

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Schlussbericht

Verbund: 05K2019 - BETH

Zuwendungsempfänger: Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
Projektleitung: Prof. Dr. Kurt Aulenbacher  
E-Mail: aulenbac@kph.uni-mainz.de  
Förderkennzeichen: 05K19UMB  
Förderzeitraum: 01.07.2019 - 31.12.2023  
Zuwendung: 352.721,90 €  
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt:  
Zusätzlicher Name:

Genutzte Großgeräte:	Labor Materie	Gerät R&D Beschleuniger	Experiment
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	0		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	0		
Andere Veröffentlichungen:	3		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	0		
Masterarbeiten:	0		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 11.07.2024 20:59 für eine Veröffentlichung freigegeben.

## Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Projektleitung: Univ.- Prof. Dr. Kurt Aulenbacher

Verbund: 05K2019 - BETH

Thema: Verbundprojekt 05K2019 - BETH: Hochbrillianten Elektronenstrahlen generiert durch neuartige thermisch widerstandsfähige Photokathoden. Teilprojekt 2.

## Zusammenfassung

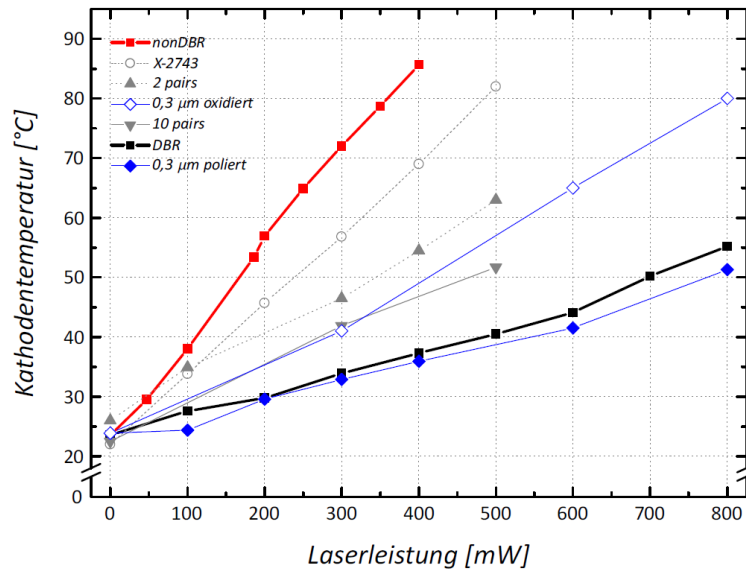
### Bericht

#### **1. Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

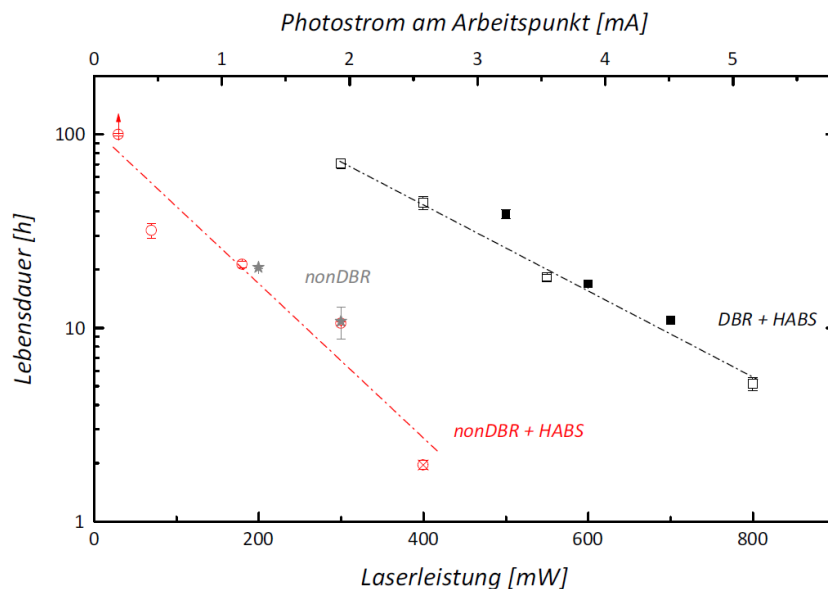
Das Projekt beschäftigte sich mit der effizienten Wärmeabfuhr aus Fotokathoden, die eine hohe mittlere Stromstärke in Elektronenquellen erzeugen sollen. Um mittlere Ströme von mehr als 10 Milliampere erzeugen zu können, sind Laser-Intensitäten von einem Watt oder mehr notwendig. Dies gilt einerseits für GaAs-basierte Kathoden, die für die Erzeugung spin-polarisierter Strahlen eingesetzt werden. Dieser erzielen Quantenausbeuten bis zu 15 Milliampere pro Watt im nahen Infrarot. Ähnliche Verhältnisse finden sich andererseits bei Kathoden vom Typ KCsSb, die mit sichtbarem Licht, meistens bei der frequenzverdoppelten Nd:YAG Laserlinie von etwa 532nm betrieben werden. Dort werden etwa 30mA/Watt erreicht, womit aber nur unpolarisierte Elektronenstrahlen erzeugt werden können. Um die in Betrieb abnehmende Quantenausbeute auszugleichen, wird dann die Laserleistung entsprechend erhöht, so dass in der Realität Laserleistungen von einigen Watt verwendet würden. Beide Typen, aber besonders GaAs-basierte Kathoden, reagieren empfindlich auf Temperaturerhöhungen, siehe Abb. 1 und Abb.2.

