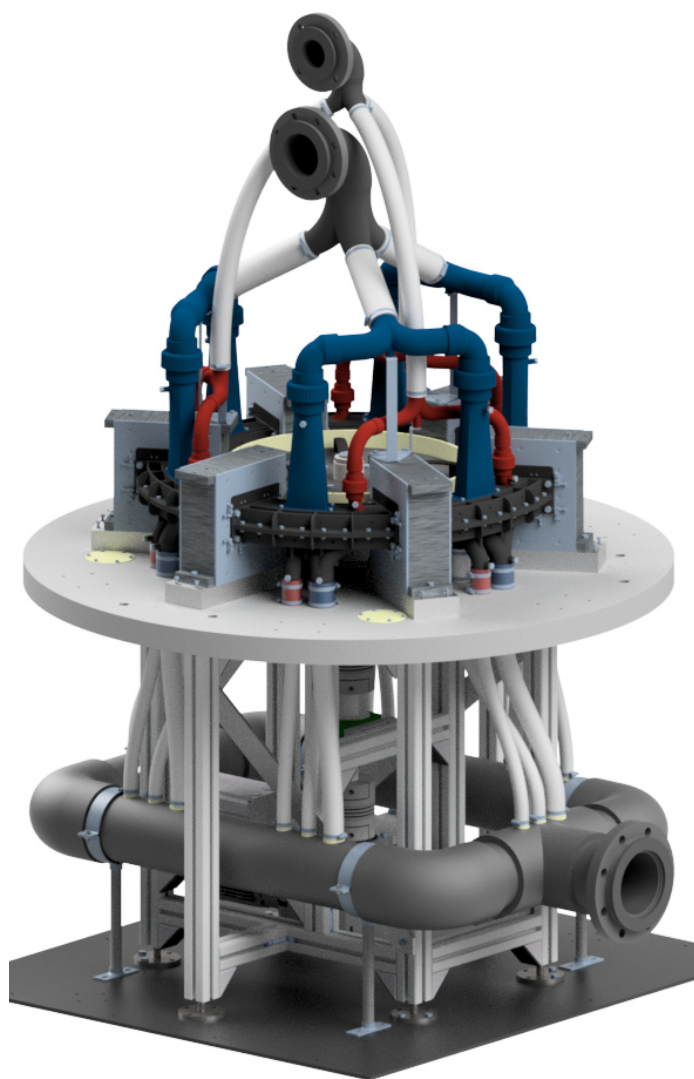


# STROM AUS ABWÄRME NIEDRIGER TEMPERATUR

Industriebetriebe oder Kraftwerke produzieren Abwärme in grossen Mengen. Abwärme unter 80 °C wird heute in der Regel zur Bereitstellung von Warmwasser oder Heizenergie genutzt, Nieder-temperaturwärme könnte künftig aber auch zur Stromerzeugung herangezogen werden. Wie das in der Praxis gelingt, zeigen Ingenieure der Aargauer Swiss Blue Energy AG mit dem Funktionsmuster eines Thermo-Magnetischen Motors. Bis zur industriellen Reife des neuartigen Kleinkraftwerks ist allerdings noch ein weiter Weg.

Wer Strom erzeugen will, dem stehen verschiedene Wege offen. Ein breit genutztes Verfahren besteht darin, durch die Verbrennung fossiler oder nicht-fossiler Energieträger, durch Kernspaltung oder aus Tiefengeothermie heissen Dampf zu gewinnen, der eine Turbine und einen damit gekoppelten Stromgenerator antreibt. Steht hingegen nur Abwärme mit einer Temperatur von 80, 60 oder 40 °C zur Verfügung, ist die direkte Verstromung über eine Dampfturbine nicht möglich. Aus diesem Grund wird Abwärme heute in aller Regel thermisch genutzt, also für die Bereitstellung von Warmwasser und Heizzwecke, nicht aber für die Erzeugung von elektrischem Strom.



