

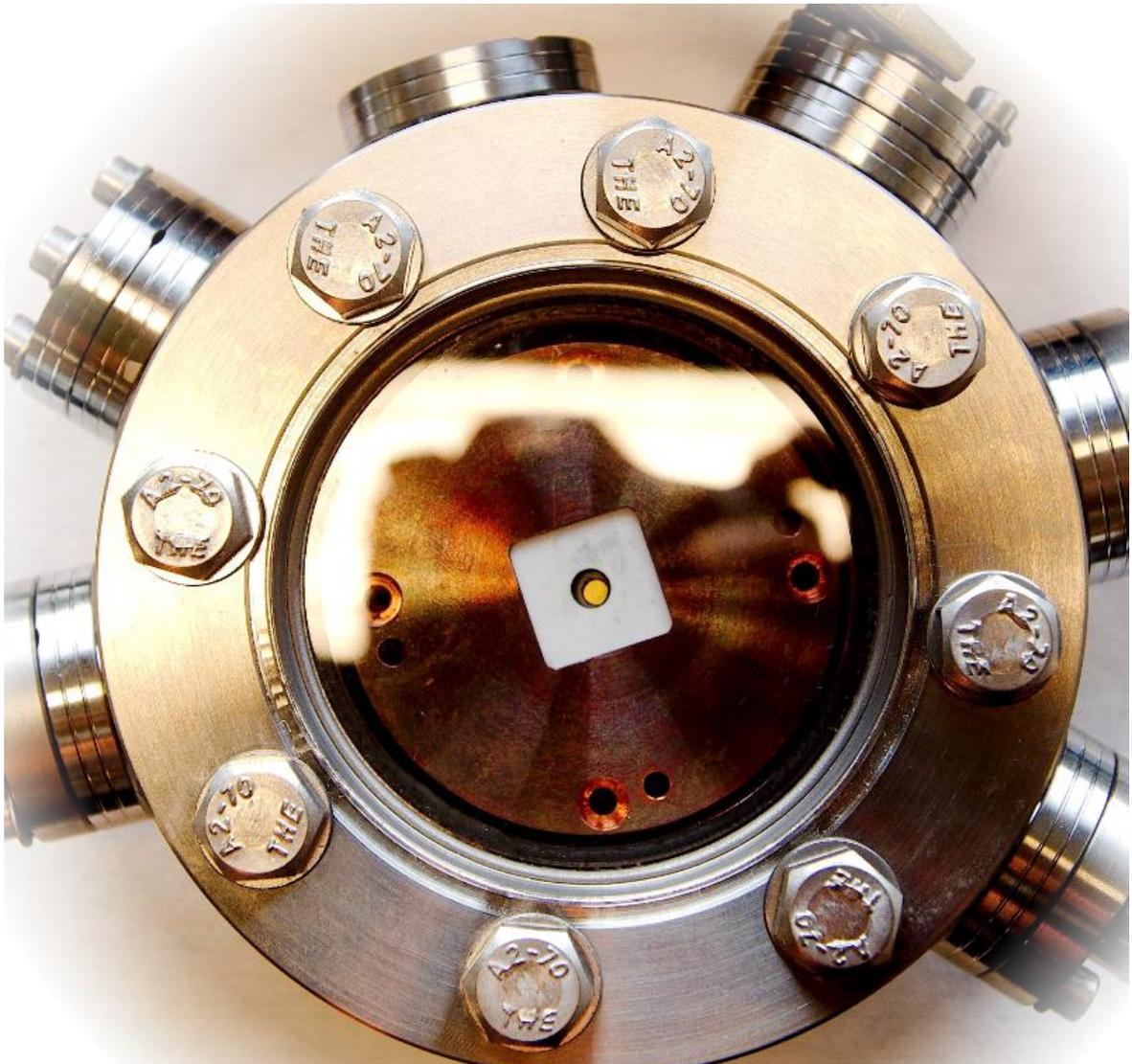


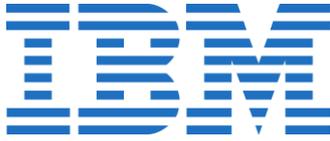
## Schlussbericht

---

# Thermische Relaxationsoszillationen zur direkten Umwandlung von Wärme in Elektrizität

---





**Datum:** 20.07.2017

**Ort:** Bern

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer/in:**

IBM Research GmbH  
Säumerstrasse 4  
CH-8803 Rüschlikon  
[www.zurich.ibm.com](http://www.zurich.ibm.com)

**Autor/in:**

Bernd Gotsmann, IBM Research GmbH, [bgo@zurich.ibm.com](mailto:bgo@zurich.ibm.com)  
Fabian Menges, IBM Research GmbH, [fam@zurich.ibm.com](mailto:fam@zurich.ibm.com)  
Fabian Motzfeld, IBM Research GmbH, [eld@zurich.ibm.com](mailto:eld@zurich.ibm.com)

**BFE-Bereichsleitung:** Michael Moser, [michael.moser@bfe.admin.ch](mailto:michael.moser@bfe.admin.ch)  
**BFE-Programmleitung:** Roland Brüniger, [roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch](mailto:roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch)  
**BFE-Vertragsnummer:** SI/501093-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**

**Bundesamt für Energie BFE**

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)



## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	4
1. Ausgangslage und Ziel der Arbeit.....	6
2. Theorie und Effizienzabschätzung.....	7
2.1 Funktionsweise eines thermischen Oszillators .....	7
2.2 Optimierung des Generatorkonzepts anhand von Simulationen .....	9
3. Experimentelle Methoden .....	10
3.1 Wachstum und Charakterisierung von Vanadiumdioxid Dünnschichten und Einkristallen ...	10
3.2 Prozessierung und Fabrikation von Oszillator Strukturen .....	12
4. Ergebnisse .....	13
4.1 Elektrothermisches Schaltverhalten .....	13
4.2 Entwicklung eines radiativen thermischen Schalters.....	14
4.3 Entwicklung eines thermomechanischen Relaxationsoszillators.....	15
4.4 Kalorimetrische Charakterisierung von Vanadiumdioxid Einkristallen .....	17
4.5 Entwicklung einer Messplattform zur Charakterisierung Pyroelektrischer Energieumwandlung .....	18
5. Schlussfolgerungen und Ausblick .....	20
Referenzen .....	22
Konferenzbeiträge und Wissenschaftliche Veröffentlichungen.....	22



## Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein neuartiges Generatorkonzept zur Umwandlung von Niedertemperaturabwärme in Elektrizität anhand des pyroelektrischen Effekts erforscht.

Ziel des Projekts war die Demonstration eines Generators der keine beweglichen Bauelemente benötigt und für Anwendungen geringer Energiedichte und Temperaturdifferenz skalierbar ist. Dazu wurde insbesondere die Entwicklung eines innovativen Mechanismus zur Selbstanregung thermischer Relaxationsoszillationen in Festkörperschichtstrukturen aus Vanadiumdioxid untersucht. Es wurde gezeigt, dass sich Metall-Isolator Phasenübergänge in Vanadiumdioxid technisch nutzen lassen um elektrische, so wie rein thermische Schalter mit einem maximalen Schaltkontrast von einem Faktor fünf im thermischen Leitwert zwischen den beiden Schaltzuständen zu erzeugen. Insbesondere konnte erstmals die Funktionsweise eines rein thermisch-getriebenen radiativen Schalters experimentell demonstriert und untersucht werden. Darüber hinaus wurde die direkte, selbstangeregte Umwandlung von Temperaturdifferenzen zweier Wärmebänder in thermo-mechanische Schwingung demonstriert. Es wurde gezeigt, dass ein solcher, thermo-mechanischer Oszillator die passive Erzeugung von Wärmeflussmodulationen ermöglicht.

Die direkte Erzeugung von Temperaturschwankungen mittels abrupter Phasenübergängen in Festkörpern stellt eine vielversprechende neue Möglichkeit zur Realisierung eines pyroelektrischen Energiewandlers da. Die Erzeugung einer Generatorstruktur auf Basis rein thermischer Schwingung und pyroelektrischer Energieumwandlung, sowie deren Potential zur Erzeugung von Elektrizität aus Niedertemperaturabwärme, wird abschliessend erörtert.

## Summary

Within this project a novel generator was explored that serves to convert low-temperature waste heat into electricity by using the pyroelectric effect.

The goal of the project was the demonstration of a generator that requires no movable parts and that is scalable towards the application of small energy densities and temperature differences. For this, a mechanism for spontaneous thermal relaxation oscillations in solid-state structures of vanadium dioxide was studied. It was shown that metal-insulator transition in vanadium dioxide can be technologically exploited to induce electrical and thermal conductance switching with a maximum switching contrast of a factor of five in thermal conductance between the two states of the switch. The operation of a purely thermally driven radiative switch could be experimentally demonstrated and studied. Furthermore, the direct conversion of heat from two temperature reservoirs into a self-driven thermo-mechanical oscillation was demonstrated. It could be shown that such a thermo-mechanical relaxation oscillator enables the passive induction of a modulated heat flux.

The direct creation of temperature oscillations by using abrupt phase transitions in solid materials is a promising new method to realize a pyroelectric energy converter. The creation of a generator structure on the basis of purely thermal oscillations and pyroelectric energy conversion, as well as its potential for its use to create electricity from low-temperature waste heat, is described.



## Résumé

Dans le cadre de ce projet, l'utilisation de l'effet pyroélectrique afin de développer un nouveau concept de générateur convertissant les pertes thermiques observées à basse température en électricité est étudié.

Le but de ce projet était de démontrer la faisabilité d'un générateur de taille variable ne nécessitant aucune partie mobile et qui serait adapté aux applications pour lesquelles les différences énergétiques et thermiques sont faibles. Pour ce faire, un mécanisme innovant permettant la relaxation spontanée des oscillations thermiques dans le dioxyde de vanadium a été étudié. Il a été démontré que la transition métal- isolant de ce matériau peut être technologiquement exploitée afin de passer d'une conductance thermique vers une conductance électrique avec une amplitude pouvant aller jusqu'à un facteur cinq en termes de conductance thermique entre les deux états. En particulier et ce pour la première fois, le fonctionnement d'un commutateur radiatif thermiquement commandé a pu être expérimentalement démontré et étudié. De plus, la conversion directe de chaleur depuis 2 réservoirs de température vers une auto-relaxation de l'oscillation thermo- mécanique a été démontrée. Il a été possible de montrer qu'un tel oscillateur de relaxation thermo-mécanique permettait d'induire passivement des flux de chaleur modulés.