#### **2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.**

Im Betrieb mit einer Fotoemissionsquelle wird beobachtet, dass nach einer Übergangsphase die Quantenausbeute der Kathode exponentiell abfällt. Je höher die Strahlintensität, desto kürzer die Übergangsphase. Die Zeitkonstante des darauffolgenden exponentiellen Abfalls, die sogenannte Kathodenlebensdauer, ist das Resultat mehrerer parallel wirkender degradierender Prozesse. Erhöht sich die Temperatur der genannten hocheffizienten Fotokathoden auf mehr als 50 Grad Celsius, so wird der Beitrag dieses Temperatur-induzierten Effekts dominant (Abb.1, Abb. 2). Das Ziel dieses Projektes ist es also, trotz der Einstrahlung von Laserleistung im Wattbereich eine derartige Temperaturzunahme zu vermeiden.



**Abb.1. Kathodentemperatur als Funktion der Laserleistung für verschiedene Kathodenmontagen und Kathodentypen. Aus: E. Riehn , Dissertation JGU Mainz, 2011**



**Abb 2 Kathodenlebensdauer als Funktion der Laserleistung bei verschiedenen Kathodentypen. Aus: E. Riehn , Dissertation JGU Mainz, 2011**

Unter der Vorgabe einer nur geringfügigen Erhöhung der Temperatur ist die Ableitungen von Wärmeleistungen im Bereich von einigen Watt normalerweise problemlos möglich, wenn ein genügender Wärmeübertrag von der Wärmequelle in eine Wärmesenke – normalerweise eine auf Umgebungstemperatur gehaltene Referenzfläche - stattfinden kann. Eine aktive Kühlung ist dabei nicht notwendig und wäre in den hier gegebenen Hochspannungsanlagen auch technisch komplex. Unsere Arbeiten konzentrierten sich daher auf die Herstellung genügend großer Wärmeübergänge über die Grenzflächen und optimierte Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Bauteile.

Die mit der Temperaturerhöhung verbundene Reduktion der Lebensdauer muss durch eine effektive Ableitung der Verlustwärme vermieden werden.

Hiermit ergeben sich mehrere, teilweise gegenläufig wirkende Anforderungen an die Konstruktion der bisher realisierten Quellen. Einerseits müssen die Fotokathoden außerhalb der Quelle hergestellt werden

und dann mechanisch durch sog. „Manipulatoren“ im Ultrahochvakuum (UHV) in die Quelle eingeführt werden. Aus Gründen der elektrischen Isolation müssen die metallischen Manipulatoren danach aus der Hochspannungselektrode entfernt werden, speziell muss der Kathodenhalter mechanisch vom Manipulator gelöst werden und in der Elektrode zurückbleiben. Damit stellt sich die Frage, wie ein ausreichender Wärmefluss vom Kathodenhalter in die Hochspannungselektrode gewährleistet werden kann. Weiter sind konventionelle Isolatoren auf keramischer Basis keine guten Wärmeleiter, d.h. selbst wenn ein ausreichender Wärmeübergang vom Halter in den Isolator vorliegt, wird der weitere Wärmefluss behindert.