Herzstück des TMM-Funktionsmusters ist der Rotor, der abwechselnd von einer warmen und einer kalten Flüssigkeit durchströmt wird. Die Flüssigkeitsströme erwärmen und kühlen die auf dem Rotor platzierten Gadolinium-Proben in schnellem Wechsel und erzeugen dadurch eine Drehbewegung. Der Rotor an sich ist auf der Darstellung nicht sichtbar; er ist von dem schwarzen, kreisrunden Rohr umschlossen. Illustration: BFE-Schlussbericht

## SO ARBEITET DAS FUNKTIONSMUSTER

Das Wirkprinzip des Thermo-Magnetischen Motors beruht auf der Nutzung eines magnetokalorischen Materials: Dieses ist unterhalb der sogenannten Curie-Temperatur magnetisch, verliert aber bei einer Erwärmung über diese Temperatur die magnetische Eigenschaft. Die Curie-Temperatur von Gadolinium beträgt 19.3 °C. Die Entwickler von Swiss Blue Energy haben das Gadolinium in ihrem TMM-Funktionsmuster auf einem Rotor aufgebracht. Die Grafik rechts stellt die Funktionsweise schematisch dar: In Phase 1 wird das Gadolinium von einem Kaltwasserstrom gekühlt und ist daher magnetisch, es wird in der Folge vom Permanentmagneten angezogen und bewegt sich nach rechts (Phase 2). Während das Gadolinium den Permanentmagneten passiert, wird es von Warmwasser erwärmt und dadurch nicht-magnetisch (Phase 3). Hat das Gadolinium den Permanentmagneten verlassen, wird es wieder durch Kaltwasser gekühlt (Phase 4), womit es erneut magnetisch wird und zum nächsten Permanentmagneten strebt. Aus dem ständigen Wechsel zwischen Abkühlung und Erwärmung entsteht eine kontinuierliche Drehbewegung. Die mechanische Energie kann über einen Generator in Strom verwandelt werden.

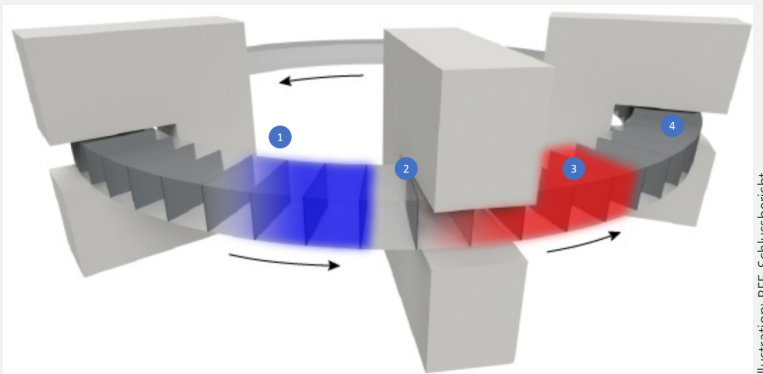
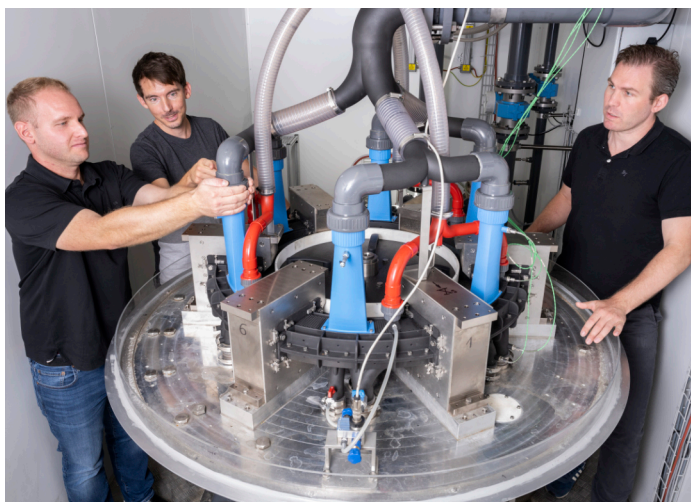


