



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**

# **Konzeptionierung und Auslegung einer Röntgentarget-Struktur für die Hochleistungs-Strahlentherapie**

Masterarbeit

vorgelegt dem

Lehrstuhl für Neue Fertigungstechnologien und Werkstoffe

der

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

der Bergischen Universität Wuppertal

von

André Janes

Matr.-Nr. 1345863

Wuppertal 2022

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Arne Röttger  
Prof. Dr.-Ing. Michael Butzek  
Betreuer/-in: Anton Dimroth, Dipl.- Ing.



## Master-Thesis

Semester SS2022

Fach: Maschinenbau

Name: Janes

Vorname: André

Matrikel-Nr.: 1345863

Thema:

Konzeptionierung und Auslegung einer Röntgentarget-Struktur für die Hochleistungs-Strahlentherapie

Aufgabenstellung:

Diese Forschungsarbeit soll zur Entwicklung einer neuen Hochleistungs-Röntgentarget-Struktur beitragen. Dazu sollen unterschiedliche Konzepte für Brennbahn und Trägerstruktur verglichen und auf ihre Eignung für diese neue Art der Hochleistungs-Anwendung untersucht werden. Dies beinhaltet die Analyse zum Stand der Technik, die systematische Werkstoffauswahl, die analytische Vorbetrachtung sowie die numerische Berechnung und Auslegung von Brennbahn und Trägerstruktur. Aus allen erzeugten Ergebnissen soll abschließend ein neues Gesamtkonzept erarbeitet werden.

Kennziffer:

Tag der Ausgabe: 22.04.2022

Betreuende/  
Hochschullehrer/in: Prof. Dr.-Ing. Arne Röttger

Wuppertal, den 21.03.2022

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL  
Fakultät für Maschinenbau u. Sicherheitstechnik  
Lehrstuhl für  
Neue Fertigungstechnologien und Werkstoffe  
Bahnhofstr. 15, 42699 Solingen  
Eingangsstempel

  
Unterschrift der/s betreuenden Hochschullehrers/in

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende schriftliche Hausarbeit (Seminararbeit) selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen sind, wurden in jedem Fall unter Angabe der Quellen (einschließlich des World Wide Web und anderer elektronischer Text- und Datensammlungen) und nach den üblichen Regeln wissenschaftlichen Zitierens kenntlich gemacht. Dies gilt auch für beigegebene Zeichnungen, bildliche Darstellungen, Skizzen und dergleichen. Mir ist bewusst, dass wahrheitswidrige Angaben als Täuschungsversuch und damit als Ordnungswidrigkeit behandelt werden.

.....  
Ort, Datum

.....  
Unterschrift

## Abstract

Abstract Microbeam radiation therapy offers great potential to revolutionize cancer therapy. To enable the clinical use of microbeams, new compact devices are needed. The “Line focus x-ray tube” (LFXT) is a promising concept. By introducing the usage of the heat capacity limit, the development of a new x-ray target structure for an LFXT will be realized.

The presented work pursues the question of how to realize an X-ray target structure with an electron beam power load of 1.5 *MW*. For this purpose, different designs and concepts are compared and on the basis of this comparison, a potential solution is developed. Based on this concept, the components of the target are designed. The material selection of the components is carried out with the various Ashby plots, in consideration of specific material requirements. The following dimensioning of the components is based on both analytical calculations and numerical simulations (Ansys). In addition, the well-known problem of carbon diffusion and the associated embrittlement of the focal track is discussed.

The results of the material selection indicate Carbon fiber reinforced Carbon (CFRC) to be the most suitable material for the carrier structure and tungsten-rhenium alloys as the best material for the focal track. The performed calculations and simulations indicate a CFRC-Structure with a diameter of 660 *mm* and a quasi-isotropic laminate is a promising solution. A minimum thickness of 1 *mm* is recommended for the focal track. This constellation should ensure operation with a 1.5 *MW* electron beam and a rotation frequency of 200 *Hz* for at least 1 second. To reduce the carbon diffusion between CFRC and Tungsten common techniques like coating with SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and the use of rhenium-tungsten multilayers are discussed. It can be concluded that the use of rhenium-tungsten multilayers is a promising application. This thesis goes on to discuss whether replacing the tungsten interlayers with tantalum provides additional benefits. The results suggest that tantalum can be an effective diffusion barrier and could increase the lifetime of the focal track.

## Kurzfassung

Die Mikrostrahlentherapie bietet ein großes Potenzial, die Krebstherapie zu revolutionieren. Um Mikrostrahlen klinisch nutzen zu können, werden neue, kompakte Anlagen benötigt. Das Konzept der „Line focus x-ray tube“ (LFXT) ist dabei eines der aussichtsreichsten Konzepte. Durch das erstmalige Nutzen des physikalischen Phänomens des Wärmekapazitätslimits soll die Umsetzung einer neuen Röntgentarget-Struktur für eine LFXT realisiert werden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage, ob und inwieweit eine solche Röntgentarget-Struktur unter der Belastung eines Elektronenstrahls mit einer Leistung von  $1,5\text{ MW}$  realisierbar ist. Zu diesem Zweck werden verschiedene Bauformen und Konzepte verglichen. Auf Basis dieses Vergleiches wird ein Grundkonzept für die Röntgentarget-Struktur erarbeitet, worauf aufbauend die Komponenten der Targetstruktur konzipiert und ausgelegt werden. Die Materialauswahl der Komponenten erfolgt mithilfe verschiedener Ashby-Plots unter der Berücksichtigung spezifischer Materialanforderungen. Die nachfolgende Dimensionierungen der Komponenten beruhen sowohl auf analytischen Berechnungen als auch auf numerischen Simulationen (Ansys). Darüber hinaus wird zusätzlich das bekannte Problem der Kohlenstoffdiffusion und der einhergehenden Versprödung der Brennbahn behandelt.

Der Materialvergleich zeigt, dass der geeignetste Werkstoff für die Trägerstruktur Kohlefaser verstärkter Kohlenstoff (CFC) ist und für die Brennbahn Wolfram-Rheniumlegierungen. Aus den durchgeführten Berechnungen und Simulationen geht hervor, dass eine CFC-Trägerstruktur mit einem Durchmesser von  $660\text{ mm}$  und einem quasi-isotropen Laminataufbau die vielversprechendste Lösung bildet. Für die Brennbahn wird eine minimale Dicke von  $1\text{ mm}$  empfohlen. Diese Konstellation soll den Betrieb mit einem  $1,5\text{ MW}$  Elektronenstrahl und einer Rotationsfrequenz von  $200\text{ Hz}$  für mindestens  $1\text{ Sekunde}$  gewährleisten. Zur Verringerung der Kohlenstoffdiffusion zwischen CFC und Wolfram werden sowohl gängigen Techniken, wie die Beschichtung mit SIC und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , als auch die Verwendung von Rhenium-Wolfram-Multischichten auf ihre Tauglichkeit untersucht. Die Schlussfolgerung lautet, dass die Verwendung von Rhenium-Wolfram-Multischichten die aussichtsvollste Anwendung darstellt. Im Weiteren wird diskutiert, ob das Ersetzen des Wolframs in den Zwischenschichten durch Tantal einen Mehrwert aufweist. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass durch Tantal eine effektive Diffusionsbarriere geschaffen werden kann und damit die Lebenszeit der Brennbahn erhöht werden kann.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Entstehung und Verwendung von Röntgenstrahlung . . . . .	1
1.2 Mikrostrahltherapie . . . . .	3
1.3 Motivation und Zielsetzung . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Stand der Technik: Röntgenröhre . . . . .	5
2.1.1 Bauformen . . . . .	6
2.1.2 Materialien und Schadensbilder . . . . .	8
2.2 Auslegeverfahren . . . . .	11
2.2.1 Auslegung nach Oosterkamp . . . . .	11
2.2.2 Auslegung nach Bartzsch . . . . .	14
2.2.3 Bedeutung . . . . .	15
<b>3 Anforderungen &amp; Konzepterstellung</b>	<b>17</b>
3.1 Anforderungen . . . . .	17
3.2 Konzepte Bauformen . . . . .	18
3.3 Konzept Brennbahn . . . . .	23
3.4 Betrachtung der Ausgangslage . . . . .	24
<b>4 Auslegungsstruktur und Systemanalyse</b>	<b>25</b>
4.1 Systembetrachtung . . . . .	25
4.1.1 Temperaturanstieg . . . . .	25
4.1.2 Thermische Spannung . . . . .	26
4.1.3 Mechanische Spannung . . . . .	27
4.1.4 Abkühlzeit . . . . .	28