Die Aufgabenstellung des hier referierten Projekts war also, einen Ansatz zu finden, der die genannten Limitierungen überwindet. Dieser Ansatz besteht darin, den metallischen Manipulator durch eine Erweiterung mit einem hochspannungsisolierenden Aufsatz zu modifizieren.

### **3. Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten**

Es wurde ein konstruktiver Ansatz gewählt, der mit Hilfe von mechanischer Zugspannung, die durch ein zugfestes Isoliermaterial (Macor) vermittelt wird, den nötigen Anpressdruck des Kathodenhalters auf einen Bornitrid-Körper erreicht. Bornitrid ist eine Keramik, die bei hervorragender elektrischer Isolation eine im Vergleich zu etablierten Keramiken mehrere Größenordnungen höhere thermische Leitfähigkeit aufweist. Macor und Bornitrid sind in den Manipulator integriert,

Im Prozess der Bereitstellung von Fotokathoden für den Einsatz in der Elektronenquelle wird zunächst eine Fotokathode hergestellt, die dann an einen Manipulator übergeben wird. Mit dessen Hilfe wird die Kathode in die eigentliche Elektronenquelle transferiert. Weil im gewählten Ansatz der Manipulator nicht mehr von der Hochspannungselektrode getrennt werden muss und zusätzlich ein verbesserter Wärmeübertrag über die Grenzfläche von Kathodenhalter zum Isolator erreicht werden kann, würden sämtliche oben angesprochenen Problematiken aufgelöst.

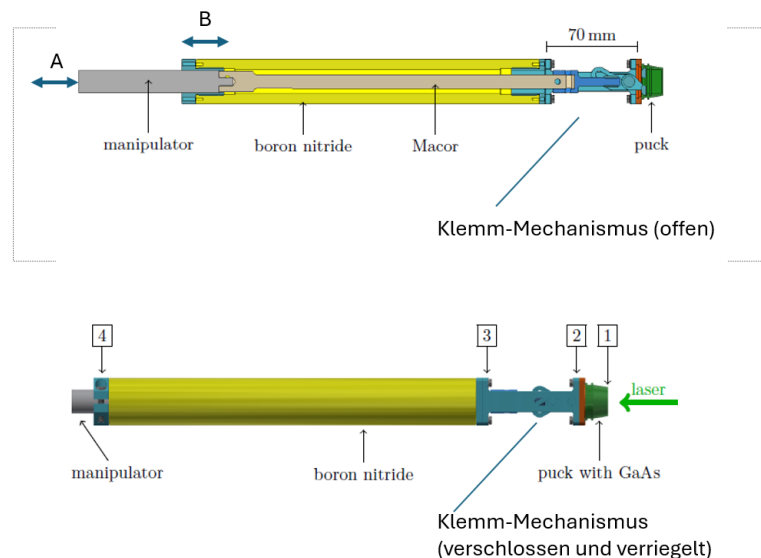
Ziel des Projekts war es, diese Vorteile in einer möglichst realistischen Anwendungsumgebung zu demonstrieren. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle Materialien für die Anwendung im Ultrahochvakuum geeignet sind, d. h. es wurden nur metallische und keramische Werkstoffe verwendet. Diese Eignung wurde durch massenspektroskopische Bestimmung der Restgasdrücke nachgewiesen.