La création directe d'une oscillation en température en utilisant la transition de phase abrupte dans les matériaux solides est nouvelle. C'est une méthode prometteuse vers la réalisation de convertisseurs d'énergie pyroélectrique. Enfin, la conception d'un générateur sur la seule base de la conversion d'oscillations thermiques en énergie pyroélectrique, ainsi que son potentiel à créer de l'électricité à partir de pertes thermiques à basse température sont discutés



# 1. Ausgangslage und Ziel der Arbeit

Die effiziente Umwandlung von Wärme in Elektrizität ist ein zentraler Ansatzpunkt von Strategien zur Reduzierung des Energieverbrauchs. Ein enormes Entwicklungspotenzial besteht vor allem bei der Nutzung von Wärmequellen mit relativ niedriger Temperatur (z. B. unter 100 °C) oder kleiner möglicher Leistungsentnahmen (z. B. kleiner 1 kW). Die schlechte Skalierbarkeit traditioneller Wärmekraftmaschinen, sowie die geringe Effizienz thermoelektrischer Generatoren [1], legen dabei die Erforschung alternativer Generatorkonzepte nahe. In Anbetracht signifikanter Fortschritte in der Entwicklung elektrokatalytischer Kühlsysteme [2] ist insbesondere die Nutzung des dazu inversen, sogenannten pyroelektrischen Effekts vielversprechend für die Energiegewinnung im Niedertemperaturbereich (< 100 °C) [3, 4].

Der pyroelektrische Effekt (das Inverse zum elektrokatalytischen Effekt) bezeichnet die spontane, elektrische Polarisationsänderung eines pyroelektrischen Materials bei Temperaturänderung. Es wurde theoretisch gezeigt, dass die pyroelektrische Energieumwandlung mit Carnot-Effizienz funktionieren kann [5]. In der Praxis ergeben sich Limitierungen durch mögliche Leckströme, Wärmeverluste an die Umgebung und Hystereseverluste bei der Phasenumwandlung [6]. Numerische Berechnungen auf Basis existierender Materialien ergeben hervorragende Effizienzen von > 60% der Carnot-Effizienz [6, 7, 8].

Ein Grundproblem beim Bau eines pyroelektrischen Generators ist seine Abhängigkeit von Temperaturänderungen. Während thermoelektrische Generatoren auf Basis allgegenwärtiger, räumlicher Temperaturunterschiede operieren, benötigen pyroelektrische Generatoren zeitliche Temperaturänderungen möglichst hoher Frequenz und Amplitude. Neben der Effizienz des Energieumwandlungsprozesses, ist somit die vorherige Erzeugung von Temperaturoszillationen eine Bedingung für die technologische Umsetzung. Erste Prototypen, basierend auf der aktiven Erzeugung von Temperaturänderungen, etwa durch die Umwälzung von Flüssigkeiten, ergaben enttäuschende Energiekonversionen von <1% der Carnot-Effizienz [9]. In Anbetracht der seit 2006 im Kontext kalorischer Wärmepumpen entwickelten pyroelektrischen Materialien [2], sowie der potentiell hohen Effizienz pyroelektrischer Energieumwandlung [5], erscheint die notwendige Anregung statischer Temperaturbäder als Haupthindernis bei der Realisierung eines effizienteren Generators.

Das Hauptziel dieses Projektes war die Demonstration eines neuartigen, skalierbaren Generatorkonzepts auf der Basis eines innovativen Mechanismus zur Selbstanregung von Temperaturoszillationen in Festkörperschichtstrukturen.

## Teilziele:

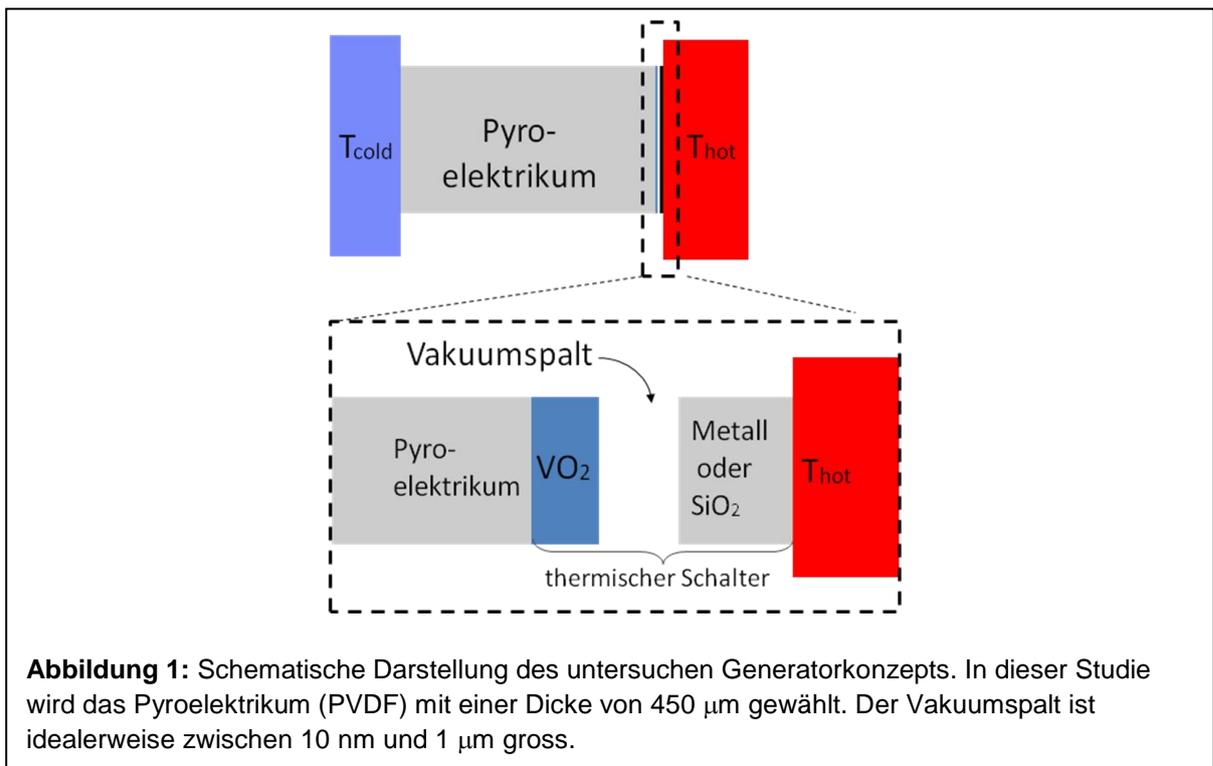
- Untersuchung eines innovativen Mechanismus zur Anregung von Temperaturoszillationen und dessen Kombination mit pyroelektrischer Energieumwandlung.
- Wachstum und Charakterisierung von einkristallinen, epitaktischen Vanadiumdioxid Dünnschichten.
- Prozessierung und Charakterisierung thermischer Schalter und Oszillatoren.
- Untersuchung und Nachweis pyroelektrischer Elektrizitätserzeugung in dünnen Schichten.
- Entwicklung einer Generator Schichtstruktur und Demonstration elektrischer Energieerzeugung.



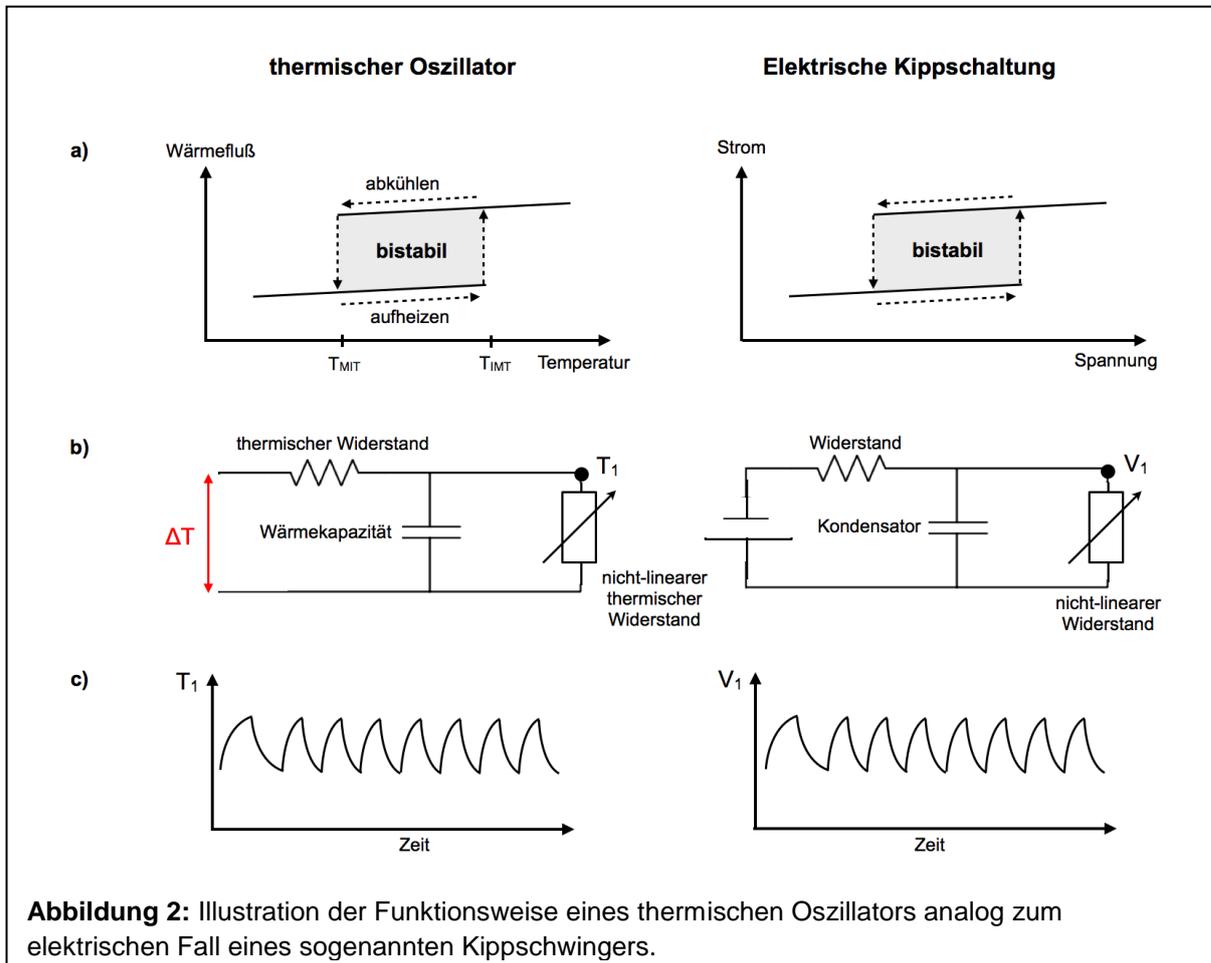
## 2. Theorie und Effizienzabschätzung

### 2.1 Funktionsweise eines thermischen Oszillators

Im Folgenden beschreiben wir zunächst die Grundfunktionsweise des untersuchten Generatorkonzepts. Eine einfache, schematische Darstellung des Generators auf Basis von Festkörperschichtstrukturen zwischen zwei Wärmebädern ist in Abbildung 1 dargestellt.