---

4.1.5	Diffusion . . . . .	29
4.2	Zusammenfassung Systemanalyse . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Trägerstruktur</b>	<b>31</b>
5.1	Materialauswahl . . . . .	31
5.2	Analytische Betrachtung . . . . .	35
5.2.1	Scheibe konstanter Dicke . . . . .	36
5.2.2	Scheibe gleicher Festigkeit . . . . .	38
5.2.3	Zwischen Fazit . . . . .	40
5.3	FE-Simulation . . . . .	42
5.3.1	Material Modell . . . . .	42
5.3.2	Definition Randbedingungen . . . . .	44
5.3.3	Auswertungskriterium . . . . .	44
5.3.4	Ergebnisse FE-Simulation . . . . .	45
5.4	Designerweiterung . . . . .	46
5.5	Anmerkung . . . . .	47
5.6	Zusammenfassung Trägerstruktur . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Brennbahn</b>	<b>50</b>
6.1	Materialauswahl Brennbahn . . . . .	50
6.2	Analytische Betrachtung . . . . .	54
6.3	FE-Simulation Brennbahn . . . . .	57
6.3.1	Materialmodell Wolfram . . . . .	57
6.3.2	Brennfleckmodellierung . . . . .	59
6.3.3	Auslegung Brennbahndicke . . . . .	62
6.3.4	Analyse Brennbahn . . . . .	65
6.3.5	Variation des Betriebsmodus . . . . .	71
6.4	Zusammenfassung Brennbahn . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Zwischenschicht</b>	<b>74</b>
7.1	Keramik Zwischenschicht . . . . .	75
7.2	Multischicht-System . . . . .	76
7.3	Zusammenfassung Zwischenschicht . . . . .	83
<b>8</b>	<b>Ableitung eines Versuchsplans</b>	<b>84</b>
8.1	Versuch 1: Thermoschockverhalten . . . . .	85
8.2	Versuch 2: Verbundcharakterisierung . . . . .	86

---

<b>9 Fazit und Ausblick</b>	<b>88</b>
<b>A Datenblätter</b>	<b>i</b>
<b>B APDL-Skript</b>	<b>x</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xx</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xxi</b>

## Symbolverzeichnis

$\alpha$	Ausdehnungskoeffizient	$K^{-1}$
$A$	Fläche	$m^2$
$b$	Brennfleckbreite	$m$
$C$	Spezifische Wärmekapazität	$J/kgK$
$d$	Elektroneneindringtiefe	$m$
$\eta$	Röntgenerzeugungswirkungsgrad	
$E$	Elastizitätsmodul	$MPa$
$f$	Drehfrequenz	$Hz$
$G$	Schubmodul	$MPa$
$I_{el}$	Elektronenstrom	$A$
$l$	Brennflecklänge	$m$
$l_d$	Wärmediffusionslänge	$m$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeits koeffizient	$W/mK$
$m$	Masse	$kg/m^3$
$\nu$	Querkontaktionszahl	
$\omega$	winkelgeschwindigkeit	$rad/s$
$P$	Leistung	$W$
$P_{el}$	Elektronenstrahlleistung	$W$
$Q$	Energie	$J$
$r_a$	Aussenradius der Anode	$m$
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$
$S$	Sicherheitsfaktor	
$\sigma$	Spannung	$MPa$
$\sigma_{vM}$	vonMises Vergleichsspannung	$MPa$
$\sigma_x$	Normalspannung in x-Richtung	$MPa$
$\sigma_y$	Normalspannung in y-Richtung	$MPa$
$\sigma_z$	Normalspannung in z-Richtung	$MPa$

---

$\sigma_{zul}$	Zulässige Spannung	<i>MPa</i>
$T$	Temperatur	$^{\circ}K, ^{\circ}C$
$t$	Zeit	<i>s</i>
$\Delta T$	Differenz Temperatur	$^{\circ}K, ^{\circ}C$
$\Delta t$	Differenz Zeit	<i>s</i>
$T_{max}$	Maximal Temperatur	$^{\circ}K, ^{\circ}C$
$\tau_{xy}$	Schubspannung in xy-Ebene	<i>MPa</i>
$\tau_{xz}$	Schubspannung in xz-Ebene	<i>MPa</i>
$\tau_{yz}$	Schubspannung in yz-Ebene	<i>MPa</i>
$U_{BE}$	Beschleunigungsspannung	<i>V</i>
$v$	Geschwindigkeit	<i>m/s</i>
$y$	Dicke der Scheibe	<i>m</i>
$y_i$	Dicke der Scheibenwurzel	<i>m</i>
$y_{ra}$	Dicke der Scheibe am Aussenradius	<i>m</i>

## Abkürzungsverzeichnis

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
APDL	ANSYS Parametric Design Language
C	Kohlenstoff
CFC / CFRC	Carbon fiber reinforced carbon
CT	Computertomographie
CVD	Chemical vapour deposition
EPMA	Electron probe microanalysis
LFXT	Line focus X-Ray tube
LINAC	Linear accelerator
Mo	Molybdän
MRT	Microbeam Radiation Therapie
SEM	Scanning elektron microscope
SiC	Siliciumcarbid
Ta	Tantal
Ti	Titan
TZM	Titan-Zirkonium -Molybdän Legierung
VPS	Vacuum plasma spraying
W	Wolfram
WC	Wolframcarbid
Zr	Zirkonium

# 1. Einleitung

Im Jahr 2018 wurden ca. 498.000 neue Fälle von Krebs in Deutschland diagnostiziert. Für das Jahr 2022 sagen Fachleute einen Anstieg auf 510.000 Neuerkrankungen voraus [1]. Allein oder in Kombination mit Chirurgie und/ oder Chemotherapie wird die Strahlentherapie zu der Bekämpfung von Krebsleiden eingesetzt. Die Strahlentherapie bezeichnet dabei die Nutzung von hochenergetischen Strahlungen oder radioaktiven Materialien zur Schädigung und Zerstörung von Tumorzellen. Einen Teilbereich der Strahlentherapie bildet die Röntgenstrahlung, diese ist die am häufigsten eingesetzte Bestrahlungsart und findet sowohl bei der Diagnostik als auch bei der eigentlichen Tumorbestrahlung ihre Anwendung.

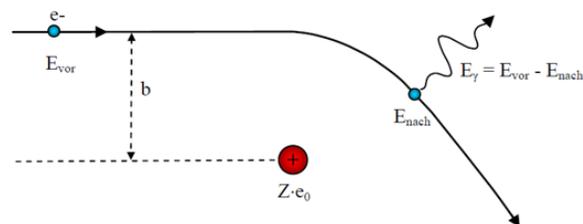
Die Mikrostrahlentherapie ist ein neuer und vielversprechende Ansatz der Röntgenstrahlentherapie. Dieser Ansatz beruht auf hochintensiven, mikrometerbreiten Strahlenbündeln – der sogenannten Microbeam Radiation Therapie (MRT). Für die MRT wird eine Energiedichte benötigt, die so hoch ist, dass nur wenige Materialien standhalten können. Zusätzlich zu dieser hohen Energiedichte ist eine Ultrahochvakuum-Umgebung erforderlich. Beide Punkte machen die Entwicklungsarbeit von neu benötigten Targetstrukturen zu einem komplexen Unterfangen.

Um die Leserinnen und Leser dieser Arbeit in die Thematik der Röntgenstrahlentherapie einzuleiten, wird in den nächsten Abschnitten zunächst auf die physikalischen Hintergründe von Röntgenstrahlen im Allgemeinen und auf die Besonderheiten der Mikrostrahlentherapie eingegangen. Nachfolgend werden Beweggründe und Zielsetzungen dieser Arbeit erläutert.

