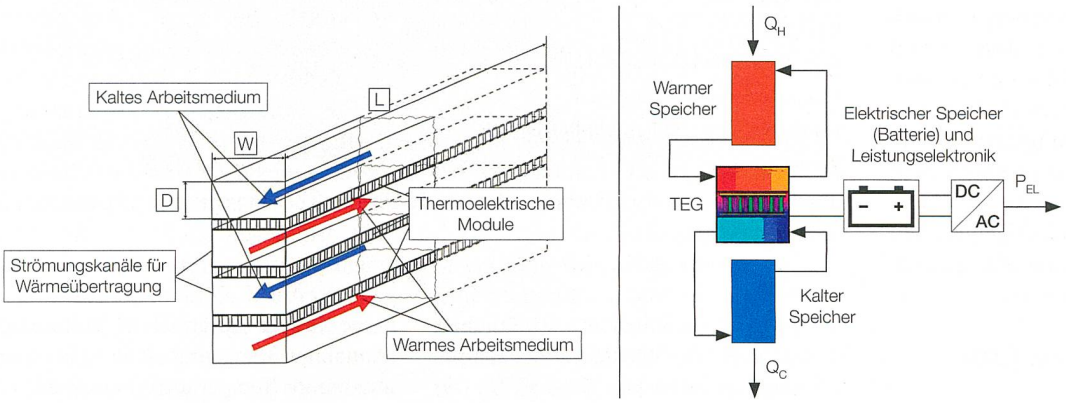


Bild 4 Schema des Stack-Modells (links), Systemkonfiguration der Prototypen (rechts).

In einem zweiten Schritt wurden komplette thermoelektrische Energieerzeugungssysteme modelliert. Solche Systeme bestehen aus einer Kaskadierung von thermoelektrischen Modulen, eingepackt zwischen Strömungskanälen (Stackstruktur), die jeweils im Gegenstrom von durch Pumpen getriebenen kalten und warmen Fluidströmen durchflossen werden. **(Bild 4, links)**. Für theoretische Parameterstudien und die Optimierung des Gesamtsystems wurden die geometrischen Abmessungen der Strömungskanäle, die Modulparameter sowie der Volumenstrom der Arbeitsmedien (kalt und warm) unabhängig voneinander variiert. Letztere haben in Kombination mit dem Strömungsquerschnitt einen grossen Einfluss auf den wirksamen Wärmeübergangskoeffizienten an der warmen bzw. kalten Seite als auch auf die benötigte Pumpenleistung, welche für die Beurteilung der netto erzeugten Leistung von Bedeutung ist.

Beim realen Aufbau der Demonstratoren nach den Optimierungsergebnissen der Simulationen sind die Fluidströme über geschlossene Kreisläufe mit den jeweiligen Reservoirs verbunden. Die generierte, elektrische Energie wird zwischengespeichert (gepuffert) und dann mittels Leistungselektronik für die jeweilige Applikation konditioniert **(Bild 4, rechts)**.

Erste kleine Demonstratoreinheiten dienten der Verifikation der theoretischen Modelle und bilden die Grundlage für den weiteren Aufbau eines thermoelektrischen Generatorstacks mit einer erwarteten Leistung von 1 kW bei einem Temperaturunterschied von 100 °C. Um eine Vorstellung der Grösse eines solchen Stacks zu bekommen, wurde in **Bild 5** die spezifische Leistung in Abhängigkeit des wirksamen Temperaturunterschieds dargestellt. Das zugrundeliegende Volumen beinhaltet nur die Stackeinheit, bestehend aus Modulen und Strömungskanälen ohne Peripherie wie Pumpen, Puffer und Mess- und Steuerungstechnik. **Bild 5** zeigt, dass bereits heute mit der besten erhältlichen Technologie (BAT, Best Available Technology, ZT = 1) Leistungsdichten erreicht werden, die es ermöglichen, kompakte und somit auch portable Einheiten über einen grossen Leistungsbereich zu konstruieren.

Für die kommerzielle Erzeugung von elektrischer Energie ist eine seriöse Beurteilung der Investitionskosten und der Stromgestehungskosten wichtig. Deshalb wurde auch eine ökonomische Beurteilung der elektrischen Energieerzeugung auf Basis der Thermoelektrik durchgeführt. Die von einem einzelnen Modul (Volumeneinheit) generierte Leistung ist abhängig vom wirksamen Temperaturunterschied, der Gütezahl ZT der Materialien und zusätzlich der Fertigungsqualität der Module.