Das neuartige Element des untersuchten Generatorkonzepts ist nicht die technologisch bereits bekannte Energieerzeugung mittels einer pyroelektrischen Schicht, sondern deren Kombination mit einem nicht-linearen, thermischen Bauelement, welches die selbstangeregte Erzeugung eines gepulsten Wärmestroms auf Basis der Temperaturdifferenz zweier Wärmebäder ermöglichen soll. Ein solcher thermischer Oszillator bestehend aus einem thermischen Schalter aus Vanadiumdioxid und einem thermischen Widerstand aus Siliziumdioxid kann als direktes Analogon eines elektrischen Relaxations-Oszillators (oder Kippschwingers) betrachtet werden. Abbildung 2 verdeutlicht die Operationsweise eines thermischen Oszillators in Analogie zum elektrischen Kippschalter.



**Abbildung 2:** Illustration der Funktionsweise eines thermischen Oszillators analog zum elektrischen Fall eines sogenannten Kippschwingers.

Ein thermischer Oszillator ist aus einem nicht-linearen thermischen Widerstand, einer Wärmekapazität und einem gewöhnlichen thermischen Widerstand aufgebaut (Abb. 2b). Der nicht-lineare thermische Widerstand besteht aus einem Material, dessen Wärmeleitfähigkeit stark nicht-linear von der Temperatur abhängt (siehe Abbildung. 2a). Eine solche, sprunghafte Änderung in der Wärmeleitung kann in einigen hoch-korrelierten Übergangsmetalloxiden (wie z.B. Vanadiumdioxid,  $\text{VO}_2$ ) auftreten. Die Nichtlinearitäten bei den Temperaturen  $T_{\text{MIT}}$  und  $T_{\text{IMT}}$  (siehe Abbildung. 2a) werden durch reversible Metall-Halbleiter Phasenübergänge (Mott Übergänge) verursacht. Dabei kommt es zu einer abrupten Änderung der Anzahl freier Ladungsträger, was mit einer sprunghaften Änderung der thermischen Leitfähigkeit, entsprechend dem elektronischen Anteil an der Wärmeleitfähigkeit, korrelieren kann. Der kollektive, elektronische Charakter eines solchen Metall-Halbleiter Phasenübergangs ist von entscheidender Bedeutung zum Erzeugen der sprunghaften Änderung (Abb. 2a). Ein herkömmlicher Phasenübergang erster Ordnung, bei dem sich eine graduelle Änderung der Materialstruktur mit der kontinuierlichen Verschiebung einer Phasengrenze ergibt, wäre nicht zum Bau eines thermischen Oszillators geeignet.



## 2.2 Optimierung des Generatorkonzepts anhand von Simulationen

Neben experimentellen Arbeiten zur Untersuchung des thermischen Generatorkonzepts wurden numerische Simulationen durchgeführt um den Einfluss von Systemparameter auf die Effizienz des Generators abzuklären. Darüber hinaus wurde eine annähernde, analytische Beschreibung entwickelt, um einen tieferen Einblick in das Optimierungspotential des thermischen Oszillatoransatzes zu erhalten. Auch die Robustheit gegen Parametervariation wurde untersucht. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst:

Das Hauptergebnis der theoretischen Analyse des Generatorkonzepts ist ein analytischer Ausdruck für die Effizienz des Generators:

$$\eta = \left( \frac{p^2 T_H}{2 \varepsilon_{33}^\ominus C_V} \right)_{\text{Material}} \left( \frac{\Delta T_s}{T_H - T_C} \frac{1}{\sqrt{8\pi}} \left( 1 + \frac{\bar{h}L}{k} \right) \right)_{\text{Implementierung}} \left( \frac{T_H - T_C}{T_H} \right)_{\text{Carnot}}$$

Hierbei bezeichnet  $p$  den pyroelektrischen Koeffizienten,  $T_H$  die Temperatur des heißen Reservoirs,  $T_C$  die Temperatur des Kältespeichers,  $\varepsilon_{33}^\ominus$  die dielektrische Dielektrizitätskonstante,  $C_V$  die volumetrische Wärmekapazität,  $\bar{h}$  die mittlere Wärmeleitfähigkeit (pro Flächeneinheit) des Vakuumpalts,  $L$  Dicke der pyroelektrischen Schicht, und  $k$  die Wärmeleitfähigkeit der pyroelektrischen Schicht.

Im obigen Ausdruck beschreibt der erste Klammterme die wohlbekanntes materialspezifischen Größen der pyroelektrischen Energieumwandlung. Dieser Term ist unabhängig von der Implementierung und kann für derzeit bekannte Materialien Werte von 0,5 bis 0,6 erreichen. Das bedeutet, dass die pyroelektrische Energieerzeugung eine hohe intrinsische thermodynamische Effizienz aufweist - eine Hauptmotivation zur Erforschung der pyroelektrischen Energieumwandlung. Der zweite Klammterme beschreibt den Faktor, der von der physikalischen Implementierung abhängt. Im Fall des hier untersuchten Generatorkonzepts ist dieser Faktor proportional zum Verhältnis der Unterschiede in der Schalttemperatur ( $\Delta T_s$ ) über die Differenz der Reservoirtemperaturen. Weiterhin spielt das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit von Vakuumpalt und pyroelektrischer Schicht eine Rolle. Der dritte Klammterme beschreibt die Carnot-Effizienz.

Anhand des gefundenen analytischen Ausdrucks konnten Vorhersagen des Wirkungsgrads des Generators gemacht werden, welcher für gute pyroelektrische Materialien mit dem von thermoelektrischen Generatoren vergleichbar ist.



### 3. Experimentelle Methoden

#### 3.1 Wachstum und Charakterisierung von Vanadiumdioxid Dünnschichten und Einkristallen

Ein Grossteil des Projekts war auf den Bau eines thermischen Oszillators, sowie dem erstmaligen experimentellen Nachweis rein thermischer Relaxationsoszillationen, fokussiert. Der Bau eines thermischen Oszillators setzt ein einwandfreies Funktionieren der thermischen Schaltschicht aus Vanadiumdioxid ( $VO_2$ ) voraus. Eines der Teilziele des Projekts war daher die Etablierung und Optimierung des Wachstums von  $VO_2$ -Dünnschichten mit:

- hoher struktureller und stöchiometrischer Filmqualität (epitaktisch, ein-kristallin),
- abruptem Schaltverhalten und scharfen Sprungtemperaturen (bei etwa  $70^\circ C$ ), und
- hoher Oberflächenqualität mit Rauigkeiten  $< 3$  nm.

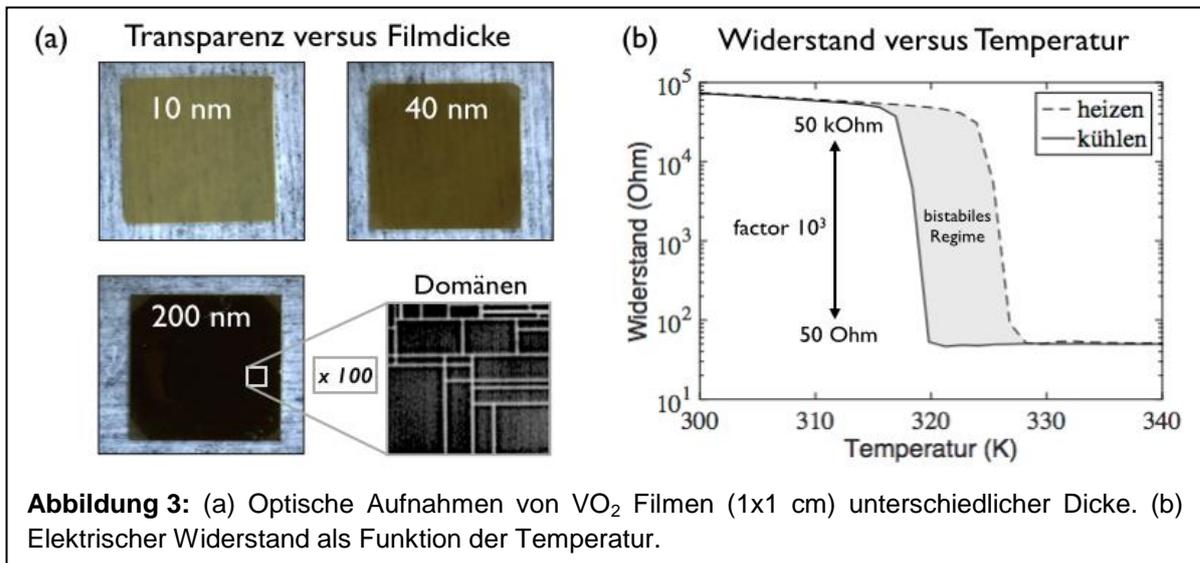
Um dies zu erreichen wurden  $VO_2$ -Dünnschichten insbesondere mittels gepulster Laserabscheidung (PLD) auf unterschiedlichen Substraten gewachsen. Der Abscheidungsprozess wurde hierfür an der PLD Apparatur (Neoceara) im Binnig-und-Rohrer Nanotechnology Center etabliert. Dazu wurde eine polykristalline  $VO_2$  Zielscheibe verwendet (ACI Alloys Inc., USA). Die Wachstumsparameter wurden optimiert um einkristalline Filme höchster Qualität zu erzeugen. Dazu wurden einkristalline Titandioxid ( $TiO_2$ ) Substrate (CrysTec GmbH, Berlin) unterschiedlicher kristallografischer Orientierung (001 und 101) verwendet, die ein epitaktisches Wachstum von  $VO_2$  ermöglichen. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die optimierten Wachstumsparameter.

<b>Substrat Temperatur</b>	450 - 500 °C
<b>Sauerstoffpartialdruck</b>	10 mTorr
<b>Ziel-Substrat Distanz</b>	7 cm
<b>Pulsenergie</b>	160- 180 mJ
<b>Anzahl Pulse/ Repetitionsrate</b>	2000 /1 Hz
<b>Heiz-/Kühlrampe</b>	10 °C/min und 5 °C/min

**Tabelle 1:**

Übersicht der wichtigsten Prozessparameter zum Wachstum von  $VO_2$  Dünnschichten durch gepulste Laserabscheidung.

Die höchsten Filmqualitäten wurden bei Substrattemperaturen von (450-500) °C sowie einem Sauerstoffpartialdruck von 10 mTorr erzielt. Filme unterschiedlicher Dicke im Bereich zwischen 10 und 200 nm wurden gewachsen. Variationen der Filmdicke haben einen direkten Einfluss auf die zur Erzeugung thermischer Oszillationen relevanter Absorption von Infrarot Strahlung sowie auf die Struktur der Filme. Dies lässt sich unter anderem an Änderungen der optischen Transparenz der Filme erkennen (siehe Abbildung. 3(a)).