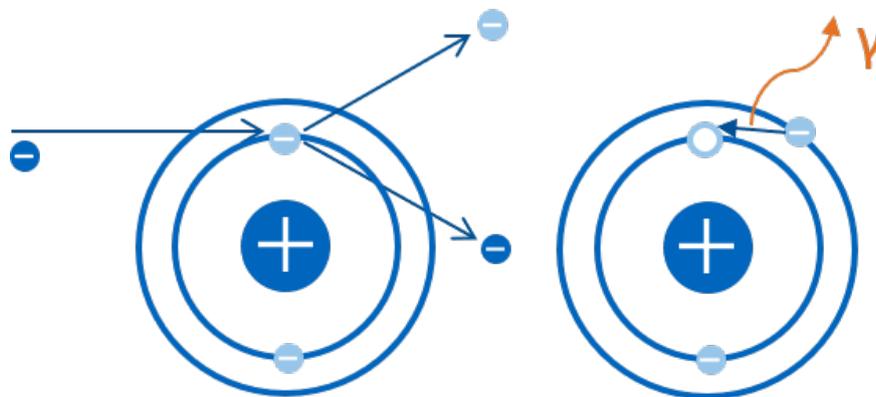
## 1.1. Entstehung und Verwendung von Röntgenstrahlung

In der Medizin gibt es eine Vielzahl an Strahlungsarten, die ihre Verwendung finden. An dieser Stelle wird nur auf die, für diese Arbeit wichtige Photonen-Strahlung eingegangen. Die Photonen-Strahlen, die in der Strahlentherapie genutzt werden, haben im Wesentlichen zwei Arten der Entstehung. Treffen hochenergetische Teilchen (i.d.R. Elektronen) auf eine Targetoberfläche, werden die Teilchen so stark abgebremst, dass Röntgenstrahlung in Form von Bremsstrahlung emittiert wird. Die Form des Strahlungsspektrums und die Strahlungsausbeute ist dabei maßgeblich von der Beschaffenheit und der kinetischen Energie der Teilchen und der Ordnungszahl des Targetmaterials abhängig [2]. Ist die

Bremsstrahlung das Resultat der Abbremsung und Umlenkung der geladenen Teilchen durch das elektrische Feld der Atomkerne (Abbildung: 1.1), so können die Teilchen auch mit den Hüllelektronen der Atome wechselwirken und diese ionisieren. Treffen die hochenergetischen Teilchen auf ein Hüllenelektron, so kann dieses herausgeschossen werden und an dessen Stelle rückt ein Elektron einer höheren Schale nach. Die Differenz der Schalenenergie wird in Form der charakteristischen Strahlung freigesetzt (Abbildung 1.2) [3]. Die effektive Energiemenge, die in Form von Röntgenstrahlung freigesetzt wird, entspricht nur einem Bruchteil der Gesamtenergie. Der Hauptbestandteil der eingebrachten Energie wird in Wärme umgewandelt. Die erzeugte Wärme ist dabei ein ungewolltes Nebenprodukt und muss für die meisten Anwendungen aufwendig abgeleitet werden.



**Abbildung 1.1.:** Entstehung von Bremsstrahlung durch die Interaktion der geladenen Teilchen und dem elektrischem Feld des Atomkerns [3].



**Abbildung 1.2.:** Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung durch die Ionisierung der Anodenatome[3].

Seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen von Wilhelm Conrad Röntgen im Jahr 1895 hat sich um die Röntgenstrahlung ein eigener Industriezweig gebildet und die Nutzung von Röntgenstrahlung ist ein fester Bestandteil der Medizin geworden. Das erste Röntgenbild, das jemals aufgenommen wurde, war die Abbildung einer Hand von Röntgens Frau. Hierzu wurde die Hand seiner Frau für 20 Minuten der Strahlung einer Kreuzschattenröhre ausgesetzt. Bald darauf wurde das Potenzial der Strahlung vieler Orts erkannt und das Verfahren zu Bildgebung weiterentwickelt. Schon wenige Jahre nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung, 1897, wurde durch Leopold Freund die Strahlentherapie als neues

wissenschaftliches Fachgebiet begründet [4]. Seither wird die Strahlung nicht nur für die Bildgebung, sondern auch für therapeutische Anwendungen genutzt. Auch heute wird sich sowohl in der Diagnostik als auch in der Therapie auf das Prinzip der Röntgenstrahlung gestützt, obwohl sich die Technik zum Vergleich stark weiterentwickelt hat.

In der Diagnostik ist die Computertomographie (CT) das Maß der Dinge. Dazu werden aus mehreren Richtungen Aufnahmen gemacht und zu einem dreidimensionalen Bild zusammengesetzt. Computertomographen basieren dabei auf dem Prinzip von mehreren Röntgenröhren, die sich um den Patienten bewegen. Durch CT-Scans lassen sich fast alle diagnostischen Fragestellungen für sämtliche menschlichen Organe beantworten. Daher sind CT-Anlagen die wichtigsten diagnostischen Werkzeuge in der Radiologie [3]. Das Ziel aktueller Entwicklungen ist es, die Bestrahlungszeiten bei gleichbleibender Bildqualität möglichst zu reduzieren, um die Schädigung des Patienten durch die relativ hohe Strahlenexposition zu minimieren.

Für therapeutische Anwendungen ist insbesondere die Verwendung von Linearbeschleunigern (LINAC) zu nennen. Bei dieser können die Krebszellen von außen, ohne dass der Patient geöffnet werden muss, bestrahlt werden. Durch die Beschleunigung auf mehreren  $MeV$  besitzen die Elektronen eine sehr hohe kinetische Energie, wodurch die Elektronen nicht nur auf der Targetoberfläche Strahlung emittieren, sondern im ganzen Target. Den Aufbau eines Linearbeschleunigertargets kann man am besten mit dem einer Stehanode (s. Kapitel 2.1.1 vergleichen. Die dabei erzeugten Dosisraten (Gray pro Sekunde) sind um ein Vielfaches höher als in der Diagnostik. Durch diese hohen Dosisraten kommt es zur Wechselwirkung zwischen Photonen und Materie im Patienten. Dennoch sind die Dosisraten zu niedrig um Tumore schnell zu bekämpfen, sodass mehrere Sitzungen von Nöten sind, aber zeitgleich zu schädlich für das umliegende gesunde Gewebe. Aktuelle Forschungsarbeiten drehen sich hauptsächlich darum, die Schädigung des umliegenden Gewebes zu verringern.

## 1.2. Mikrostrahltherapie

Die erstmals 1992 eingesetzte Mikrostrahltherapie zeigt in diversen vorklinischen Studien ein hohes Potenzial, um die Schädigung von gesundem Gewebe zu reduzieren und könnte die Lebensqualität der Patienten nach der Bestrahlung deutlich verbessern. [5][6] Bei der Mikrostrahltherapie werden im Gegensatz zu herkömmlichen Strahlentherapien keine homogene Strahlenfelder erzeugt, sondern mehrere Zehntel-Mikrometerbreite Strahlen. Deren Abstände zueinander betragen mehreren hundert Mikrometer. Die maximalen Dosen (peak dose) innerhalb der Strahlen erreichen dabei enorme Werte, wobei die Strahlung in den Zwischenräumen (valley dose) unterhalb der Toleranzgrenze für Gewebeschädigung bleibt. [5]. Damit die Strahlung nicht zu weit in die Zwischenräume austreut oder durch z.B. Atembewegungen des Patienten verrutscht, darf die Bestrahlungszeit nur wenige Sekunden be-

tragen. Zur Erzeugung von Mikrostrahlen mit maximalen Dosen von über 100 Gy/s sind aktuell nur die großen Synchrotrons der dritten Generation fähig. Zum heutigen Zeitpunkt konnte die Mikrostrahlentherapie mangels alternativen kompakten Strahlenanlagen nicht über die präklinische Phase hinausschreiten und die Stärken dieses Verfahrens bleiben bisher ungenutzt[7][6].

### 1.3. Motivation und Zielsetzung

Die Mikrostrahlentherapie zeigt vor allem in Bezug auf die Bestrahlung von kritischen Organen wie Lunge und Gehirn ein erhebliches Potenzial [8][7]. Derzeit können die benötigten Dosisraten nur in den großen Synchrotrons wie z.B. in Grenoble, Frankreich, erzeugt werden. Hierbei handelt es sich um große und teure Anlagen mit Durchmessern von mehr als 100 Metern, was eine breite Anwendung in der Medizin und Physik unpraktikabel macht / verhindert, sodass es sich bei den meisten Anwendungen nur um vorklinische Studien handelt.