Illustration: BFE-Schlussbericht

### Nutzung des magnetokalorischen Effekts

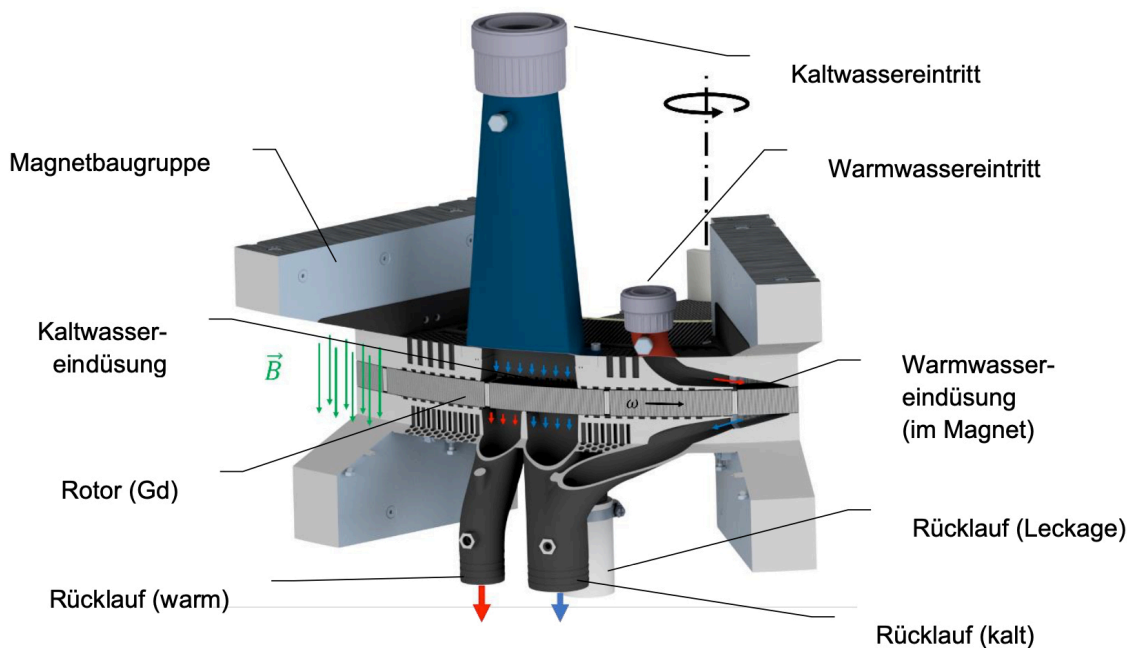
Tatsächlich geht es auch anders. Abwärme – konkret Wasser im Temperaturbereich von 20 bis 80 °C – lässt sich verstromen, sofern gleichzeitig ein kontinuierlicher Kaltwasserstrom zur Verfügung steht. Wegen der relativ tiefen Temperatur der Abwärme ist zwar mit einem geringeren Stromertrag zu rechnen als bei Dampfturbinen. Angesichts des grossen Stromhunger unserer Gesellschaft könnte aber auch diese Ener-

gieumwandlung von Interesse sein. Die Stromgewinnung aus Niedertemperaturwärme ist möglich dank Nutzung des magnetokalorischen Effekts. Gemeint ist damit die physikalische Eigenschaft ausgewählter Materialien, ihren Magnetismus bei einer bestimmten Temperatur («Curie-Temperatur») mehr oder weniger sprunghaft zu ändern. Diese Materialien sind also je nach Temperatur magnetisch oder nicht-magnetisch. Wenn man es richtig anstellt, kann man aus solchen magnetisch «umschaltbaren» Stoffen einen Motor bauen, der einen Generator antreibt und Strom erzeugt. Fachleute sprechen von einem Thermo-Magnetischen Motor, kurz TMM.