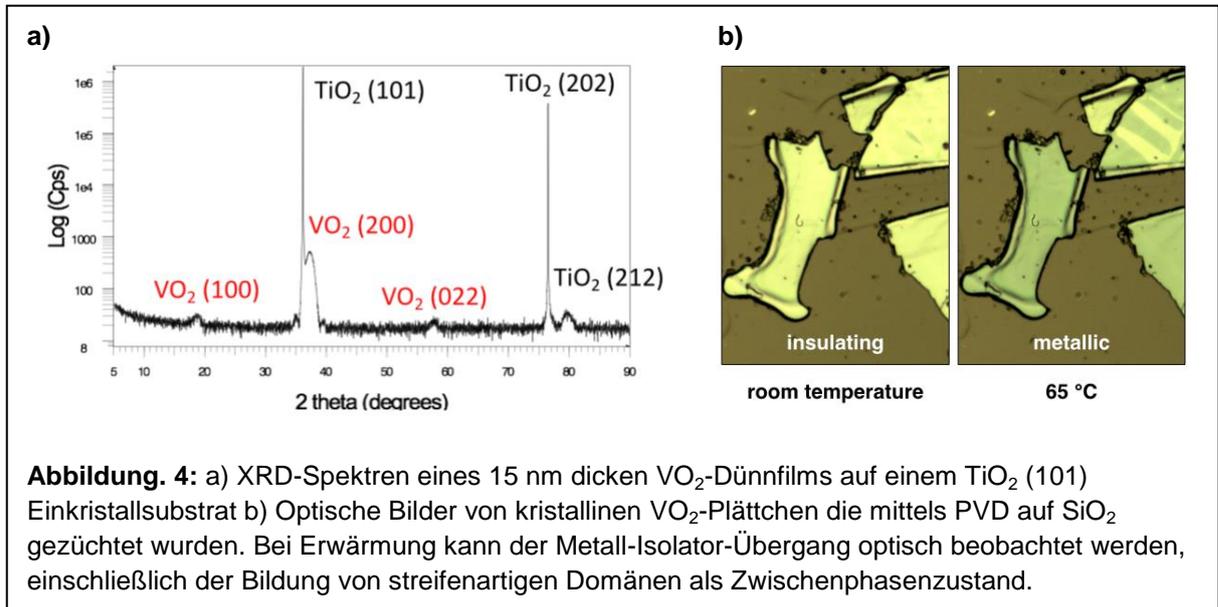


Bei Schichtdicken von mehr als 100 nm wurden darüber hinaus Änderungen der Filmmorphologie beobachtet, die sich sowohl optisch, also auch anhand von Rastersondenmikroskopie nachweisen liess. Die in Abbildung 3a dargestellte Strukturierung des Films (Domänen) ist auf eine Relaxation des ursprünglich epitaktisch zum Substrate gewachsenen Films sowie der Ausbildung von Verwerfungen zurückzuführen. Diese Beobachtung ermöglichte die Festlegung einer oberen Grenze für das Wachstum einkristalliner Schichten auf ca. 100 nm. Die VO<sub>2</sub> Filme wurden darüber hinaus mittels Röntgenbeugung (XRD) charakterisiert, was den direkten Nachweis von einkristallinem epitaktischen Schichtwachstum ermöglichte (siehe Abbildung 4a).

Die Schichtdicken wurden mittels Ellipsometrie und Rasterkraftmikroskopie bestimmt. Das thermische Schaltverhalten der Filme wurde anhand temperaturabhängiger elektrischer Widerstandsmessungen bestimmt. Abbildung 3b zeigt die elektrische Widerstandsänderung eines 15 nm dicken VO<sub>2</sub> Dünnsfilms als Funktion der Temperatur. Der aufgrund von Literaturbeschreibungen erwartete hysteretische Metall-Isolator Phasenübergang ist deutlich zu erkennen [1].

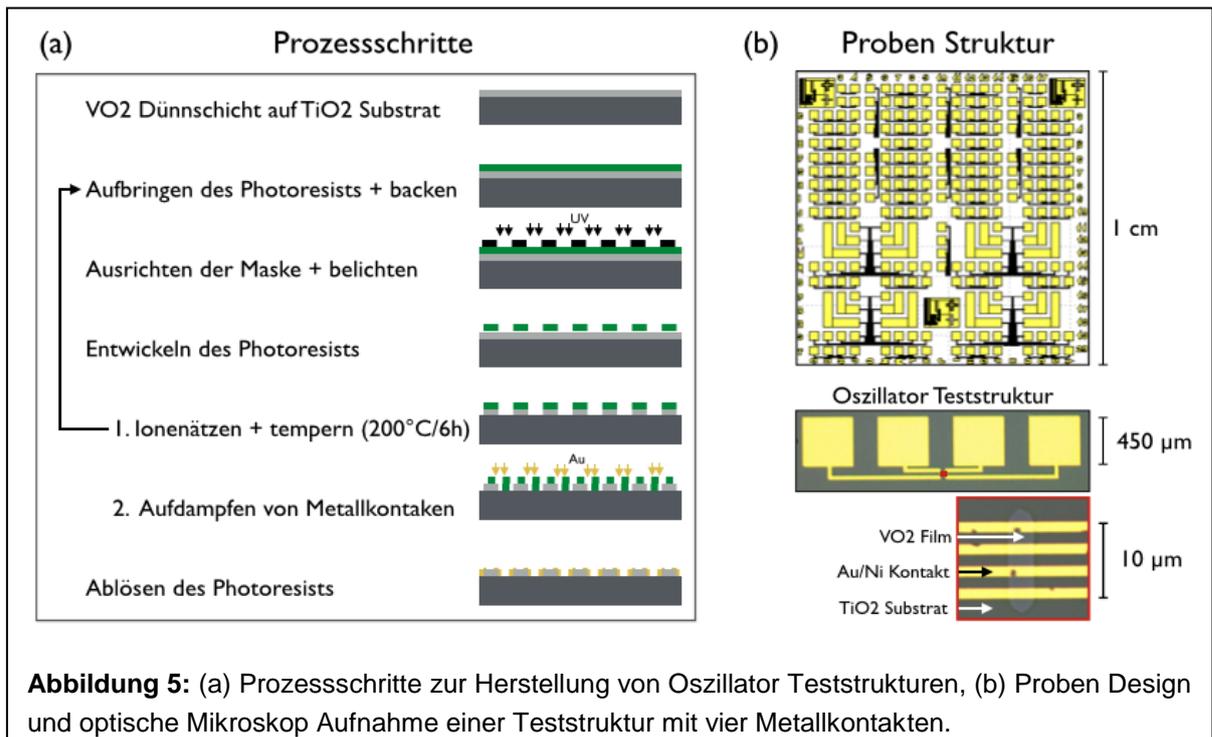
Im Hinblick auf eine mögliche kommerzielle Anwendung wurde neben dem Wachstum von VO<sub>2</sub> Dünnsfilmen auf TiO<sub>2</sub> Einkristallsubstraten auch das Wachstum auf kostengünstigeren, amorphen Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>) Substraten untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass das PLD-Wachstum von VO<sub>2</sub> auf SiO<sub>2</sub>/Si-Wafern zu polykristallinen Filmen führt, mit einzelnen Kristalliten deren Grösse für eine weitere Anwendung in einer Generator-Konfiguration zu klein wäre. Um dennoch ein Wachstum auf kostengünstigeren Substraten zu erreichen wurde ein alternatives Wachstumsverfahren auf Basis der physikalischen Abscheidung aus der Dampfphase (PVD) etabliert, was das Wachstum von VO<sub>2</sub>-Kristallen und -plättchen auf einkristallinen-SiO<sub>2</sub>-Substraten ermöglichte. Abbildung 4b) zeigt optische Bilder von mittels PVD gewachsenen VO<sub>2</sub>-Kristallplättchen bei Änderung der Proben temperatur über die Metall-Isolator-Übergangstemperatur hinaus. Bei dicken Plättchen (> 1 µm) lassen sich die beiden Phasenzustände (metallisch, isolierend) aufgrund der Änderung der Reflektivität leicht visualisieren.

Zusammenfassend können wir feststellen, dass der Prozess zum Schichtwachstum erfolgreich etabliert wurde mit Schichtqualitäten vergleichbar mit den besten in der Literatur berichteten Beispielen. Um die Herstellung einkristalliner, epitaktischer Schichten zu ermöglichen, mussten jedoch einkristalline Substrate verwendet werden, was die weitere Prozessierung von VO<sub>2</sub> Schichten zu Oszillator Strukturen sowie die Integrierung von VO<sub>2</sub> in eine Generatorschichtstruktur mit pyroelektrischen Materialien erschwerte.



### 3.2 Prozessierung und Fabrikation von Oszillator Strukturen

Oszillator Teststrukturen wurden im Reinraum des Binnig-Roher Nanotechnologie Zentrums hergestellt. Dazu wurden die VO<sub>2</sub>-Dünnsfilme zunächst mittels optischer Lithographie und reaktivem Ionenätzen strukturiert. Abbildung 5 a) gibt eine Übersicht über die einzelnen Prozessschritte, von der Strukturierung der Filme bis zur Herstellung einfacher Bauteile die zur Charakterisierung thermischen Schaltverhaltens verwendet wurden.





Wenige Mikrometer grosse  $\text{VO}_2$  Regionen wurden mittels  $\text{Ag}/\text{CF}_4$  Gas aus Filmen herausgeätzt. Anschliessende elektrische Widerstandsmessungen ergaben, dass sowohl die Oberfläche des ursprünglich isolierende  $\text{TiO}_2$  Substrats, als auch die Ränder der geätzten  $\text{VO}_2$  Strukturen leitfähig wurden, was eine Änderung der Sauerstoffstöchiometrie in den Proben hindeutet. Durch anschliessendes Tempern der Proben für sechs Stunden bei  $200\text{ }^\circ\text{C}$  konnten die durch den Ätzprozess entstandenen Defekte ausgeheilt werden. Abbildung 5b) zeigt das Proben Design, sowie einige optische Aufnahmen hergestellter Strukturen.

Die elektrische Kontaktierung einzelner  $\text{VO}_2$  Strukturen durch Gold/Nickel-Kontakte ermöglichte ein direktes elektrisches Auslesen des temperaturabhängigen Phasenzustandes von  $\text{VO}_2$ , sowie ein aktives elektrisches Schalten von  $\text{VO}_2$  Segmenten mittels einer elektrischen Spannung, welches im folgenden Kapitel untersucht wurde.