Um aber dessen Potenzial nutzbar zu machen, müssen neue kompaktere Anlagen entwickelt werden. Schon 2016 gelang es Mikrostrahlen mit herkömmlichen Röntgenröhren zu erzeugen[9]. Jene Anlage konnte aber lediglich 300 mGy/s erzeugen. Ein neuer Ansatz, aufbauend auf diesen Resultaten, Mikrostrahlen auf klinischer Ebene zu erzeugen, ist die Entwicklung von Linienfokus Röntgenröhren (line focus x-ray tubes (LFXTs))[6]. Solche machen sich das 2017 erarbeitete physikalische Phänomen des Wärmekapazitätslimits [6] zunutze. Erste Prototypen, die die generelle Umsetzbarkeit von LFXTS und die das Wärmekapazitätslimit bestätigen, konnten bereits umgesetzt werden [10] [11].

Diese Arbeit soll zur Entwicklung einer neuen Röntgentarget-Struktur für die Anwendung in einer Linienfokus Röntgenröhre, die eine Strahlendosis von  $>100 \text{ Gy/s}$  ermöglichen kann, beitragen. Dazu sollen unterschiedliche Konzepte für Brennbahn und Trägerstruktur verglichen und auf ihre Eignung für solch neue Art der Anwendung untersucht werden. Dies beinhaltet die Analyse zum Stand der Technik, die systematische Werkstoffauswahl, die analytische sowie die numerische Berechnung und Auslegung von Brennbahn und Trägerstruktur. Aus allen erzeugten Ergebnissen soll abschließend ein neues Gesamtkonzept erarbeitet werden.

## 2. Grundlagen

Im einleitenden Kapitel wurde auf die physikalischen Grundlagen der Röntgenstrahlung und deren Anwendungsgebiete eingegangen. 2016 wurde nachgewiesen, dass es möglich ist, mit Röntgenröhren Mikrostrahlen zu erzeugen [9]. Dieses Kapitel setzt sich nun mit den technischen Grundlagen der Röntgenröhren, wie Bauformen, deren üblichen Schadensfällen sowie mit den heute verwendeten Auslegeverfahren auseinander.

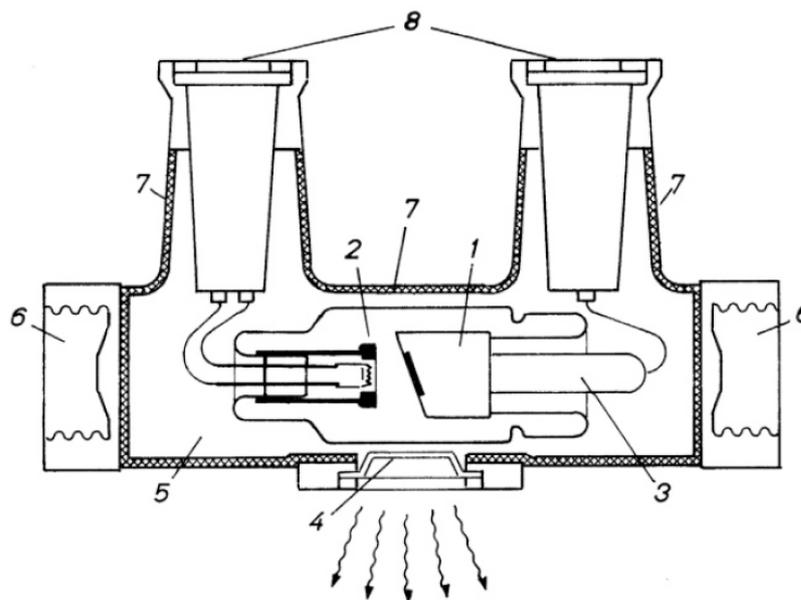
### 2.1. Stand der Technik: Röntgenröhre

Seit dem 19. Jh. und den ersten Röntgenröhren haben sich viele unterschiedliche Bauformen entwickelt. Dabei haben alle den prinzipiell gleichen Aufbau. In der Regel bestehen sie aus einem evakuierten Gehäuse und zwei Elektroden, der Kathode und der Anode. Dabei wird die Anode als Target bezeichnet. Durch das starke Erhitzen der Kathode werden Elektronen emittiert. Durch das zwischen Kathode und Anode bestehende Potenzial werden die Elektronen in Richtung Anode beschleunigt. Hinter der Kathode sitzt eine Vorrichtung, die die Elektronen fokussiert und auf die Anode lenkt. Den Punkt, in dem die Elektronen auftreffen, bezeichnet man als Brennfleck. Durch das Auftreffen auf dem Brennfleck werden Bremsstrahlung und charakteristische Strahlungen erzeugt. Durch ein Fenster kann die Strahlung dem Gehäuse entweichen. Da ca. 99 % der Energie in Wärme umgewandelt werden, müssen alle Komponenten dementsprechend hitzebeständig sein [2]. Heute werden Röntgenröhren für viele verschiedenen Anwendungen genutzt, viele von denen liegen auch außerhalb der Medizin. So werden Röntgenröhren an Flughäfen zur Passagier- und Gepäck-Durchsuchung eingesetzt oder im Qualitätsmanagement in der Fertigung um Fehler im Material feststellen zu können. Trotz vieler unterschiedlicher Anwendungsmöglichkeiten haben sich heute auf dem Markt hauptsächlich drei Arten von Röntgenröhren etabliert. Die Stehanoden-, Drehanoden- und Drehkolbenanoden-Röntgenröhren.

### 2.1.1. Bauformen

#### Stehanode-Röntgenröhre

Die Stehanoden-Röntgenröhre ist von ihrer Bauart am simpelsten. Sowohl die Kathode, die Elektronen emittiert als auch die Anode (Target), auf der die Elektronen auftreffen, sind feststehend. Dabei wird meistens ein Wolframtarget in ein Material, welches sehr gut Wärme leiten kann, in der Regel Kupfer, eingelassen. Der Kupferkörper hat die Aufgabe, die Verlustwärme vom Target schnellstmöglich abzuführen, damit es nicht zur Schmelzung kommt. Sollte dies nicht ausreichen, kann der Kühlkörper/ können die Kühlkörper mittels Öl oder Wasser aktiv abgekühlt werden [2][3]. Stehanoden werden hauptsächlich für Anwendungen mit niedrigen Strahlungsleistungen genutzt. Dadurch das diese Bauform sehr kompakt gestaltet werden kann, können Geräte gebaut werden, die zur Anwendung in den Patienten eingeführt werden können wie beispielsweise in der Zahnmedizin oder der Gynäkologie. Die Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau einer Stehanoden-Röntgenröhre.

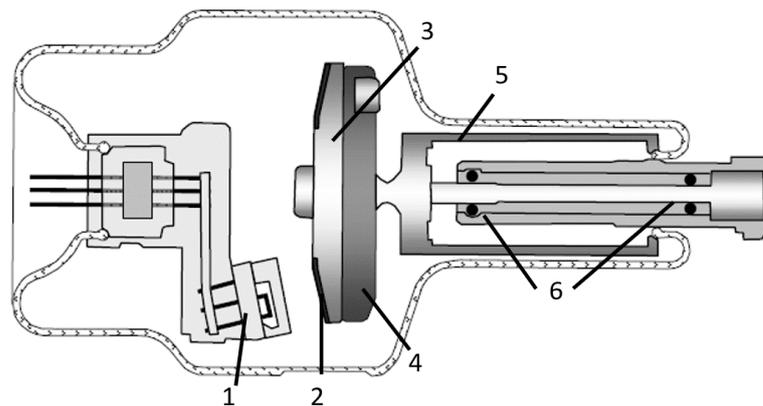


**Abbildung 2.1.:** Schematischer Aufbau einer Stehanoden-Röntgenröhre mit der Bezeichnung aller wichtigen Komponenten. 1: Anode mit eingepresster Wolframscheibe, 2: Glühkathode mit Wehneltzylinder, 3: Anodenschaft, 4: Austrittsfenster, 5: Kühlmittel, 6: Federbeläge zum thermischen Ausdehnungsausgleich, 7: Bleiauskleidung für den Strahlenschutz, 8: Kabelzuführung [2].