Das Ingenieurteam zusammen mit dem Initiator und Firmengründer der Swiss Blue Energy AG (v.l.n.r.): Jan Brechbühler, Daniel Wymann, Silvio Krauss, Dr. Nikolaus Vida. Foto: Swiss Blue Energy

Ein kommerziell einsetzbarer TMM ist das Fernziel von drei Ingenieuren, die in Bad Zurzach (AG) an einem Entwicklungsprojekt unter dem Dach der Swiss Blue Energy AG arbeiten. Die Ingenieure bauten in Windisch (AG) mit Unterstützung der Fachhochschule Nordwestschweiz ein TMM-Funktionsmuster mit einer Leistung von 500 Watt (zum Konstruktionsprinzip siehe Textbox oben). Sie nutzen für das Kleinkraftwerk 60-gradiges Wasser aus einer Heizzentrale (20 m<sup>3</sup>/h) und einen kühlen Wasserstrom mit 13 °C (40 m<sup>3</sup>/h). Als magnetokalorisches Material kommt die Seltene Erde Gadolinium zum Einsatz. «Wir haben einen weltweit einzigartigen Thermo-Magnetischen Motor gebaut, den vermutlich leistungsstärksten, den es je gab», freut sich Daniel Wymann, Technischer Leiter bei Swiss Blue Energy.



Abschnitt des Rotors mit den magnetokalorischen Wärmetauscher-Segmenten aus Gadolinium. In der Abbildung ist zu erkennen, dass der warme und der kalte Wasserstrom getrennt geführt werden. Illustration: BFE-Schlussbericht

### Ein halbes Kilowatt Leistung

Der TMM in Windisch ist ein Funktionsmuster. Die Konstruktion zeigt, dass die technische Idee grundsätzlich funktioniert. Das bedeutet im vorliegenden Fall: Dass aus der Niedertemperatur-Abwärme tatsächlich Strom produziert werden kann, und zwar mehr Strom, als die Pumpen des TMM verbrauchen. Die mechanische Bruttoleistung liegt bei 701 Watt, abzüglich der Pumpleistung (64 Watt) verbleiben 637 Watt. Daraus gewinnt der Generator eine elektrische Leistung von 531 Watt, was 0,1 % der im Warmwasserstrom enthaltenen thermischen Energie entspricht. Diese Leistung reicht dazu aus, einen E-Scooter anzutreiben. Von einer rentablen Anwendung ist die Neuentwicklung allerdings noch weit entfernt.

Das Funktionsmuster ist das Ergebnis eines zweijährigen, vom BFE unterstützten Forschungsprojekts, das Mitte 2022 abgeschlossen wurde. Die Vorarbeiten reichen Jahre zurück. Der technisch interessierte Augenarzt Dr. Nikolaus Vida arbeitet seit 2005 an der Idee. Seither hat er mit Unterstützung verschiedener Ingenieure drei Konstruktionen gebaut und 2012 für deren Weiterentwicklung die Swiss Blue Energy AG gegründet. Wissenschaftliche Unterstützung leisteten über die Jahre Forschende des Instituts für Thermo- und Fluid-Engineering der FHNW.

### Konstruktive Neuerung

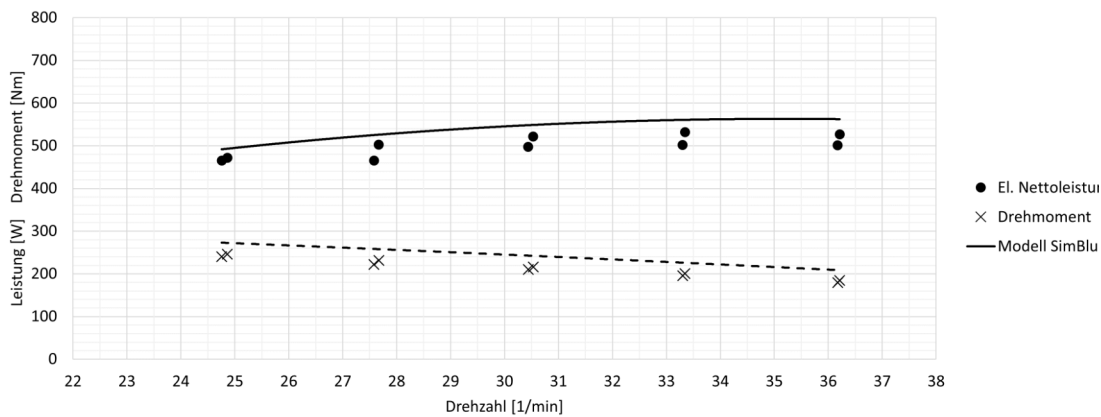
Die jüngste Version des TMM ist zugleich die erste, die unter