Es wurde eine Konstruktion entwickelt, die auf einem handelsüblichen Vakuum-Manipulator basiert, der zwei unabhängige Bewegungsfreiheitsgrade in der Transportrichtung aufweist. Dieser Manipulator wird mit keramischen Bauteilen verlängert, die die nötige Hochspannungsisolierung gewährleisten. Der zweite Bewegungsfreiheitsgrad dient dazu, eine Zugstange aus Macor zu bewegen, die sich im Inneren eines dickwandigen Bornitrid Zylinders befindet (Abb.3). Die Zugstange presst über eine Scheren-Mechanik mit eingebauter Verriegelung den Kathodenhalter an den Bornitrid Zylinder. So wird ein guter thermischer Kontakt zum Zylinder hergestellt. Bornitrid hat eine geeignete hohe Wärmeleitfähigkeit. Nachteilig ist die geringe Festigkeit des Bornitrids. Im Gegensatz dazu ist der Werkstoff Macor - eine Kombination aus Glimmer und Borosilikatglas - zwar thermisch schlecht leitend, aber mechanisch ausreichend belastbar, um den notwendigen Anpressdruck herzustellen. Beide Materialien weisen ausgezeichnete elektrische Isolation auf. Nach der Konzeption und dem Aufbau der Anlage begannen Experimente, die die Erwärmung und Wärmeleitfähigkeiten in einem realen Aufbau – d.h. beispielsweise im Hochvakuum – nachweisen sollten.

Es kam ein Laser bei einer Wellenlänge von 532 Nanometer zum Einsatz, der mit einer Leistung von 2 Watt auf einen GaAs-Kristall gerichtet wurde (Abb.3 unten), welche eine Standard-Fotokathode für Anwendungen in der Grundlagenforschung ist. Aufgrund der niedrigen Bandlücke des GaAs kommt es zu einer starken Absorption, die in Wärmeenergie umgewandelt wird. Dieser Aufbau arbeitete zunächst ohne Hochspannung um genügend Temperatursensoren installieren zu können. Dabei wurde die Wärme über Kupferbacken abgeführt, die über Membranbälge im Vakuum bewegt werden können. Sobald sich der Manipulator in der Arbeitsposition befindet, werden die Kupferbacken angepresst und die Wärme so aus dem Vakuumsystem entfernt. Diese Anordnung bestimmt die Zeitkonstante der Erwärmung der Komponenten, die etwa 50 Minuten beträgt (Abb. 4). Die Kupferbacken werden vom Manipulator gelöst, sobald eine Bewegung der Kathode erforderlich wird.

Im Grenzwert beträgt die Erwärmung der Kathode gegenüber der Umgebungstemperatur (d.h. der Temperatur der Kupferbacken) etwa 50 Grad Celsius. Der Hauptteil des Temperaturanstiegs (ca. 38 Grad am Messpunkt 4) resultiert aus dem Wärmewiderstand der Manipulatorachse, was in späteren Konstruktionen noch weiter verbessert werden kann, z.B. durch Verringerung des Abstands (zur Zeit 15cm) der Kupferbacken zum Ende der Keramik. Im Prinzip können die auf Erdpotential befindlichen Kupferbacken auch auf einfache Weise gekühlt werden, z.B. um die Kathodentemperatur stabil zu halten. Der zweitwichtigste Anteil resultiert aus dem Wärmewiderstand der Greifer/Scherenmechanik, die aus Molybdän mit einem Wärmeleitwert von  $K=139\text{W/Km}$  gefertigt wurde. (Temperaturdifferenz zwischen Messpunkt 2 und 3). Hier kann durch Verwendung eines Materials mit gleicher mechanischer und vakuumtechnischer Eignung - beispielsweise Beryllium-Bronze mit  $K=320\text{W/Km}$  – eine bedeutende Verbesserung erwartet werden.

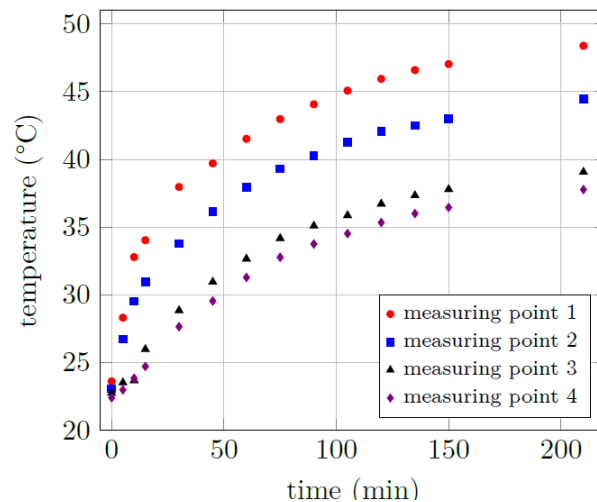
Es zeigte sich, dass der Temperaturanstieg über den elektrisch isolierenden Teil, d.h. den Bornitrid-Zylinder, lediglich etwa 2 Grad bei einer Leistung von 2 Watt beträgt (Abb. 4). Dies ist ein wichtiger technologischer Fortschritt, der in diesem Projekt erzielt wurde.