#### Drehanoden-Röntgenröhre

Die Drehanoden-Röntgenröhre haben sich trotz ihrem hohen Preises und ihrem technisch hohen Aufwand als Standardbauform etabliert. Schon 1929 stellte Philips die erste Röntgenröhre mit einer rotierenden Anode vor[12]. Durch die Rotation der Anode verteilt sich die Wärme nicht mehr nur auf einen Punkt, sondern wird auf die ganze Struktur verteilt. Bauartbedingt sind die Drehanoden nur

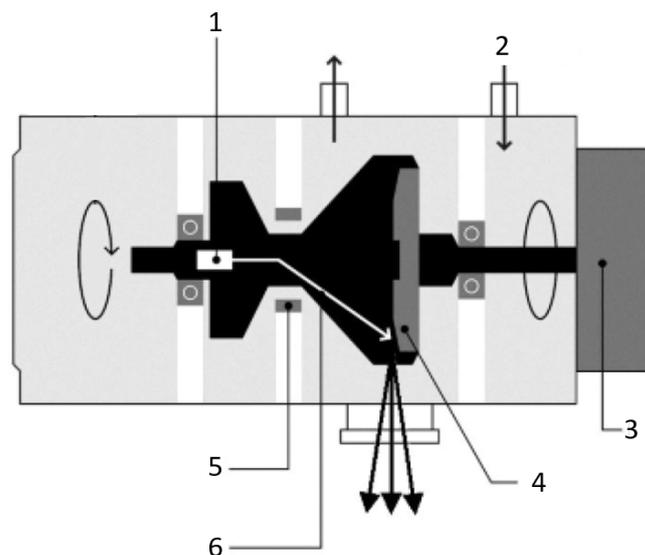
bzw. zum größten Teil durch Strahlungskühlung zu kühlen, da die Anoden nicht mit einem Kühlmedium in Kontakt gebracht werden können [2]. Ihr Hauptbestandteil ist ein Anodenteller auf dem eine Brennbahn aufgetragen ist und der in einer Hochvakuumumgebung rotiert (Abbildung 2.2). Wurden früher Drehanoden aus einem Material geschmiedet (i.d.R. Wolfram), so werden moderne Anoden in Verbundbauweise gefertigt. Durch die Anforderung, sehr schnell zu rotieren, steigen die mechanischen Spannungen innerhalb der Anode mit wachsendem Durchmesser. Die derzeit üblichen Anoden haben einen Durchmesser von 90-250 mm [13][14][15].



**Abbildung 2.2.:** Schematischer Aufbau einer Drehanoden-Röntgenröhre mit der Bezeichnung aller wichtigen Komponenten. 1: Kathode, 2: Brennbahn, 3: Target-Struktur, 4: Graphit-Wärmespeicher, 5: Rotor, 6: Lager [2].

### Drehkolben-Röntgenröhre

Die Drehkolben-Röntgenröhre ist die neueste der drei Bauarten (erstmalig 2003 vorgestellt) und stellt ein grundlegendes Umdenken bei dem Design von Röntgenröhren dar. Bei dieser Bauart wird das Target stoffschlüssig mit dem Vakuumgehäuse verbunden (Abbildung 2.3). Anders als bei der Drehanode dreht sich nicht nur die Anode in einem Kühlmedium, sondern das gesamte Gehäuse. So ist es möglich, die Anode aktiv zu kühlen. Die Elektronenquelle sitzt in der Rotationsachse und der entstehende Elektronenstrahl wird mithilfe von Umlenkspulen auf den Rand des Anodenkolbens abgelenkt. Der Vorteil dieser Bauart liegt darin, dass die Anode aktiv gekühlt werden kann und dass die maximale Kühlleistung von einem externen Wärmetauscher abhängt. [16][3][2]

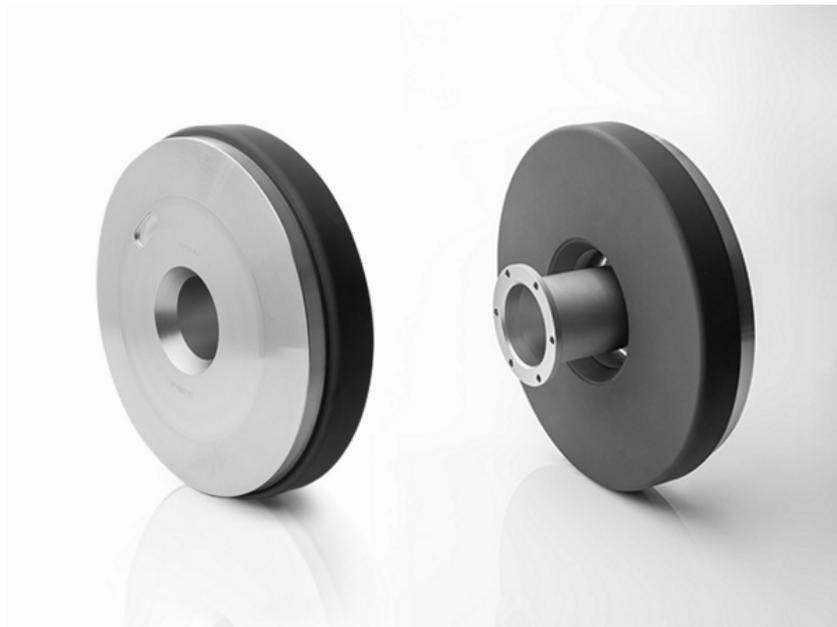


**Abbildung 2.3.:** Schematischer Aufbau einer Drehanoden-Röntgenröhre mit der Bezeichnung aller wichtigen Komponenten. 1: Kathode, 2: Öl-Kühlung, 3: Motor, 4: Anode, 5: Umlenkspulen, 6: Elektronenstrahl [2].

### 2.1.2. Materialien und Schadensbilder

Moderne Anoden unterliegen sehr extremen Bedingungen, oft betragen die Drehzahlen der sich drehenden Anoden über 150 Hz, befinden sich im starken Vakuum (min.  $10^{-5}$  mbar), weisen Brennbahntemperaturen von über 2000 °C auf und müssen Expositionszeiten von mehreren Minuten am Stück und mehrere Einsätze am Tag überstehen. Dazu bestehen die heutigen Hochleistungsanoden aus Kombinationen von geeigneten Materialien. Als Beispiel für eine moderne Anode dient eine Entwicklung der Firma Plansee (Abbildung 2.4). Ihr Teller besteht zumeist aus Molybdän oder aus dessen Legierungen (z.B. TZM). Molybdän weist auch noch unter hohen Temperaturen eine besonders hohe mechanische Festigkeit auf und nur ca. die Hälfte der Dichte von Wolfram. [17][2]. Die eigentliche Brennbahn besteht aus einer Wolframlegierung mit einigen Prozent Rhenium [18][2][15]. Wolfram besitzt eine der höchsten Schmelztemperaturen ( $>3000$  C°), eine hohe Ordnungszahl, die eine gute Strahlungsausbeute indiziert (Abbildung 2.5) und ist im Vergleich zu den Alternativen verhältnismäßig günstig. Durch das Beimischen von Rhenium werden die Brennbahnen deutlich unempfindlicher gegen vorzeitiges Ermüden und die Sprödigkeit wird verringert [19][2][20]. Zur Steigerung der Wärmekapazität der Anode wird ein Körper aus Graphit an der Rückseite angebracht. Dieser verbessert zudem die thermische Emissionsfähigkeit der Anode enorm [15]. Tabelle 2.1 listet die gängigsten Materialien in der Röntgentechnik auf. Trotz der Auswahl spezieller Werkstoffe ist die Einsatzzeit der Anoden begrenzt. Die Brennbahn selbst kann in der Regel zwei Schadensfälle aufweisen. Ist die thermische Belastung der Anode zu hoch, kommt es zu geringfügigem Verdampfen des Wolframs. Dadurch entsteht eine