dem Strich Strom produziert, die also mehr Energie erzeugt als zum Betrieb der Pumpen nötig ist. Dieser Fortschritt ist hauptsächlich das Ergebnis einer konstruktiven Neuerung: Der warme und kalte Wasserstrom werden neu in einem geschlossenen System getrennt geführt, und die Strömungsrichtung wurde von horizontal auf vertikal umgestellt. Die Druckverluste und damit die für den Betrieb des TMM erforderliche Pumpleistung konnten so gegenüber dem TMM-Vorgängermodell um einen Faktor 30 reduziert werden.

Indem die beiden Wasserströme weitgehend getrennt geführt werden, vermischen sie sich nur minimal. Dies könnte nach Auskunft der beteiligten Ingenieure die Möglichkeit eröffnen, einen künftigen TMM mehrstufig zu bauen, wobei in jeder Stufe ein klar definiertes Temperatur-Gefälle ausgenutzt und verstromt würde. Die Separierung der Fluidströme «zeigt Potenzial für Kaskadierung (Mehrstufigkeit) auf für zukünftige Effizienzsteigerungen und die nötige Leistungsskalierung», schreiben die Konstrukteure im Projekt-Schlussbericht.

### Druckverluste minimieren

Die Wissenschaftler der FHNW haben das Entwicklungsprojekt von Swiss Blue Energy in mehrfacher Hinsicht unterstützt. Sie halfen bei der Auslegung der Komponenten mittels numerischer Simulationen, und sie steuerten exakte Messungen der Materialerwärmung/-kühlung bzw. Rotor-durchströmung bei. Die Fachhochschule führte zudem De-



Die Grafik veranschaulicht den Leistungsverlauf des TMM-Funktionsmusters abhängig von der Drehzahl. Punkte und Kreuze stehen für Messwerte, die ausgezogene Linie zeigt die Nettoleistung, wie sie mit dem Simulationstool SimBlue2 errechnet wurde. Grafik: BFE-Schlussbericht

tailuntersuchungen durch, um die physikalischen Prozesse innerhalb des TMM genauer zu verstehen. Damit lassen sich die Magnetisierungsprozesse, das Strömungs- und Temperaturverhalten des warmen und kalten Fluids sowie die Druckverluste innerhalb des TMM besser nachvollziehen. Fernziel ist eine Konstruktion, die eine widerstandsarme Durchströmung des Rotors bei gleichzeitig minimaler Beeinträchtigung der magnetischen Kräfte sicherstellt.