**Abb 3 Konstruktion des isolierenden und gleichzeitigen wärmeleitenden Manipulator-Aufsatzes. Bild oben: Schnitt durch die Mechanik. „A“ und „B“ kennzeichnen zwei unabhängige Bewegungsfreiheitsgrade. A wird verwendet, um den Kathodenhalter anzupressen. B bewegt die Kathode in die Hochspannungselektrode. Bild unten: Seitenansicht mit den Positionen der Temperaturmessstellen.**

In einem zweiten Schritt wurde die so gefertigte Konstruktion in einer Hochspannungsanordnung eingesetzt. Dazu wurde eine Elektrode in einer Geometrie aufgebaut, die einer realistischen Foto-Elektronenquelle entspricht. Die Konstruktion konnte bei einer Spannung von 25 Kilovolt ohne Probleme ausgesetzt werden. Eine solche Spannung ermöglicht beispielsweise in kommerziellen thermionischen Elektronenquellen Ströme bis zu einigen Ampere, also mehrere Größenordnungen über dem hier gesteckten Ziel. Es wurde aber auch beobachtet, dass das Bornitrid isolierende Partikel absondert, die die Verwendbarkeit bei höheren Spannungen als 25kV in Frage stellen könnte. Zur Lösung dieser Fragestellung bietet es sich an, die von uns bereits erprobte hybride Konstruktion aus Macor und Bornitrid weiterzuentwickeln, indem man das Bornitrid auch auf der Außenseite mit einem Mantel aus Macor, das deutlich weniger Partikelabsonderung aufweist, umgibt.

Die Implementation der genannten Modifikationen in eine Hochspannungsanlage, die einen Elektronbeschleuniger mit mehr als 10 Milliampere mittlerem Strom versorgen kann, ist in [2, 3] beschrieben.



**Abb 4 : Temperaturveränderungen an den verschiedenen Messstellen (Abb 3, unten) als Funktion der Zeit bei einer eingestrahelten Laserintensität von 2 Watt [2].**

Die Arbeiten fanden im Verbund statt, der aus den Universitäten in Siegen und Mainz sowie den Helmholtzzentren HZB und HZDR bestand. Beide Zentren arbeiten mit hochintensiven Fotoemissionsquellen und planen die mittleren Ströme erheblich zu vergrößern. Mehrere Kooperationstreffen dienten dem Informationsaustausch und der Vorbereitung der weiteren Aktivitäten.

#### **4. Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)**

Die Projektförderung bestand zum weitaus überwiegenden Teil (>90%) aus Personalmitteln. Damit konnte die Durchführung des Projekts durch eine erfahrene Wissenschaftlerin sichergestellt werden.

#### **5. Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele**

Der wesentliche Aspekt war die Demonstration der gesteigerten Wärmeableitung und der Hochspannungsfähigkeit der gewählten mechanischen Lösung. Dieser wurde vollständig erreicht und in wichtigen Teilaspekten sogar übertroffen.

#### **6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Es wurde demonstriert, dass das gleichzeitige Problem der Hochspannungsisolation und der Wärmeabfuhr aus Fotokathoden mit unserem Ansatz gelöst werden kann. Somit wird es möglich sein, mittlere Leistungen von mehreren Watt abzuführen, ohne die Lebensdauer von Fotokathoden durch den ansonsten auftretenden Temperaturanstieg zu verringern. Dies entspricht einem mittleren Strom, der 10 Milliampere deutlich übersteigt, was für die meisten in der Zukunft geplanten Elektronenbeschleunigerprojekte ausreicht.