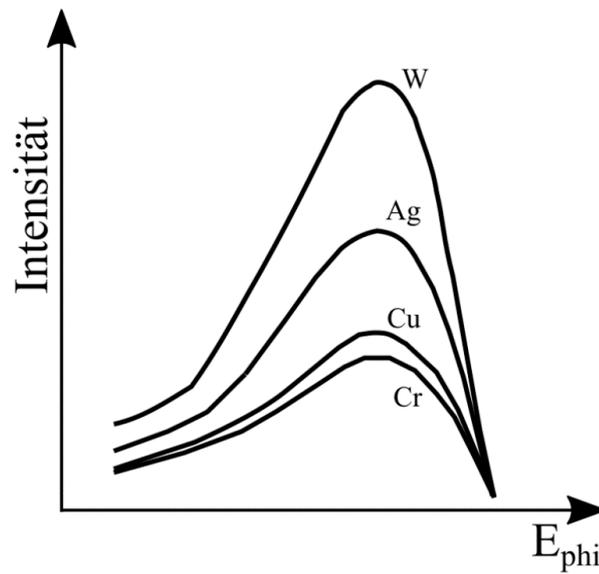
raue Oberfläche auf der Brennbahn, was wiederum die Strahlenausbeute beeinträchtigt. Um einen gleichbleibenden Strahlungs-Output erzielen zu können, muss der Kathodenstrom erhöht werden, was allerdings zu weiteren Verdampfung des Brennbahnmaterials führt. Zudem wird die Brennbahn immer wieder einem starken Thermoschock ausgesetzt, welcher zu Rissbildung führen kann (Abbildung 2.6). Auch der Wärmespeicher aus Graphit kann Problemen verursachen. Oberhalb einer Anodenkerntemperatur von 1350 °C wird die Bildung von Karbiden an der Kontaktfläche gesteigert, was zu Delaminierung und Versagen der Anode führen kann [13]. Die Kohlenstoff-Diffusion sowie die daraus resultierende Karbidbildung ist ein großer Bestandteil aktueller Forschungsarbeiten. Derzeit gibt es verschiedene Bestrebungen, Graphit oder anderen kohlenstoffhaltige Materialien als Teller-Material zu verwenden. Da auch Wolfram ein starker Karbidbildner ist, sollte die Brennbahn nicht direkt auf den Teller angebracht werden [21]. Zur Unterbindung der Kohlenstoff Diffusion gibt es verschiedene Ansätze, welche an späterer Stelle in dieser Arbeit behandelt werden.



**Abbildung 2.4.:** Verbundanode der Firma Plansee. Die Brennbahn besteht aus einer Wolfram/Rhenium-Legierung, die Anode selbst aus TZM (Molybdän-Legierung) und auf der Rückseite ist eine Wärmezwischenspeicher aus Graphit angebracht. Durchmesser: 120 mm [22].

**Tabelle 2.1.:** Auflistung der gängigsten Materialien zur Herstellung von Röntgen-Anoden [2][22]

Material	Ordnungszahl <b>Z</b>	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Schmelzpunkt [C°]	spez. Wärmekapazität [J/kgK]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Graphit	6	1800	3650	710	90
Kupfer	29	8960	1083	386	39,8
Molybdän	42	10280	2620	247	13,8
Tantal	73	16650	2996	141	5,5
Wolfram	74	19300	3390	135	13
Rhenium	75	21000	3180	137	7,1
Platin	78	21450	1769	132	7,1

**Abbildung 2.5.:** Schematische Darstellung des Energiespektrums verschiedener Anodenmaterialien [3].**Abbildung 2.6.:** Rissbild einer Anode aufgrund thermischer Spannungen [2].

## 2.2. Auslegeverfahren

Aufgrund der hohen thermischen Belastungen liegt das Hauptaugenmerk bei der Auslegung von Anoden darauf, dass die Schmelztemperaturen der verwendeten Materialien nicht überschritten werden. 1948 lieferte W. J. Oosterkamp in seiner Arbeit "The Heat Dissipation in the Anode of an x-ray tube"[23] einen analytischen Ansatz, um die thermische Belastung der Brennbahn zu beschreiben, welcher bis heute den Standard zur Auslegung von Anoden darstellt[13]. 2017 beschrieb Stefan Bartzsch in "Line focus x-ray - a new concept to produce high brilliance x-rays" das physikalische Phänomen des Wärmetransports im Wärmekapazitätslimit [6]. Dieses Phänomen wurde mathematisch und simulativ bestätigt, aber bisher nicht experimentell nachgewiesen [10][24]. Das Wärmekapazitätslimit bildet die Basis des in dieser Arbeit verwendeten Auslegeverfahrens. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die beiden Auslegeverfahren beschrieben, gegenübergestellt und erläutert, was dies für zukünftigen Entwicklungen bedeuten kann.

### 2.2.1. Auslegung nach Oosterkamp

Alle heute auf dem Markt bestehenden Anoden wurden nach der von Oosterkamp beschriebenen Temperaturdifferenz  $\Delta T_{max}$ , zwischen der Temperatur im Brennfleckzentrum  $T_B$  und der Grundtemperatur der Anode  $T_{av}$ , ausgelegt [19][3][6]. Die Temperaturdifferenz für Stehanoden ist gegeben durch:

$$\Delta T_{max} = \frac{2P}{A} \sqrt{\frac{t}{\pi \lambda \rho c}} \quad (2.1)$$

wobei  $P$  die Elektronenstrahlleistung,  $A$  die Brennfleckfläche,  $t$  die Bestrahlungszeit,  $\lambda$  die thermische Wärmeleitfähigkeit,  $\rho$  die Dichte und  $c$  die spezifische Wärmekapazität darstellt.

Die Temperaturdifferenz bei sich rotierenden Anoden hängt von der Drehfrequenz ab. Durch die Rotation befindet sich ein Teil der Brennbahn nur für einen Bruchteil der Umlaufzeit innerhalb des Elektronenstrahls. Daher kann man die Bestrahlungszeit  $t$  aus (2.1) mit

$$\Delta t = \frac{b}{2\pi r f} \quad (2.2)$$

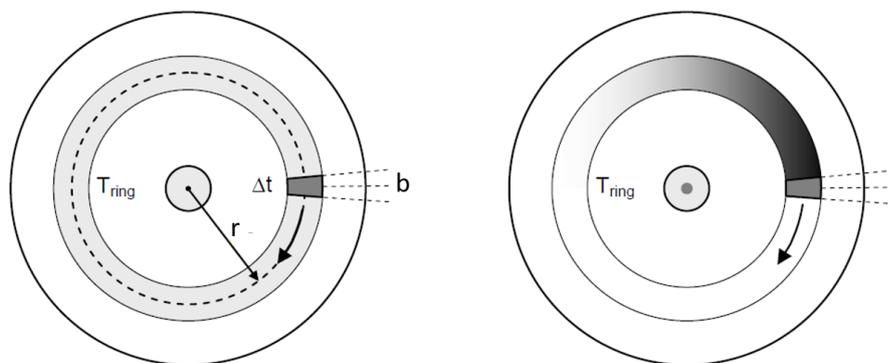
ersetzen, wobei  $b$  die Brennfleckbreite in Rotationsrichtung in  $m$ ,  $r$  den Brennbahnradius in  $m$  und  $f$  die Drehfrequenz in  $s^{-1}$  darstellt. Zusammengefasst folgt aus dem Divisor die Umlaufgeschwindigkeit  $v$ . Damit ergibt sich die Temperaturdifferenz für einen sich bewegenden Brennfleck im Elektronenstrahl.

$$\Delta T_{max} = \frac{2P}{A} \sqrt{\frac{b}{2\pi^2 r f \lambda \rho c}} \quad (2.3)$$

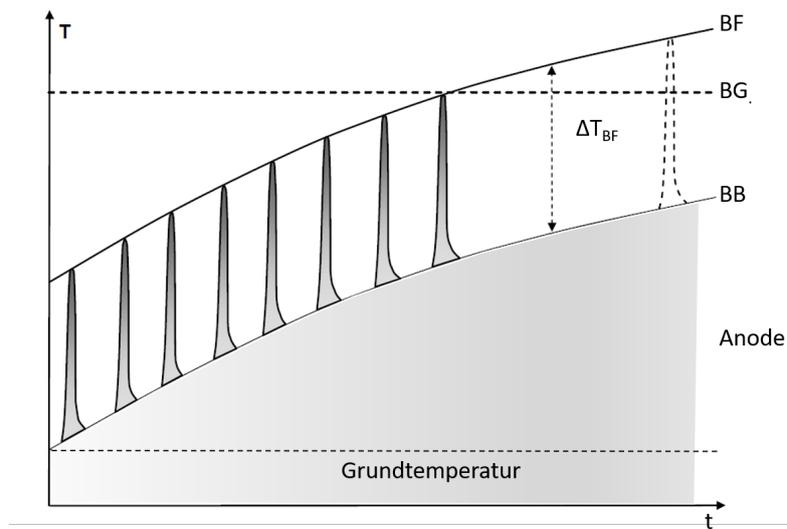
bzw.