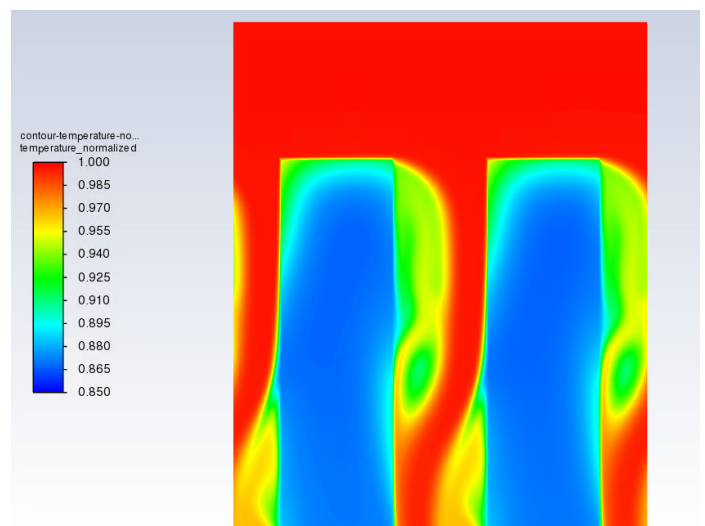
Für die Weiterentwicklung des TMM-Funktionsmusters zu einem Prototypen mit kommerziellem Potenzial sind die konstruktiven Details nur ein Aspekt. Das Hauptproblem ist vielmehr, dass mit Gadolinium, dem aktuell eingesetzten magnetokalorischen Material, ein leistungsfähiger und effizienter TMM nicht erreichbar sein wird, wie die Studienautoren einräumen. «Ein wirtschaftlicher Betrieb des TMM mit Gadolinium ist aus mehreren Gründen – mangelnde Effizienz, hoher Preis, schlechte Umweltverträglichkeit – nicht möglich.»

### Zwei Materialklassen im Blick

Die Unzulänglichkeit von Gadolinium ist seit längerem bekannt. Für eine praktikable Alternative setzen die Aargauer Entwickler ihre Hoffnung insbesondere in die Technische Universität Delft (Niederlande). Dort wird am Lehrstuhl von Prof. Ekkes Brück an magnetokalorischen Materialien geforscht. Für die Entwicklung eines TMM stehen zwei Materialklassen im Vordergrund: Zum einen eine Verbindung aus Mangan, Eisen, Phosphor und Silizium, zum anderen die Lanthan-Eisen-Silizium-Legierung, die das deutsche Unternehmen Vacuumschmelze (Hanau) unter dem Namen Calorivac vertreibt. Beide Materialklassen versprechen einen sehr starken magnetokalorischen Effekt, eine (über die Materialzusammensetzung) gut einstellbare „Umschalt-Temperatur“, und auch tragbare Herstellungskosten. Dem stehen Nachteile ge-

genüber, die die Verwendung dieser Materialklassen in einem TMM bisher noch einschränken: schlechte thermische Eigenschaften, geringe Festigkeit und komplexe Herstellungsprozesse.

Trotz solcher Hürden wollen die Ingenieure von Swiss Blue Energy ihre Entwicklungsarbeit fortsetzen, vorausgesetzt, es wird ein Investor gefunden, der ebenfalls an die Zukunft des Thermo-Magnetischen Motors glaubt. „Wir möchten im nächsten Schritt auf eine der beiden Materialklassen wechseln“, sagt Daniel Wyman von Swiss Blue Energy. „Diese Materialien erfordern für die Stromgewinnung allerdings einen anderen Prozess als jenen für Gadolinium. Wir müssen



FHNW-Wissenschaftler haben mit Computergestützter Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics/CFD) das Verhalten der Wasserströme und den transienten Wärmeaustausch im TMM untersucht. Das Bild zeigt zwei Lamellen aus magnetokalorischem Material, welche mit warmem Wasser umströmt und dabei erwärmt werden. Illustration: BFE-Schlussbericht

die technische Konstruktion des TMM also nochmals völlig neu entwickeln.“

- Für **Besichtigungen** des Funktionsmusters in Windisch wenden sich Fachpersonen oder potenzielle Investoren bitte an Daniel Wymann ([daniel.wymann@atsbe-ag.ch](mailto:daniel.wymann@atsbe-ag.ch)).
- Der **Schlussbericht** zum Projekt «Realisierung des Funktionsmusters K2 des Thermo-Magnetischen Motors» (TMM) ist abrufbar unter:  
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=48555>
- **Auskünfte** zum Thema erteilt Roland Brüniger, externer Leiter des BFE-Forschungsprogramms Elektrizitätstechnologien: [roland.brueeniger@atbrueniger.swiss](mailto:roland.brueeniger@atbrueniger.swiss).
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Elektrizitätstechnologien finden Sie unter [www.bfe.admin.ch/ec-strom](http://www.bfe.admin.ch/ec-strom)