#### **7. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Nutzung des elektrisch isolierenden, aber thermisch leitfähigen Bornitrids ist nicht auf Elektronenquellen beschränkt, sondern es wird in Zukunft immer zum Einsatz kommen, wenn im Vakuum die Kombination aus elektrischer Isolationsfähigkeit und thermischer Leitfähigkeit benötigt wird.

**8. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Keine.

**9. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse des Verbundes**

**9.1. Referierte Publikationen**

Keine

**9.2 Andere Publikationen: Konferenzberichte**

[1] M.A. Dehn et al. UNCONVENTIONAL HIGH-VOLTAGE INSULATOR IN DC PHOTOEMISSION SOURCES\* 15<sup>th</sup> International Particle accelerator conference, Nashville, TN, JACoW publishing, DOI: doi: 10.18429/JACOW-IPAC2024-WEPC53

[2] M.A. Dehn et al. , MIST – THE MESA-INJECTOR SOURCE TWO, Proceedings 13<sup>th</sup> international particle accelerator conference, IPAC2022, Bangkok, Thailand, doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-THPOPT024

[3] M.A. Dehn et al. HEAT DISSIPATION OF PHOTOCATHODES AT HIGH LASER

INTENSITIES FOR A NEW DC ELECTRON SOURCE\* Proceeding 12<sup>th</sup> Int. Particle accelerator conference, IPAC2021 Caminas, SP, Brazil, JACOW publishing , doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPA100

**9.3 Abschlussarbeiten**

Keine

## **Kurzbericht**

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Projektleitung: Univ.- Prof. Dr. Kurt Aulenbacher

Verbund: 05K2019 - BETH

Thema: Verbundprojekt 05K2019 - BETH: Hochbrillianten Elektronenstrahlen generiert durch neuartige thermisch widerstandsfähige Photokathoden. Teilprojekt 2.

### **1. Ziel und Inhalt des Projektes**

Das Projekt beschäftigte sich mit der effizienten Wärmeabfuhr aus Fotokathoden, die eine hohe mittlere Stromstärke in Elektronenquellen erzeugen sollen. Um mittlere Ströme von mehr als 10 Milliampere erzeugen zu können, sind Laser-Intensitäten von einem Watt oder mehr notwendig. Diese Leistung wird zum größten Teil in der Kathode in Wärme umgesetzt, die abgeleitet werden muss, um eine übermäßige Erhitzung der Kathode zu vermeiden, weil diese wiederum zu einer unakzeptablen Reduktion der Kathodenlebensdauer führt.

Hiermit ergeben sich mehrere, teilweise gegenläufig wirkende Anforderungen an die Konstruktion der bisher realisierten Quellen. Einerseits müssen die Fotokathoden außerhalb der Quelle hergestellt werden und dann mechanisch durch sog. „Manipulatoren“ im Ultrahochvakuum (UHV) in die Quelle eingeführt werden. Aus Gründen der elektrischen Isolation müssen die metallischen Manipulatoren danach entfernt werden. Damit stellt sich die Frage, wie ein ausreichender Wärmefluss vom Kathodenhalter in die Hochspannungselektrode gewährleistet werden kann. Weiter sind konventionelle Isolatormaterialien keine guten Wärmeleiter.

Es wurde ein konstruktiver Ansatz gewählt, der mit Hilfe von mechanischer Zugspannung, die durch ein zugfestes Isoliermaterial (Macor) vermittelt wird, den nötigen Anpressdruck des Kathodenhalters auf einen Bornitrid (BN-) Block erreicht. Bornitrid ist eine Keramik, die bei hervorragender elektrischer Isolation eine im Vergleich zu etablierten Keramiken mehrere Größenordnungen höhere thermische Leitfähigkeit aufweist. Macor und Bornitrid sind in den Manipulator integriert, so dass potentiell sämtliche oben angesprochenen Problematiken aufgelöst werden können. Ziel des Projekts war es, diese Vorteile in der realen Anwendung zu demonstrieren.