$$\Delta T_{max} = \frac{2P}{A} \sqrt{\frac{b}{v\pi\lambda\rho c}} \quad (2.4)$$

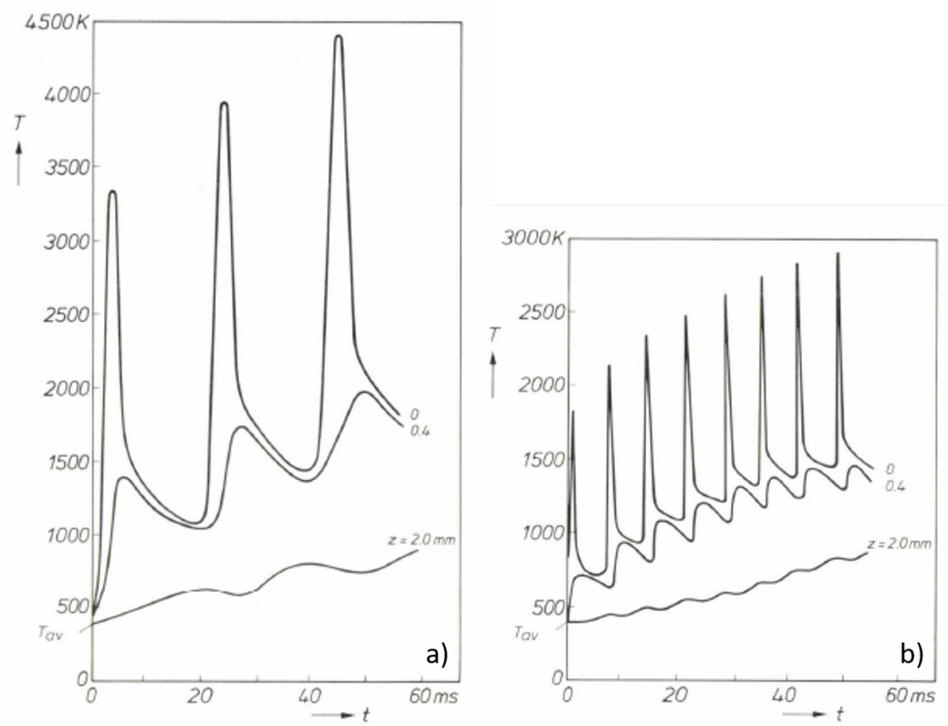
Die erzeugte Wärme wird innerhalb kürzester Zeit in das Material unterhalb des bestrahlten Teilstücks abgeleitet, sodass nach einer Umdrehung die Temperatur des Teilstücks der mittleren Temperatur der Brennbahn entspricht (Abbildung 2.7). Durch die stetige Energiezufuhr heizt sich die Brennbahn kontinuierlich auf. Damit ergibt sich in der Theorie den in Abbildung 2.8 veranschaulichten Verlauf. Wobei die Wärmeverteilung maßgeblich von den verwendeten Materialien abhängt. Steigt die Temperatur über die thermische Belastungsgrenze hinaus, kommt es zu Schäden wie z.B. Abdampfen des Materials. Hat Oosterkamp noch diverse Vereinfachungen annehmen müssen, um eine analytische Lösung erstellen zu können, ist es heute möglich mithilfe der Numerik die Temperaturverteilung deutlich akkurater darzustellen. Es gilt dabei die Betriebs- und Design-Parameter der Anode so zu wählen, dass eine Schädigung ausgeschlossen werden kann. Abbildung 2.9 zeigt die Ergebnisse zweier Simulationen, bei denen die Parameter bis auf die Rotationsfrequenz ( a)=50 Hz b)=150 Hz ) gleich sind. Man kann erkennen, dass die Brennflecktemperatur durch die erhöhte Rotationsgeschwindigkeit deutlich sinkt, während die mittlere Temperatur in einer Tiefe von 2 mm einen vergleichbaren Wert annimmt. Daraus lässt sich schließen, dass sich durch die Wärmeleitung im Material schon in einer geringen Tiefe eine homogene Wärmeverteilung einstellt, welche nicht von der Rotation abhängig ist. Mit dieser Abbildung wird verdeutlicht, wie eine Auslegung durchgeführt wird.



**Abbildung 2.7.:** Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs auf der Brennbahnoberfläche [2].



**Abbildung 2.8.:** Schematischer Temperaturverlauf innerhalb der Anodenstruktur als Funktion über die Betriebsdauer. BF: Temperaturverlauf Brennfleck, BB: Temperaturverlauf Brennbahn, BG: Thermische Belastungsgrenze (In Anlehnung an [2]).



**Abbildung 2.9.:** Ergebnisse einer Simulation auf Basis der Oosterkamp-Formel. a) zeigt die Temperaturverteilung für eine Rotation mit 50 Hz und b) für 150 Hz [15].

### 2.2.2. Auslegung nach Bartzsch

Auch bei der Auslegung nach Bartzsch ist der Temperaturanstieg innerhalb des Brennflecks das treibende Kriterium. Die Temperaturdifferenz  $\Delta T_{max}$  wird jedoch anders berechnet. Die Berechnung der Temperaturdifferenz nach Oosterkamp nimmt an, dass die gesamte Energieumwandlung von kinetischer zu thermischer Energie auf der Oberfläche der Brennbahn geschieht, das Eindringen von Elektronen in die Brennbahn – und die damit einhergehende Wärmeerzeugung in der Tiefe – wird vernachlässigt [6]. Diese Vernachlässigung ist nur gültig, solange die Wärmediffusionslänge  $l_d$  während der Expositionszeit  $\Delta t$ ,

$$l_d = 2\sqrt{\frac{\lambda\Delta t}{\rho c}} \quad (2.5)$$

$\lambda$  : Wärmeleitfähigkeit,  $\Delta t$  : Expositionszeit,  $\rho$  : Dichte,  $c$  : Wärmekapazität

deutlich größer als die Elektroneneindringtiefe  $l_e$  ist. Jedoch steigt die Elektroneneindringtiefe mit steigender Elektronenbeschleunigungsspannung. Ist die Elektroneneindringtiefe deutlich größer als die Wärmediffusionstiefe, ist die Aufheizung des Brennflecks nur noch von der Wärmekapazität limitiert [6]. Nach der Grundgleichung der Wärmelehre:

$$Q = \rho V c \Delta T \quad (2.6)$$

$$\text{bzw. } P \Delta t = \rho V c \Delta T \quad (2.7)$$

$\Delta t$  : Expositionszeit,  $\rho$  : Dichte,  $c$  : Wärmekapazität  $P$  : Leistung,  $Q$  : Energie,  $V$  : Volumen

erhitzt sich ein Volumen  $V$  unter dem Einwirken einer Energie  $Q$  um eine Temperaturdifferenz von  $\Delta T$ . Wird  $\Delta t$  wie schon in Gleichung 2.2 ersetzt und das Volumen mit den Längen  $b$  (Brennfleckbreite in Bewegungsrichtung),  $l$  (Brennfleckbreite quer zu Bewegungsrichtung) und  $d$  (Elektroneneindringtiefe) erhält man folgende Gleichung.

$$P \frac{b}{v} = \rho l b d c \Delta T \quad (2.8)$$

Durch das Kürzen von  $b$  und das Umstellen nach  $\Delta T$  erhält man die Temperaturdifferenz nach Bartzsch.

$$\Delta T = \frac{P}{\rho c l d v} \quad (2.9)$$

Durch das Wegfallen der Brennfleckbreite  $b$  kann der Brennfleck theoretisch unendlich stark in der Bewegungsrichtung fokussiert werden, ohne dass die Temperatur davon beeinflusst wird.

Wie schon bei dem Auslegeverfahren nach Oosterkamp kann diese Gleichung genutzt werden, um die Temperaturverteilung in Folge des Einwirkens eines Elektronenstrahls zu berechnen.