## 4. Ergebnisse

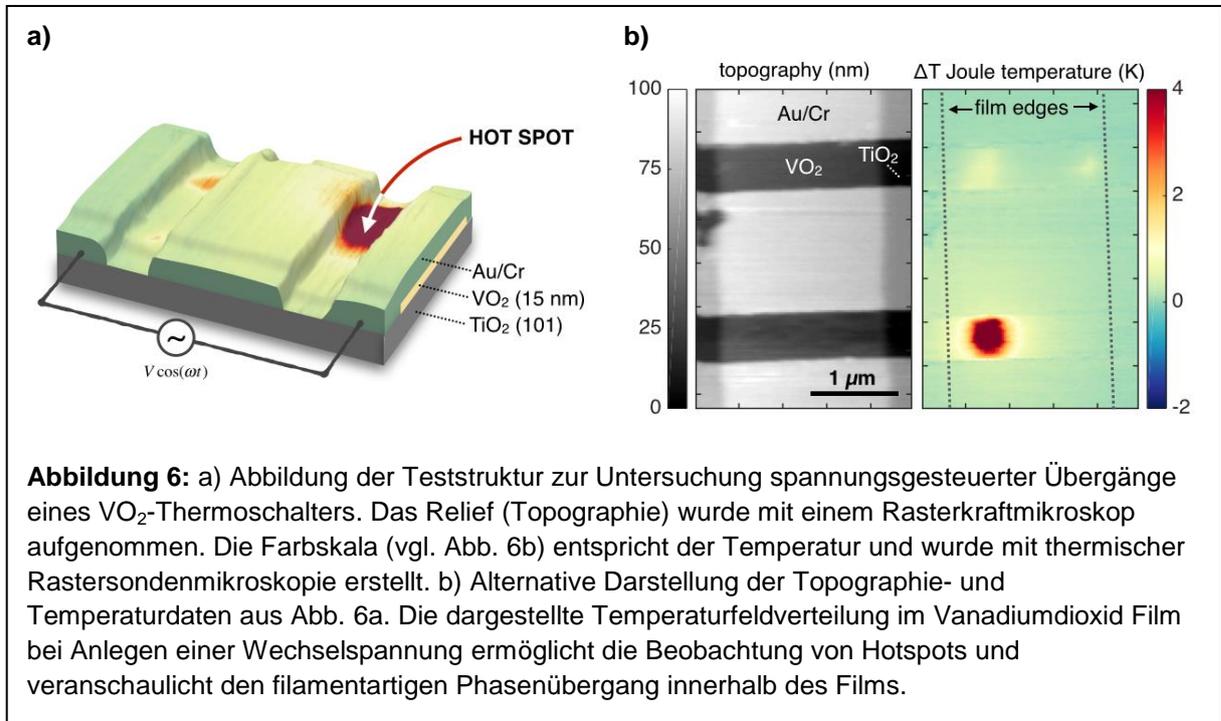
### 4.1 Elektrothermisches Schaltverhalten

Da ein rein-thermisch getriebener Schalter zur Kontrolle von Wärmeströmen ein bei Projektbeginn experimentell noch nicht demonstriertes Bauteil darstellte, wurde neben dem thermisch-induzierten Umschalten des Phasenzustands von  $\text{VO}_2$ -Dünnschichten auch das technisch leichter zu realisierende elektrothermische Schaltverhalten untersucht.

Für die Anwendung von  $\text{VO}_2$ -Filmen als elektrisch gesteuerte Wärmeflusschalter wurde die spannungsgesteuerte Induzierung von Metall-Isolator-Phasenübergängen untersucht. Abbildung 6a) zeigt die schematische Darstellung einer typischen Teststruktur, bestehen aus einem  $\text{VO}_2$ -Dünnschicht auf einem  $\text{TiO}_2$ -Substrat, der mit Chrom/Gold-Elektroden kontaktiert wurde. Für den Betrieb als Thermoschalter ist eine abrupte Phasenänderung des gesamten Films erwünscht.

Um Einblicke in die räumliche Homogenität der spannungsinduzierten Phasenübergänge zu gewinnen, wurden mehrere Teststrukturen mittels thermischer Rastersondenmikroskopie charakterisiert. Abbildung 6b) zeigt ein typisches Messergebnis. Bemerkenswerterweise konnten wir die Bildung von Hotspots innerhalb des Films beobachten, was trotz der einkristallinen Struktur des Films die Ausbildung von metallischen Filamenten, sowie ein perkolatives Umschalten des  $\text{VO}_2$ -Films nahelegt. Eine systematische Untersuchung dieses Schaltmechanismus als Funktion der angelegten Spannung sowie der Substrattemperatur zeigten, so dass sich diese Filamente bei hohen Spannungen zu einem grösseren Filament vereinigen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die Anwendung von  $\text{VO}_2$  als elektrisch gesteuerten Wärmeflusschalter eine filamentartige Umschaltung des Materialzustands unerwünscht ist, da der thermische Schaltkontrast (das Verhältnis der thermischen Leitwerte in den beiden Schaltzuständen) direkt mit dem transformierten Flächenanteil skaliert. Es bleibt zu klären, ob ein rein feld-induziertes Umschalten der  $\text{VO}_2$ -Dünnschichten möglich ist, um filamentäres Schalten zu vermeiden.



## 4.2 Entwicklung eines radiativen thermischen Schalters

Die im Folgenden zusammengefassten Untersuchungen und Ergebnisse sind durch die Notwendigkeit motiviert, den Schaltkontrast eines VO<sub>2</sub>-Thermoschalters zu optimieren um die Effizienz des untersuchten Generatorkonzepts zu erhöhen. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit wurden in Applied Physics Letters [2] veröffentlicht.

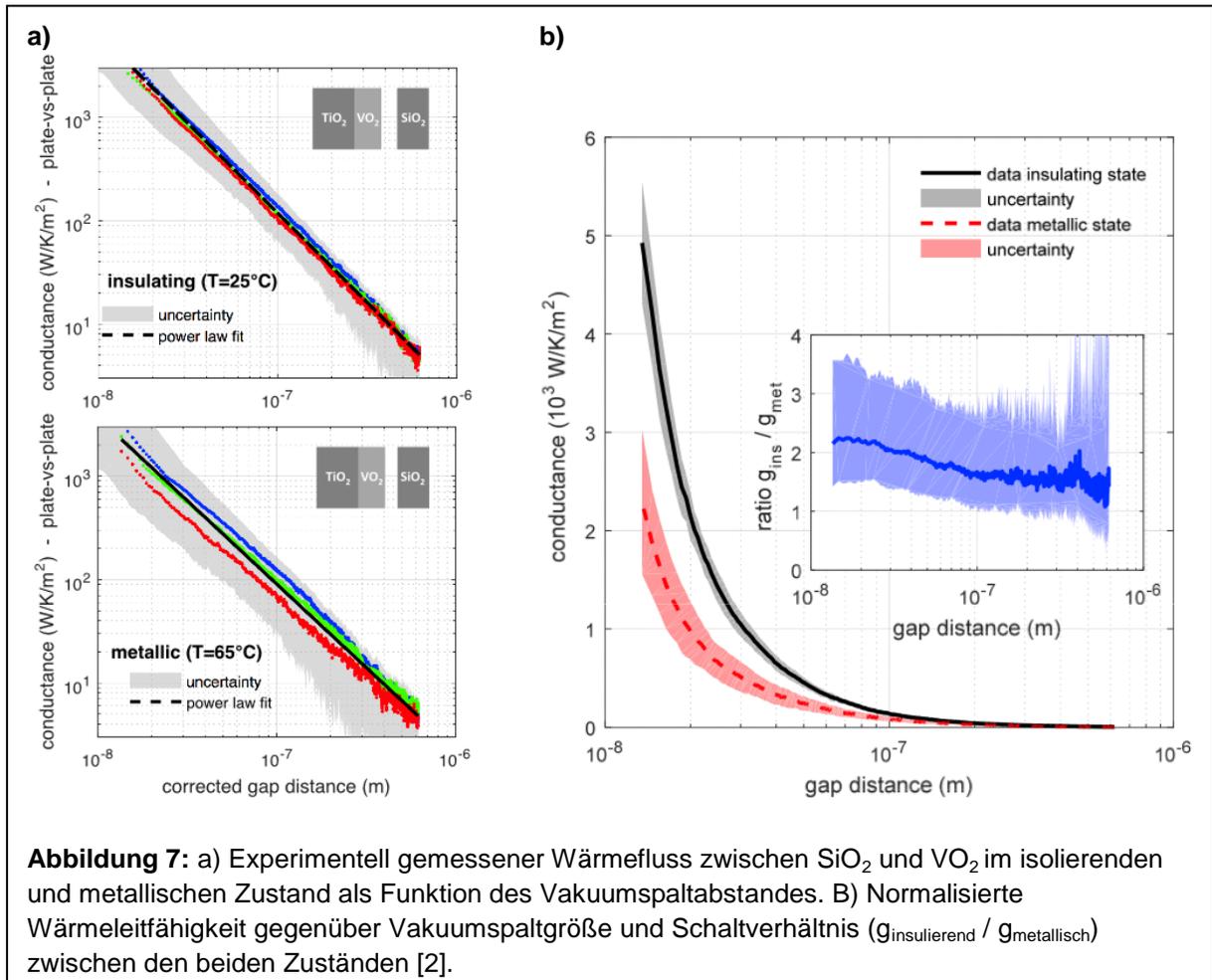
Die Erzeugung von thermischen Relaxationsschwingungen in VO<sub>2</sub> ist mit den unterschiedlichen thermischen Transporteigenschaften von VO<sub>2</sub> in Abhängigkeit vom Materialphasenzustand verbunden. Wenn VO<sub>2</sub> den Metall-Isolator-Übergang erfährt, wird die Wärmeleitfähigkeit von VO<sub>2</sub> entsprechend des Beitrags freier Elektronen maximal um einen Faktor von zwei variiert. Um einen noch höheren Schaltkontrast zu erzeugen, wurde das Umschalten der Strahlungswärme-Transporteigenschaften zwischen VO<sub>2</sub> und SiO<sub>2</sub> untersucht. Theoretische Untersuchungen haben für diesen Fall einen maximalen Schaltkontrast bis zu einem Faktor von 100 vorhergesagt [10].

Um dies experimentell zu verifizieren haben wir distanz- und temperaturabhängige Änderungen der strahlungsbasierten Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Phasenzustands von VO<sub>2</sub> untersucht. Abbildung 7 veranschaulicht unsere Hauptbefunde, die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit zwischen dem metallischen und dem isolierenden Zustand als Funktion der Größe des Vakuumpalts zwischen SiO<sub>2</sub> und VO<sub>2</sub> und dem damit verbundenen Schaltkontrast mit einem maximalen Faktor von 2,5 (siehe Insert in Abbildung 7b).