Für die Evaluierung der spezifischen Investitionskosten (SIK) wurden neben dem dominierenden Anteil der Kosten für die Module zusätzlich 30 kCHF/(m^3 Stack) für die Wärmeübertragungseinheit und Peripherietechnik kalkuliert. In **Bild 6a** sind die daraus resultierenden SIK als Funktion des Temperaturunterschieds und der Gütezahl ZT bei heute gültigen Marktpreisen für thermoelektrische Generatormodule dargestellt. Bei den **Bildern 6b und 6c** wurde eine Senkung der Modulpreise um 50 % bzw. 90 % zugrunde gelegt. Eine Senkung der Modulpreise um 40 % und mehr kann alleine schon durch Mengenrabatte bei der Abnahme von mehreren Tausend Modulen erreicht werden.

Die spezifischen Stromgestehungskosten **(Bild 6d)** wurden nach der Annuitätenmethode ermittelt und basieren auf den Eckdaten aus der **Tabelle** und wurden aus analogen Kalkulationen für andere elektrische Energieerzeugungsverfahren extrahiert [4]. Für den hier betrachteten

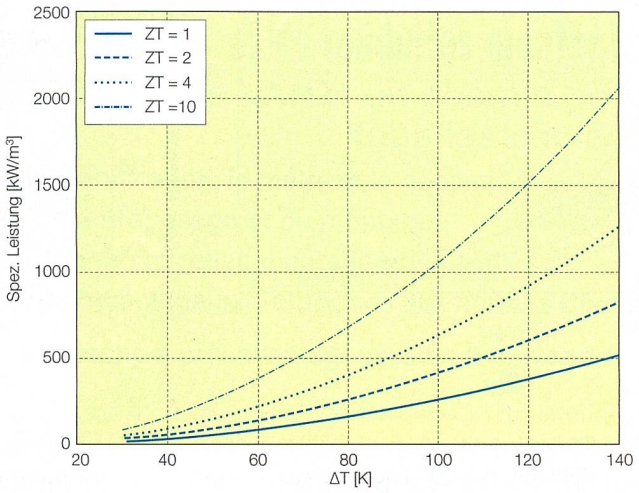


Bild 5 Spezifische Leistung in Abhängigkeit des wirksamen Temperaturunterschieds (Temperatur der kalten Quelle: Tkalt = 10 °C).

Fall der Abfallwärmenutzung wurden keine Kosten für Primärenergie veranschlagt. Es ist erkennbar, dass sowohl eine Senkung der Modulkosten bei gleicher Materialgüte als auch ein erhöhtes ZT bei konstanten Modulpreisen zu konkurrenzfähigen Stromgestehungskosten führt. Die Kombination von hocheffizienten Materialien zu niedrigen Preisen würde geradezu eine kleine «energietechnische Revolution» bedeuten.