### **2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens**

Im Prozess der Bereitstellung von Fotokathoden für den Einsatz in der Elektronenquelle wird zunächst eine Fotokathode hergestellt, die dann an einen Manipulator übergeben wird. Mit dessen Hilfe wird die Kathode in die eigentliche Elektronenquelle transferiert.

Es wurde eine Konstruktion entwickelt, die auf einem handelsüblichen Manipulator basiert, der zwei unabhängige Bewegungsfreiheitsgrade in der Transportrichtung aufweist. Dieser Manipulator wird mit keramischen Bauteilen verlängert, die die nötige Hochspannungsisolation gewährleisten. Der zweite Bewegungsfreiheitsgrad dient dazu, eine Zugstange aus Macor zu bewegen, die sich im Inneren eines dickwandigen Bornitrid Zylinders befindet. Die Zugstange presst den Kathodenhalter an den Bornitrid Zylinder. So wird ein guter thermischer Kontakt zum Zylinder hergestellt. Bornitrid hat eine geeignete hohe Wärmeleitfähigkeit und der Glaskeramik-Werkstoff Macor ist hinsichtlich der Zugspannung ausreichend belastbar. Beide Materialien weisen ausgezeichnete elektrische Isolation auf. Nach der Konzeption und dem Aufbau der Anlage begannen Experimente, die die Erwärmung und Wärmeleitfähigkeiten in einem realen Aufbau – d.h. u.a. im Hochvakuum – nachweisen sollten.

Es kam ein Laser zum Einsatz, der mit einer Leistung von 2 Watt auf einen GaAs-Kristall gerichtet wurde, welche eine Standard-Fotokathode für Anwendungen in der Grundlagenforschung ist. Aufgrund der niedrigen Bandlücke des GaAs kommt es zu einer starken Absorption, die in Wärmeenergie umgewandelt wird. Dieser Aufbau arbeitete zunächst ohne Hochspannung um genügend Temperatursensoren installieren zu können. Es zeigte sich, dass der Temperaturanstieg über den elektrisch isolierenden Teil, d.h. den Bornitrid-Zylinder, lediglich etwa 2 Grad bei einer Leistung von 2 Watt beträgt. In einem zweiten Schritt wurde die so gefertigte Konstruktion in einer Hochspannungsanordnung eingesetzt. Dazu wurde eine Elektrode in einer Geometrie aufgebaut, die einer realistischen Foto-Elektronenquelle entspricht. Die Konstruktion konnte einer Spannung von 25 Kilovolt ohne Probleme ausgesetzt werden. Eine solche Spannung ermöglicht beispielsweise in kommerziellen thermionischen Elektronenquellen Ströme bis zu einigen Ampere, also mehrere Größenordnungen über dem hier gesteckten Ziel. Es wurde aber auch beobachtet, dass das Bornitrid isolierende Partikel absondert, die die Verwendbarkeit bei höheren Spannungen als 25kV in Frage stellen könnte. Zur Lösung dieser Fragestellung bietet es sich an, die von uns bereits erprobte hybride Konstruktion aus Macor und Bornitrid weiterzuentwickeln, indem man das Bornitrid auch auf der Außenseite mit einem Mantel aus Macor umgibt.

### **3. Konkreter Nutzen sowie Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse**

Es wurde demonstriert, dass das gleichzeitige Problem der Hochspannungsisolation und der Wärmeabfuhr aus Fotokathoden mit unserem Ansatz gelöst werden kann. Somit wird es möglich sein, mittlere Leistungen von mehreren Watt abzuführen, ohne die Lebensdauer von Fotokathoden durch den ansonsten auftretenden Temperaturanstieg zu verringern. Dies entspricht einem mittleren Strom, der 10 Milliampere deutlich übersteigt, was für die meisten in der Zukunft geplanten Elektronenbeschleunigerprojekte ausreicht. Die Nutzung des elektrisch isolierenden, aber thermisch leitfähigen Bornitrids ist aber nicht auf Elektronenquellen beschränkt, sondern es wird in Zukunft immer zum Einsatz kommen, wenn im Vakuum die Kombination aus elektrischer Isolationsfähigkeit und thermischer Leitfähigkeit benötigt wird.