Der beobachtete Schaltkontrast bei dieser Dünnschicht-Realisierung war deutlich geringer als erwartet [1]. Theoretische Analysen führten zu der Schlussfolgerung, dass dickere VO<sub>2</sub>-Filme oder die Vermeidung des Substrats von Vorteil sein würden um einen höheren Schaltkontrast zu erzeugen. Um diese Schlussfolgerung zu bestätigen und um den Einfluss von Schichtdicke sowie Substrateffekten auszuschliessen, wurde der Strahlungswärmetransport zwischen SiO<sub>2</sub>-Einkristall- und VO<sub>2</sub>-Mikrokristallen untersucht. Für Mikrokristalle mit mehreren Mikrometern Dicke wurde eine Zunahme des maximalen thermischen Schaltkontrasts auf einen Faktor von 5 beobachtet.



Insgesamt lässt sich daher abschliessend feststellen, dass die experimentell messbaren thermischen Schaltkontraste deutlich unter denen theoretischer Vorhersagen blieben. Auch wenn ein thermisches Schaltverhalten mit einem Faktor von 2-5 grundsätzlich genügt, um die Funktion der vorgeschlagenen VO<sub>2</sub> / Vakuum / SiO<sub>2</sub>-Schichtstruktur als Wärmeflusschalter zu demonstrieren, verringert der reduzierte Schaltkontrast deutlich die technische Nutzbarkeit des Effekts zur selbst-angeregten Erzeugung von Temperaturschwingungen.



**Abbildung 7:** a) Experimentell gemessener Wärmefluss zwischen SiO<sub>2</sub> und VO<sub>2</sub> im isolierenden und metallischen Zustand als Funktion des Vakuumpaltabstandes. b) Normalisierte Wärmeleitfähigkeit gegenüber Vakuumpaltgröße und Schaltverhältnis ( $g_{\text{insulierend}} / g_{\text{metallisch}}$ ) zwischen den beiden Zuständen [2].

### 4.3 Entwicklung eines thermomechanischen Relaxationsoszillators

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Anregung thermischer Selbstschwingungen zusammengefasst und erörtert. Die Möglichkeit, thermische Relaxationsschwingungen im vorgeschlagenen Generatorkonzept zu erzeugen, hängt nicht nur vom thermischen Schaltkontrast ab, sondern auch von der thermischen Kopplung des VO<sub>2</sub>-Schalters an die benachbarten Wärmebäder. Insbesondere muss der thermische Widerstand des Vakuumpaltes in der gleichen Grössenordnung sein wie der Widerstand zwischen dem VO<sub>2</sub>-Film und dem kalten Wärmereservoir.

Für die Demonstration eines thermischen Relaxationsoszillators wurde die Wärmeleitfähigkeit des Vakuumpaltes demjenigen zwischen VO<sub>2</sub> und dem kalten Reservoir angepasst. Dazu wurden VO<sub>2</sub>-Mikrokristalle auf frei-hängenden mikroelektromechanischen (MEMS) Sensorplattformen aufgebracht. Diese Konfiguration spiegelt die Notwendigkeit wider, den VO<sub>2</sub>-Thermoschalter in der endgültigen Generatorstruktur thermisch zu isolieren, um eine wärmestrahlungsbasierte Umschaltung über den

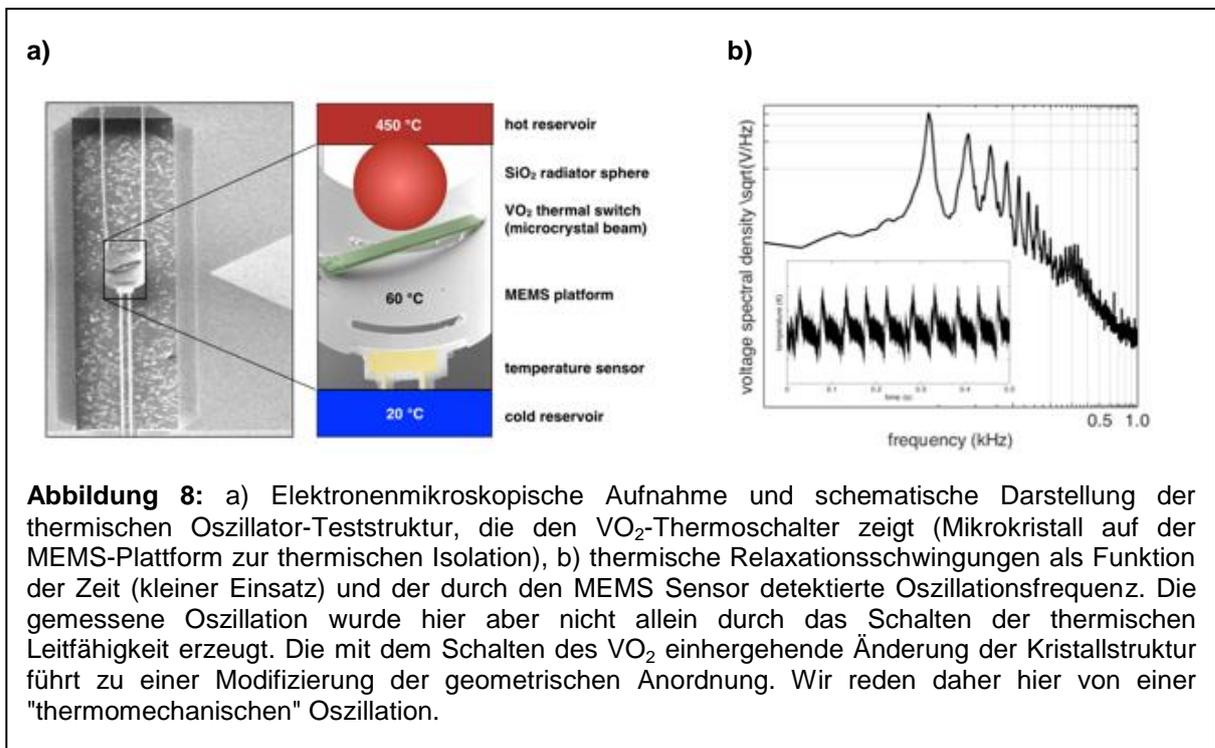


Vakuumpalt als Antriebsmechanismus für die Erzeugung von Temperaturschwingungen zu verwenden. Die MEMS-basierte Messkonfiguration ist besonders geeignet, um den Grundmechanismus zu erforschen, da sie dem VO<sub>2</sub>-Schalter eine ausreichende thermische Isolierung verleihen kann. Gleichzeitig ermöglicht die hervorragende Temperaturempfindlichkeit der MEMS-Sensorplattform eine Erfassung von winzigen Wärmeleitwertschwankungen im Nahfeldregime.

Abbildung 8a) zeigt eine Rasterelektronenmikrographie eines VO<sub>2</sub>-Kristalls auf einer MEMS-Thermosensorplattform und eine schematische Darstellung der Messkonfiguration. Bei der Annäherung an den VO<sub>2</sub>-Kristall mit einem heißen Siliziumoxid-Strahler (T = 450 °C) beobachteten wir die Erzeugung von thermischen Relaxationsschwingungen. Diese Schwingungen erschienen nur in sehr enger Nähe, was nahelegt, dass die beobachteten Schwingungen mit der Bildung eines schwachen, mechanischen Kontaktes zusammenhängen, der periodisch gebildet und gebrochen wurde, wenn VO<sub>2</sub> einen Phasenübergang erfährt.

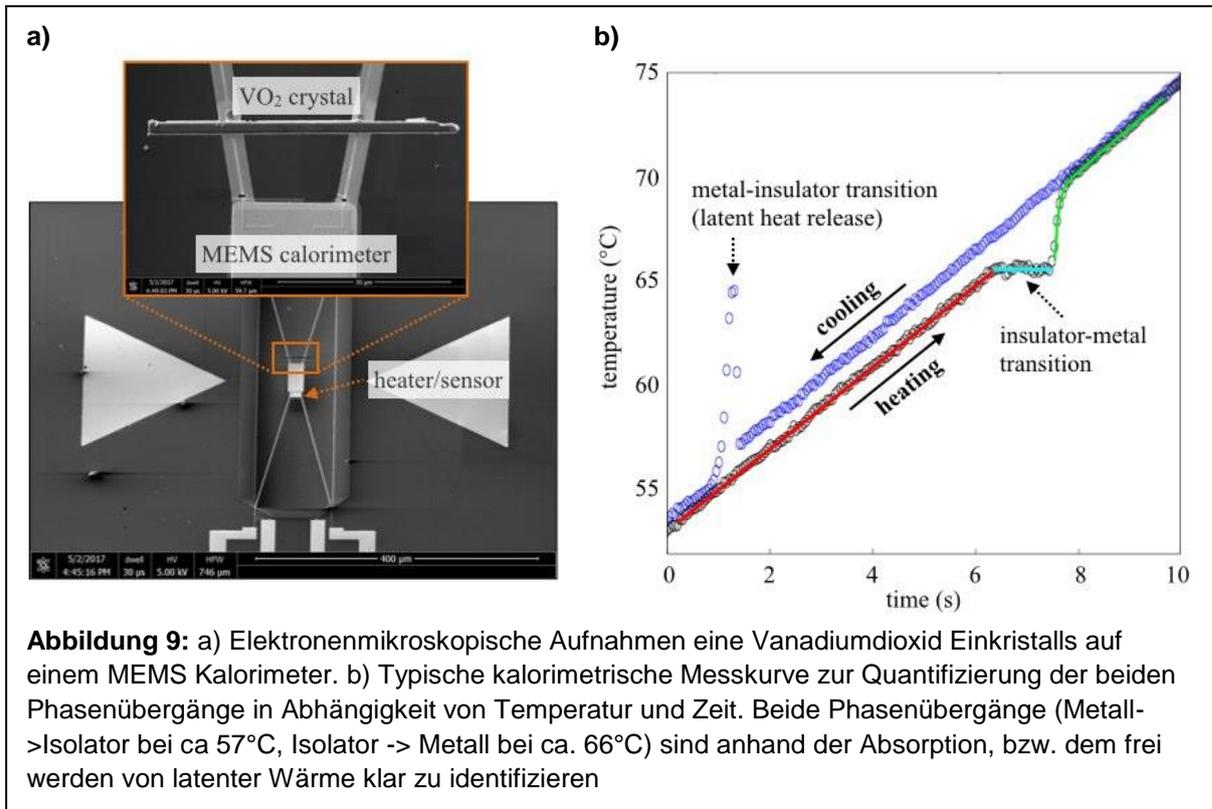
Der Phasenübergang veränderte nicht nur die Strahlungswärmeeigenschaften, sondern führte auch zu einer mechanischen Bewegung, wenn die Kristallstruktur sich änderte. Abbildung 8b) zeigt eine typische Messkurve dieser thermomechanischen Selbstoszillation. Die Grundschwingungsfrequenz beträgt typischerweise weniger als 100 Hz und ist durch die thermische Zeitkonstante der MEMS-Sensorplattform begrenzt. Die beobachteten thermischen Relaxationsschwingungen stehen wie gewünscht in direktem Zusammenhang mit periodischen Metall-Isolator-Übergängen in VO<sub>2</sub> und unterscheidet sich von typischen bi-metallbasierten thermomechanischen Oszillatoren wie sie bereits in der Literatur beschrieben sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein berührungsloser, rein thermischer Oszillator trotz der Beobachtung selbstangeregter Schwingungen nicht erzeugt werden konnte. Obwohl ein reines Strahlungswärmeumschalten demonstriert werden konnte, entstanden in den untersuchten Messkonfigurationen keine thermischen Schwingungen des Nahfeld-Wärmeflusses, die nicht mit signifikanten mechanischen Änderungen in Verbindung gebracht werden konnten.