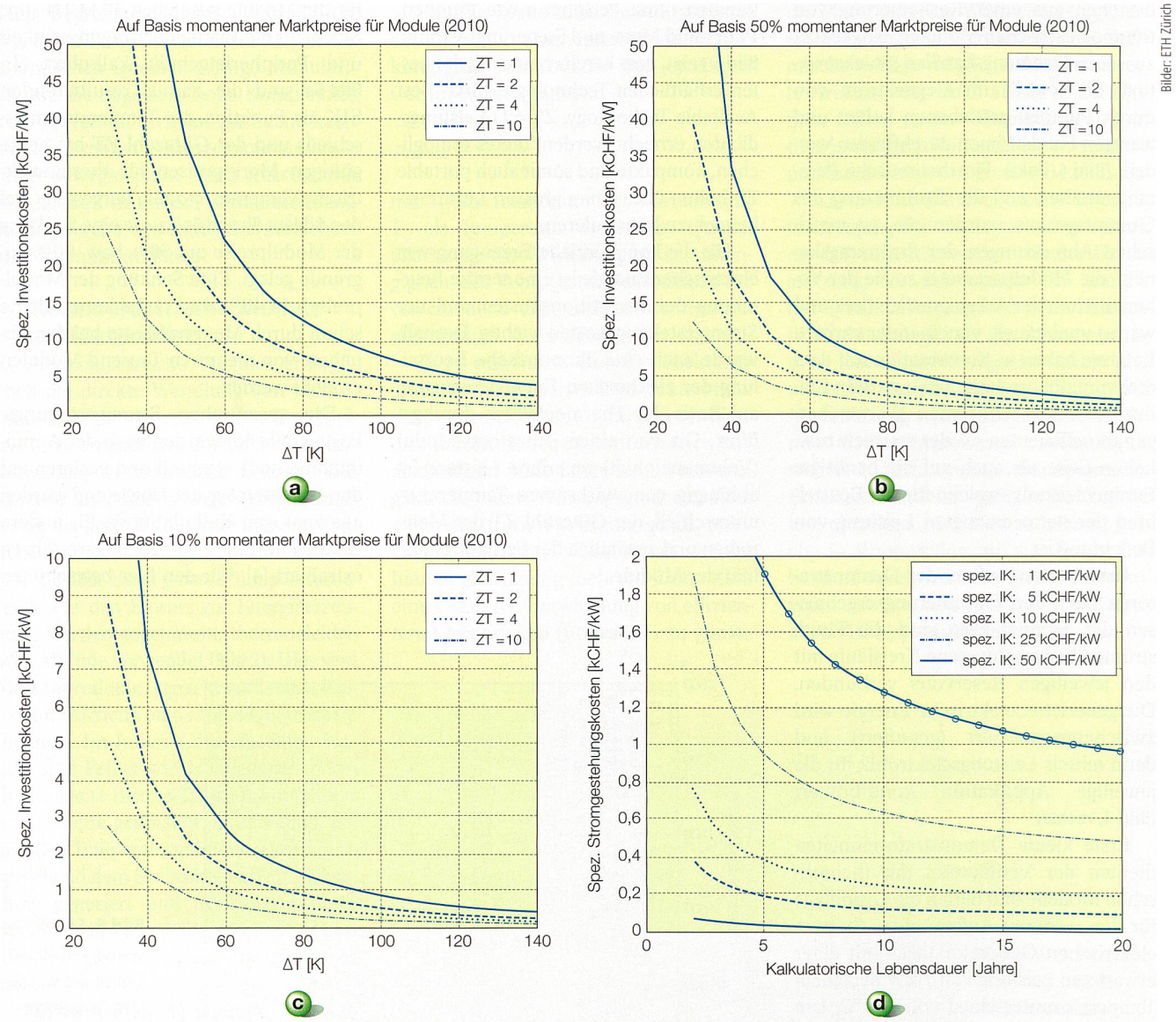
Volllaststunden	8000 h/Jahr
Basisjahr	2010
Kalkulatorische Lebensdauer	2–20 Jahre
Kalkulatorischer Zinssatz (real)	7,5 %
O & M-(Wartung und Betrieb)-Kosten	0,5 %
Versicherungen	0,75 %

Tabelle Technisch/wirtschaftliche Eckdaten für die Ermittlung der Stromgestehungskosten nach der Annuitätenmethode.

Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Die Erzeugung von elektrischer Energie aus Niedertemperaturenergie (< 150 °C) stellt ein riesiges Potenzial dar. Die Leistungsdichten von thermoelektrischen Generatoren liegen mit heute erhältlichen Modulen bei 100–500 kW/m³ bei Temperaturunterschieden von 50–150 °C. Die Stromgestehungskosten sind stark abhängig von den spezifischen Investitionskosten und der kalkulatorischen Lebensdauer und bewegen sich beim Einsatz der heute besten erhältlichen Technologie (Annahme: Mengenrabatt 50 %) bei einem nutzbaren Temperaturunterschied von 65 °C schon bei 20 Rp./kWh für eine kalkulatorische Lebensdauer von 15 Jahren.

Die ökonomischen Kennzahlen liegen im Bereich von Stromerzeugungstechno-



Bilder: ETH Zürich

Bild 6 Abschätzung der spezifischen Investitionskosten in Abhängigkeit des wirksamen Temperaturunterschieds und verschiedener Materialgüte (ZT) auf Basis 100 % **(Bild 6a)**, 50 % **(Bild 6b)**, 10 % **(Bild 6c)** momentaner Marktpreise für thermoelektrische Module (Stand 2010), spezifische Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der kalkulatorischen Lebensdauer und verschiedener spezifischer Investitionskosten **(Bild 6d)**.

logien aus erneuerbaren Energien wie z. B. der Fotovoltaik. Die elektrische Energieerzeugung auf Basis Thermoelektrik ist eine realistische Möglichkeit, den «schlafenden» Energiegiganten Abfallwärme zumindest teilweise zu nutzen und somit zu einer allgemeinen Effizienzsteigerung beizutragen. Speziell durch aktive Kühlung abgeführte Verlustwärme könnte mit relativ geringen Zusatzkosten ökonomisch attraktiv in elektrische Energie umgewandelt werden.