## 4.4 Kalorimetrische Charakterisierung von Vanadiumdioxid Einkristallen

In diesem Abschnitt fassen wir Ergebnisse zur kalorimetrischen Charakterisierung von Vanadiumdioxid Einkristallen zusammen. Die Experimente sind durch die Notwendigkeit motiviert, ein besseres Verständnis der über die Temperatur getriebenen Phasenübergänge in  $\text{VO}_2$  zu erlangen, insbesondere über den Effekt der Wärmekapazität auf die Funktionsweise von Vanadium als thermischer Schalter und Oszillator. Der Metall-Isolator-Übergang in  $\text{VO}_2$  setzt viel Latentwärme um, die bislang in Berechnungen von  $\text{VO}_2$  als Bauelement vernachlässigt wurde. Ausserdem erlauben



kalorimetrische Messungen einen detaillierteren Einblick in das Schaltverhalten, so dass oft sogar ein Schalten in mehreren unabhängigen Domänen von einem homogenen Schalten unterschieden werden kann.

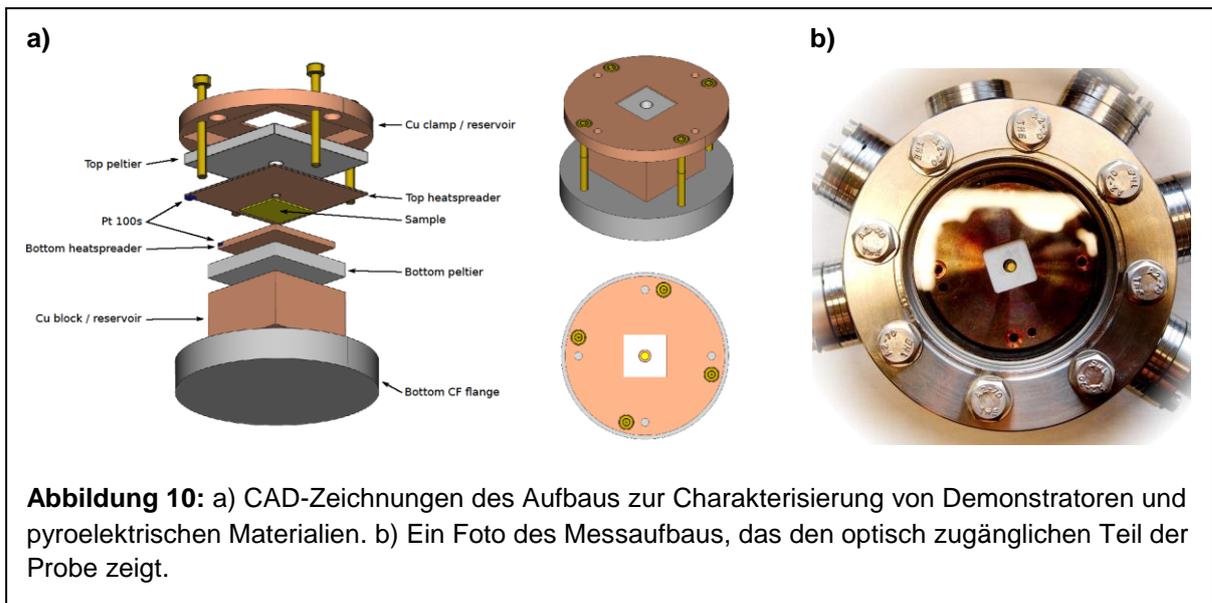
Abb. 9a zeigt den verwendeten Aufbau. Ein  $\text{VO}_2$  Kristall wurde auf einem kalorimetrischen Sensor montiert, der unter Vakuumbedingungen Heizrampen fahren kann und dabei die Temperatur der  $\text{VO}_2$  Probe misst. Ein typisches Resultat ist in Abb. 9b gezeigt. Bei konstanter Heiz- bzw. Kühlrate ändert sich die Temperatur linear, bis der Phasenübergang ausgelöst wird. In diesem Beispiel sieht man beim Heizen, dass die Temperatur während dem Übergang konstant bleibt bis die Latentwärme umgesetzt ist. Dieser Effekt ist unbedingt beim Design eines Energiekonverters zu berücksichtigen, um ein „Einfrieren“ in einem teilweise umgewandelten Phasenzustand zu vermeiden. Die Wärmekapazität aus den anderen verwendeten Materialien, wie zum Beispiel das Pyroelektrikum, muss hinreichend gross sein, um genügend Wärme für das vollständige Schalten des  $\text{VO}_2$  bereitzustellen.

Ein anderer typischer Effekt ist in der Abkühlkurve (Abb. 9b) gezeigt, dort kommt es zu einem plötzlichen Auslösen des Überganges, bei dem die Latentwärme die Temperatur kurzfristig stark überhört. Dieses ist ein Hinweis auf ein Schalten als eine einzelne Domäne.



## 4.5 Entwicklung einer Messplattform zur Charakterisierung Pyroelektrischer Energieumwandlung

Die im Folgenden dargelegten Ergebnisse sind durch die notwendige Entwicklung eines Messaufbaus zur Charakterisierung pyroelektrischer Energieumwandlung in Dünnschichtstrukturen motiviert. Zu diesem Zweck wurde ein neuer Aufbau entworfen, bei dem pyroelektrische Konverterschichten zwischen zwei Peltier-Elementen eingefügt und charakterisiert werden können.

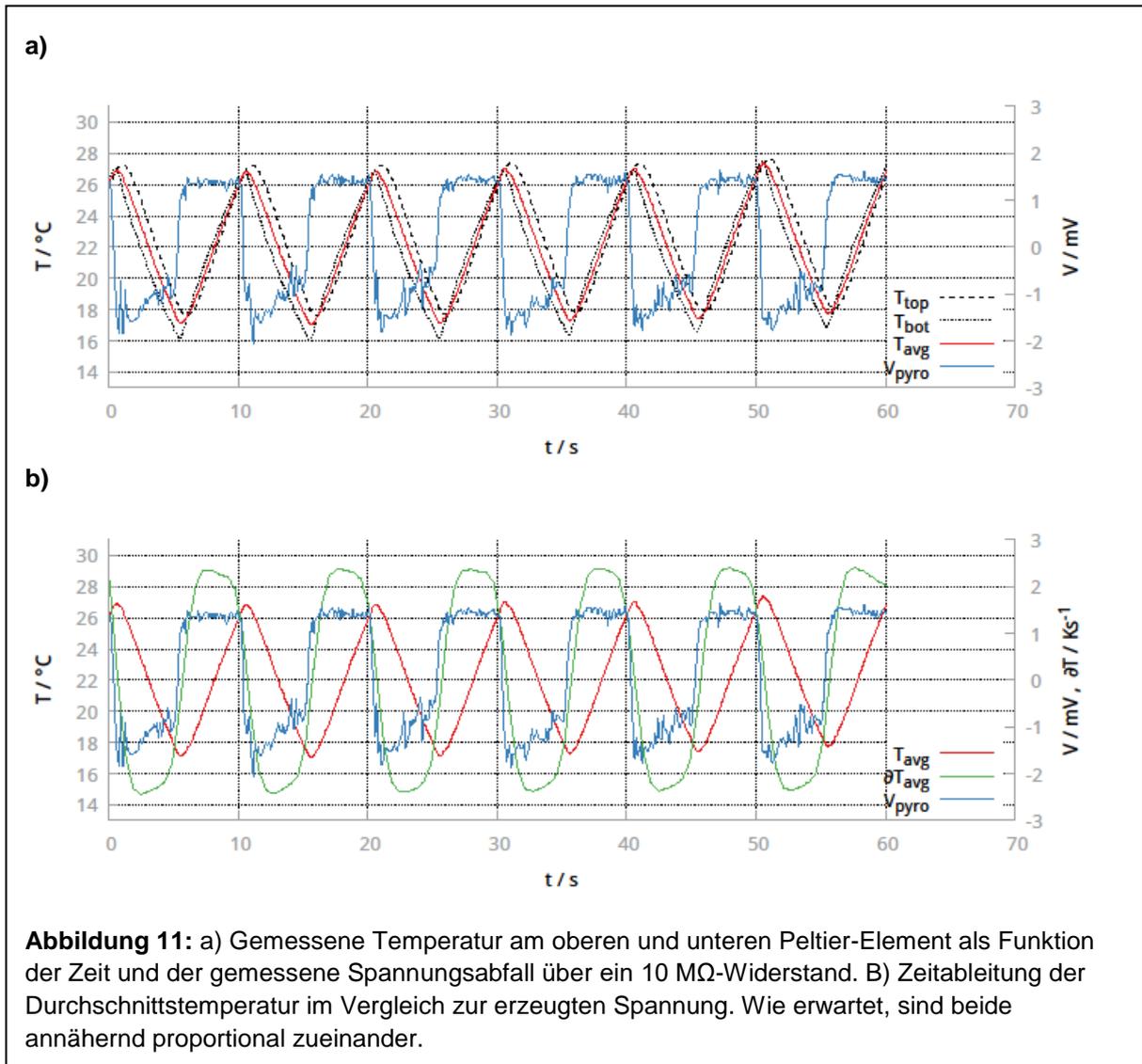


Zwischen der zu charakterisierenden Schichtstruktur und den Peltier-Elementen wurden jeweils Kupferplatten eingefügt, die sowohl als Wärmeverteiler als auch als elektrische Kontakte dienen. Um die Temperatur auf jeder Seite der pyroelektrischen Probe zu überwachen, wurden ausserdem Platin-Widerstandsthermometer in die Kupferplatten eingeklebt. Kupferplatten auf den nach aussen weisenden Seiten der Peltier-Elemente sorgen für eine Kopplung an die Wärmebäder. Der gesamte Aufbau befindet sich in einer kleinen Vakuumkammer, die vorwiegend aus einem CF63-Kammerflansch mit fünf CF16-Ports und abschliessenden CF63-Flanschen auf beiden Seiten besteht. So kann eine Vakuumumgebung geschaffen werden, in der parasitäre Wärmeströme durch Konvektion eliminiert werden. Ein Saphirfenster im oberen CF63-Flansch ermöglicht die optische Untersuchung der Probe unter einem Mikroskop. Dies ist besonders nützlich, um das Schaltverhalten von  $\text{VO}_2$  zu charakterisieren, welches aufgrund von Änderungen in der Reflektivität als Funktion des Phasenzustands möglich ist.

Die Rückseite des unteren Peltierelements wurde über ein monolithisches Kupferstück mit der umgebenden Vakuumkammer gekoppelt, die als thermisches Reservoir dient. Um die nach aussen weisende Seite des oberen Peltiers mit dem Reservoir zu verbinden, wurde an seiner Oberseite ein rundes Kupferelement mit Sichtloch montiert. Befestigungsschrauben aus Kupfer sorgen für eine Wärmeübertragung in die Kammer.



Um pyroelektrische Erzeugung elektrischer Energie in einer Dünnschichtkonfiguration zu testen, wurde ein dünner ( $\sim 20 \mu\text{m}$ ) Film des ferroelektrischen Copolymers Poly [(vinylidenfluorid-co-trifluorethylen)] (P (VDF-TrFE) 45/55) untersucht. Der Film wurde auf beiden Seiten mit einer dünnen Goldschicht bedampft und bereits durch den Hersteller (Piezotech) elektrisch gepolt.



**Abbildung 11:** a) Gemessene Temperatur am oberen und unteren Peltier-Element als Funktion der Zeit und der gemessene Spannungsabfall über ein  $10 \text{ M}\Omega$ -Widerstand. B) Zeitableitung der Durchschnittstemperatur im Vergleich zur erzeugten Spannung. Wie erwartet, sind beide annähernd proportional zueinander.

Um die pyroelektrische Energiegewinnung in einer Dünnschicht-Konfiguration zu testen, wurden zeitveränderliche Ströme auf die Peltier-Elemente angewendet, um eine periodische Temperaturänderung zu simulieren wie sie durch einen thermischen Oszillator erzeugt werden könnten. Die Größen der aufgebrachten Ströme wurden so gewählt, dass ein Heizen und Kühlen zwischen  $17$  und  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  beider Seiten stattfand. Ein Zyklus dauerte zehn Sekunden (siehe Abb. 5). Die durch die Temperaturänderung des PVDF-Films erzeugte Ladung wurde mit Hilfe eines  $10\text{-M}\Omega$ -Widerstands und eines digitalen Multimeters (Tektronix Keithley 2100) gemessen. Die Ergebnisse sind in Abb. 11a mit einer weiteren Analyse, gemäss Abbildung 11b.

Abschliessend lässt sich zusammenfassen, dass der experimenteller Aufbau zur Charakterisierung von pyroelektrischer Energieerzeugung in Dünnschichten erfolgreich entwickelt wurde und zur Quantifizierung pyroelektrischer Elektrizitätserzeugung genutzt werden kann.



## 5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Projekt hat sowohl vielversprechende Ergebnisse bzgl. der Entwicklung nichtlinearer thermischer Effekte auf Basis von Phasenänderungen in Festkörpern aufgezeigt, als auch technologische Schwierigkeiten für die Anwendung dieser Effekte für die Entwicklung pyroelektrischer Generatoren verdeutlicht.

Insbesondere bzgl. der Entwicklung eines thermischen Schalters auf Basis von Metall-Isolator Übergängen konnten deutliche Fortschritte erzielt werden. Hervorzuheben ist vor allem die erstmalige experimentelle Demonstration eines thermischen Nahfeldschalters mit einem Schaltkontrast von 5. Dies würde durch die Entwicklung verschiedener Wachstumsmethoden zur Herstellung von einkristallinen Vanadiumdioxid Dünnschichten und Mikrokristallen erreicht. Durch die Fabrikation und Optimierung von Oszillatorstrukturen konnte darüber hinaus die Anregung thermo-mechanischer Selbstoszillationen zwischen zwei Wärmebädern experimentell demonstriert werden.

Der Nachweis rein-thermischer Oszillationen auf Basis eines strahlungsbasierten Wärmeinflusses über einen Vakuumschlitz zwischen Vanadiumdioxid und Siliciumdioxide war nicht möglich. Insbesondere die starke thermomechanische Kopplung, entsprechend der kristallographischen Änderung des Kristallgitters, verhinderte die Stabilisierung kleiner Vakuumschlitze (<100 nm) über den Phasenübergang hinaus.

Anhand der experimentellen Untersuchungen sowie der begleitenden Simulationen konnten weiterführende Entwurfsregeln für die Implementierung eines Generators auf Basis von Temperaturschwankungen abgeleitet werden. Die folgenden abschliessenden Beobachtungen geben einige konkrete Gestaltungsregeln und Randbedingungen für die Weiterentwicklung des Generatorkonzepts, insbesondere des thermischen Relaxationsoszillators:

- I. Simulationen haben gezeigt, dass der gesamte thermische Serienwiderstand einer Generator Schichtstruktur idealerweise vollständig aus einem pyroelektrischen Material hergestellt sein sollte. Weitere, passive thermische Widerstände in Serie können die Umwandlungseffizienz nur reduzieren. Eine Zwei-Widerstands-Anordnung (Serienlastwiderstand und thermischer Schalterwiderstand) beschreibt daher den besten Fall der Generatorstruktur.
- II. Simulationen haben gezeigt, dass die Energieumwandlungseffizienz des Generators direkt proportional zur Amplitude der Temperaturschwankung innerhalb des thermischen Serienwiderstands (für die pyroelektrische Energieumwandlung) ist. Da diese Temperaturvariation direkt durch die Schaltamplitude in dem Thermoschalter gesteuert wird, muss die Breite der Hysterese, die bei Änderung der Wärmeleitfähigkeit beobachtet wird, maximiert werden.
- III. Experimente zur Erzeugung thermischer Relaxationsoszillationen haben gezeigt, dass der Schaltvorgang in einem Relaxationsoszillator vollständig und spontan ablaufen muss, um eine Selbstanregung von Schwingungen erzeugen zu können. Dies bedeutet, dass ein allmählicher Schaltvorgang, der einen Zwischenzustand für das System zulassen kann, ausgeschlossen werden muss. Die Teilumwandlung kann entlang der Achse des thermischen Transports oder seitlich dazu erfolgen. Es bleibt experimentell zu zeigen, bei welcher Strukturgrösse sich ein solcher thermischer „Single-Switch“ erzeugen lässt.

Das untersuchte Generatorkonzept auf Basis rein ‚passiver‘ thermischer Selbstanregung von Temperaturoszillation anhand von Metall-Isolator-Übergängen liess sich technisch noch nicht realisieren. Die in diesem Projekt erstmals gezeigte Entwicklung strahlungsbasierter thermischer Schalter stellt jedoch eine neue technologische Möglichkeit zur ‚aktiven‘ Kontrolle von Wärmeinflüssen da. Insbesondere die demonstrierte Möglichkeit, mittels nahfeldbasierter Effekte über Vakuumschlitze deutlich höhere Schaltkontraste zu erzeugen als dies in konventionellen, wärmeleitungs-basierten Schaltern möglich ist, ist vielversprechend für weitere Untersuchungen und technologische



Anwendungen. Der Bau von Strukturen mit stabilen Vakuumpalten auf Basis von mikrogefertigten mechanischen Stützstrukturen ist zwischenzeitlich technisch machbar. Zukünftige Forschungsprojekte zur Entwicklung eines Generatorprototypens sollen sich auf die Entwicklung nahfeldbasierter, aktiver elektrothermischer Schalter in solchen Vakuum-Schichtstrukturen konzentrieren.

Die potenziellen Anwendungen des vorgeschlagenen Generators liegen im Bereich der Verwendung von industrieller Abwärme oder anderen Wärmequellen von relativ kleiner Temperatur (z. B. unter 100 C). Für diese Anwendungsbereiche ist die erwartete hohe Effizienz des Generators ein wichtiges Argument. Die geometrischen Abmessungen, die gegeben sind als Dünnschicht mit einer Dicke von kleiner als ein Millimeter bei gleichzeitig freier Skalierbarkeit in der Fläche, ermöglichen einen Einsatz für Verbraucher von einigen Kilowatt bis herunter zu etwa einem Watt. Im Vergleich zu thermoelektrischen Konvertern, die ähnliche Anwendungen bedienen können, erwarten wir eine höhere Effizienz.

Mögliche Einschränkungen des pyroelektrischen Konverters liegen in den Kosten, die verursacht werden durch Komponenten zur Erzeugung des Vakuumpalts. Ausserdem muss der Generator an die Temperatur der Wärmequelle angepasst werden.



## Referenzen

1. C. B. Vining, An inconvenient truth about thermoelectrics, *Nature Materials* 8, 83 - 85 (2009)
2. X. Moya et. al, Caloric materials near ferroic phase transitions, *Nature Materials* 13, 439–450 (2014)
3. G. Sebald et. al, On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting, *Smart Mater. Struct.* 18, 125006 (2009)
4. R.B. Olsen et. al, A pyroelectric converter which employs regeneration, *Ferroelectrics* 38, 975-978 (1981)
5. G. Sebald et. al, Pyroelectric energy conversion: Optimization principles, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Volume:55, Issue: 3 (2008)
6. R. C. Moreno et. al, Pyroelectric energy converter for harvesting waste heat: Simulations versus experiments, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 55, Issues 15–16, 4301–4311 (2012)
7. S. R. Hunter, Review of pyroelectric thermal energy harvesting and new MEMS-based resonant energy conversion techniques, *Conf. Proc. SPIE 8377, Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications III* (2012)
8. R. I. Eppstein et. al, Electrocaloric devices based on thin-film heat switches, *J. Appl. Phys.* 106, 064509 (2009)
9. P.J. van Zwol, Phonon polaritons enhance near-field thermal transfer across the phase transition of VO<sub>2</sub>, *Phys. Rev. B* 84, 161413 (2011)
10. G. Cha, Pyroelectric energy harvesting using liquid-based switchable thermal interfaces, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 189, 100–107 (2013)

## Konferenzbeiträge und Wissenschaftliche Veröffentlichungen

1. **Thermal radiative near field transport between vanadium dioxide and silicon oxide across the metal insulator transition**  
F. Menges, M. Dittberner, L. Novotny, D. Pasarello, S. P. Parkin, M. Spieser, H. Riel, and B. Gotsmann, *Applied Physics Letters* 108, 171904, 2016.
2. **Local Probing of Thermal Energy Transfer and Conversion Processes in VO<sub>2</sub> nanostructures**  
APS March Meeting, New Orleans, 2017
3. **Local thermometry of self-heated nanoscale devices**  
International Electron Device Meeting, San Francisco, 2016