Auch bei der Nutzung von erneuerbaren Energien (wie z. B. geothermische Quellen) bietet die thermoelektrische Energiewandlung eine interessante Alternative für Kraft-Wärme-Kopplungsinstallationen im Niedertemperaturbereich. Innovationen und Fortschritte im Bereich der Materialien versprechen weitere Verbesserungen, die sich markant sowohl auf die technologische als auch auf die ökonomische Performance auswirken werden.

Das Potenzial des Abfallwärmemarkts ist erkannt, was neben der verstärkten Unterstützung durch die öffentliche Hand auch an der Gründung einiger Start-up-Unternehmen ersichtlich wird. Der Erfolg der Thermoelektrik wird stark von der Einhaltung der vorausgesagten Verbesserungen im Material und Modulbereich abhängig sein. Marktreife Produkte sind nach Aussagen von Start-up-Gründern frühestens 2011 zu erwarten.

Résumé

Systèmes thermoélectriques pour la production de courant électrique

Modèles théoriques et systèmes de démonstration réalisés – potentiels et développements

Actuellement, d'énormes quantités d'énergie thermique inutilisée sont perdues dans la production d'énergie, les processus industriels, systèmes de transport, maisons privées et bâtiments publics. La production d'énergie électrique à partir de cette énergie à basse température (<150° C) représente un immense potentiel. La production thermoélectrique est une possibilité réaliste d'exploiter au moins partiellement ce géant énergétique « en sommeil » qu'est la chaleur dissipée et ainsi de contribuer à une augmentation générale de l'efficacité. Des innovations et progrès réalisés dans le domaine des matériaux permettent d'espérer de nouvelles améliorations qui auront des effets marqués sur les performances tant technologiques qu'économiques. A l'Institut de transport d'énergie électrique et de technique haute tension de l'EPF de Zurich, des modèles théoriques de conversion d'énergie thermoélectrique [3] ont été développés ces dernières années sous la direction du Professeur K. Fröhlich, avec l'appui de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), et ont été validés par de premiers systèmes de démonstration. Selon les auteurs, des produits commercialisables n'apparaîtront au plus tôt qu'à fin 2011. No

Referenzen

[1] EIA, Online-Datenbank, International Energy Outlook 2010, www.eia.doe.gov.
[2] ECN, Energy Efficiency in Industry, Industrial heat technology, www.ecn.nl.
[3] Andreas Bitschi, Modelling of thermoelectric devices for electric power generation, ETH Diss. Nr. 18441.
[4] Konstantin Panos, Praxisbuch Energiewirtschaft, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 2. Auflage, ISBN 978-3-540-78591-0, e-ISBN 978-3-540-78592-7.

Informationen

- Empa Dübendorf, Abt. Festkörperchemie und -katalyse, www.empa.ch/abt131, anke.weidenkaff@empa.ch
- BFE-Forschungsprogramm «Elektrizität», www.electricity-research.ch, roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch

Angaben zu den Autoren

Dr. **Andreas Bitschi** arbeitet seit Mitte 2003 als Doktorand, Postdoktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie (EEH). Seine Doktorarbeit schrieb er zum Thema «Modelling of thermoelectric devices for electric power generation». Er betreut weiterhin die Projekte zum Thema Thermoelektrik am EEH.

ETH Zürich, Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie, 8092 Zürich, www.eeh.ee.ethz.ch, abitschi@ethz.ch

Prof. Dr. **Klaus Fröhlich** ist ordentlicher Professor am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie der ETH Zürich. Er leitet dort die Fachgruppe für Hochspannungstechnologie. Klaus Fröhlich war von 2002 bis 2010 Vorstandsmitglied der Electrosuisse. Er ist «Fellow Member» des IEEE und Vorsitzender des Technischen Komitees des «International Council on Large Electric Systems» (Cigré).

ETH Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie, 8092 Zürich, www.eeh.ee.ethz.ch, froehlich@ethz.ch

Anzeige

Finis les chemins à grille, les chemins de câbles et les **conduites montantes!**

Il existe maintenant les Multi-chemins LANZ: un chemin pour tous les câbles

- Les Multi-chemins LANZ simplifient la planification, le métré et le décompte!
- Ils diminuent les frais d'agencement, d'entreposage et de montage!
- Ils assurent de meilleurs profits aux clients: excellente aération des câbles
- Modification d'affectation en tout temps. Avantageux. Conformes aux normes CE et SN SEV 1000/3.

Pour des conseils, des offres et des livraisons à prix avantageux, adressez-vous au grossiste en matériel électrique ou directement à

lanz oensingen sa e-mail: info@lanz-oens.com
CH-4702 Oensingen • Tél. 062/388 21 21 • Fax 062/388 24 24

kf 5