### 2.2.3. Bedeutung

Der Effekt des Wärmekapazitätslimits kann maßgeblich zur Neubetrachtung der Entwicklung von Röntgenanoden beitragen. Die Erkenntnis, dass Elektronen mit einer hohen kinetischen Energie in das Target eindringen, ist nicht neu. Doch durch die Betrachtung dieser Eindringtiefe in der Berechnung der Temperaturdifferenz zeigt sich ein enormes Potenzial. Da die Elektronenstrahlleistung  $P_{el}$  mit

$$P_{el} = I_{el} \cdot U_{Be} \quad (2.10)$$

$P_{el}$  : Elektronenstrahlleistung,  $I_{el}$  : Elektronenstrom,  $U_{Be}$  : Beschleunigungsspannung

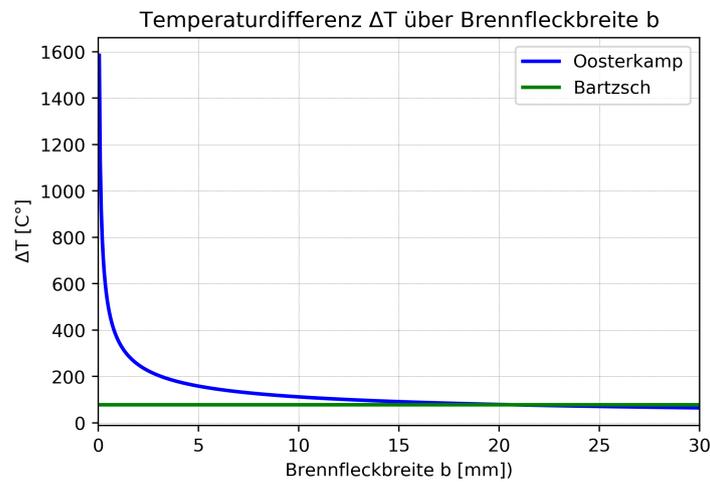
gegeben ist und die kinetische Energie der Elektronen ebenfalls mit der Beschleunigungsspannung einhergeht (Gleichung 2.2.3), kann mithilfe dieser sowohl die Leistung als auch die Eindringtiefe der Elektronen gesteuert werden. Tabelle 2.2 zeigt die Eindringtiefe von Elektronen in Wolfram in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung.

**Tabelle 2.2.:** Eindringtiefer  $d$  der Elektronen in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung [6].

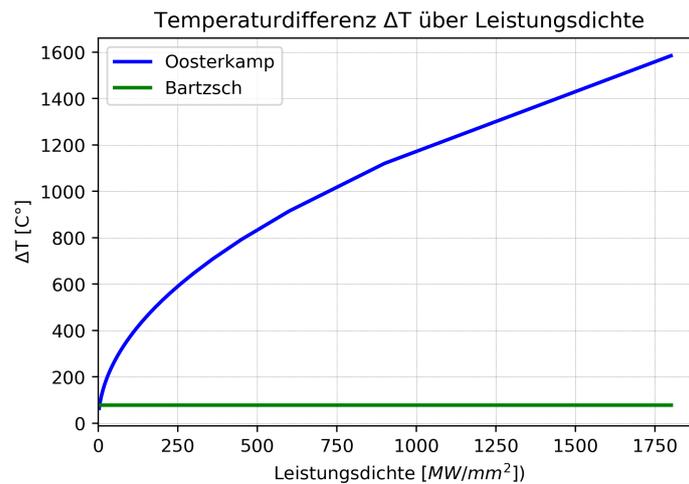
$U_{Be}[kV]$	20	50	100	200	500	1000
$d[\mu m]$	$(0,32 \pm 0,04)$	$(1,28 \pm 0,02)$	$(4,00 \pm 0,3)$	$(12,4 \pm 0,5)$	$(43,7 \pm 0,5)$	$(107 \pm 1)$

Wie zuvor beschrieben ist die Temperaturdifferenz nach Barsch nicht mehr von der Brennfleckbreite  $b$  abhängig. Das heißt durch die Fokussierung in Bewegungsrichtung nimmt die Leistungsdichte ( $W/m^2$ ) zu, während die Temperaturdifferenz konstant bleibt. Was dies für die Entwicklung von Röntgenanoden bedeutet, kann Abbildung 2.10 entnommen werden. Über viele Jahrzehnte wurde damit gerechnet, dass die Temperaturdifferenz extreme Werte annimmt, wenn die Leistungsdichte aufgrund eines schmaler werdenden Brennflecks steigt. Dies kann der Grund dafür sein, dass bis heute noch nie in Betracht gezogen wurde, den Brennfleck weiter als nötig zu fokussieren. Heute kann aber gesagt werden, dass ein unendlich schmaler bzw. ein linienförmiger Brennfleck, unter Einhaltung der Bedingung  $l_e \gg l_d$ , sich nicht negativ auf die Temperaturdifferenz auswirkt. Mit dieser Erkenntnis sind Linienfokusröhren

in der Zukunft in der Lage deutlich höhere Leistungen abrufen zu können und die Strahlentherapie zu revolutionieren.



(a)



(b)

**Abbildung 2.10.:** Vergleich der berechneten Temperaturdifferenzen nach Oosterkamp und Bartzsch. a) zeigt die Temperaturdifferenz als Funktion über die Brennfleckbreite  $b$ , b) die Abhängigkeit über die steigende Leistungsdichte. Die Berechnungen wurden für eine Röntgenröhre mit den folgenden Parametern durchgeführt  $P : 90 \text{ kW}$ ,  $v : 200 \text{ m/s}$  Brennfleckgeometrie: ( $l : 30 \text{ mm}$ ,  $d : 70 \text{ }\mu\text{m}$ )(In Anlehnung an [11]).

## 3. Anforderungen & Konzepterstellung

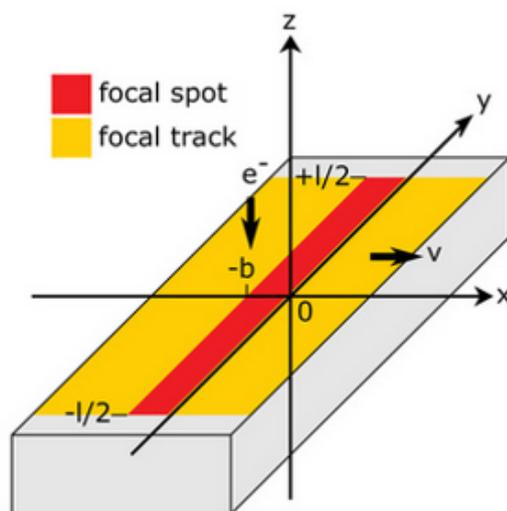
Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die essentiellen Grundlagen erarbeitet wurden, befasst sich dieses Kapitel mit der Erstellung eines grundlegenden Konzeptes für die Anode einer Linienfokus-Röntgenröhre. Dazu werden zunächst alle gegebenen Anforderungen aufgelistet und erläutert. Daran anschließend werden verschiedenen Bauform-Konzepte anhand der Anforderungen und zusätzlich erarbeiteten Kriterien bewertet. Schließlich werden verschiedene Konzepte bezüglich der Brennbahn aufgestellt und miteinander verglichen. Ziel ist es, aufgrund dieser Bewertungen das Konzept zu finden, das sich am besten für den Einsatz in einem Linienfokus-Röntgenröhren-Prototyp eignet.

### 3.1. Anforderungen

Die wichtigste Anforderung ist die Strahlendosis von  $200 \text{ Gy/s}$ , die mindestens für Sekunde lang erbracht werden soll [10] [11]. Um dies zu ermöglichen, soll ein Elektronenstrahl mit einer Leistung von  $1,5 \text{ MW}$  verwendet werden. Die Leistung des Elektronenstrahls wird unter anderem durch eine Beschleunigungsspannung von  $600 \text{ kV}$  erzeugt, welche zur Folge hat, dass die Elektronen bis zu  $100 \mu\text{m}$  in die Anode eindringen können [10]. Um sicherzustellen, dass der Elektronenstrahl verlustfrei das Target erreichen kann, wird eine Ultrahochvakuum-Umgebung von mindestens  $10^{-5} \text{ Pa}$  gefordert. Dies hat zur Folge, dass z.B. Kunststoffe aufgrund von Ausgasung nicht als Werkstoffe geeignet sind. Da der Effekt des Wärmekapazitätslimits genutzt werden soll, ist die Brennfleckgeometrie mit der Breite  $b$  in Bewegungsrichtung von  $30 \mu\text{m}$  und der Breite  $l$  quer zur Bewegungsrichtung von  $30 \text{ mm}$  vorgegeben. Die Abbildung 3.1 verdeutlicht die Geometrie des Brennflecks und definiert ein einheitliches Koordinatensystem. Hinzu kommen Anforderungen an Bauraum Antrieb und Gewicht. Die Anode soll innerhalb eines Bauraums von  $1 \text{ m}$  und mit einem maximalen Gewicht von  $20 \text{ kg}$  realisiert werden. Zudem soll, wenn ein rotierendes Konzept umgesetzt wird, die Drehfrequenz der Anode nicht über  $200 \text{ Hz}$  liegen. Die Anforderungen an Bauraum, Antrieb und Gewicht bilden Wunschziele ab. Die Einhaltung dieser würden die Kombination mit bereits bestehenden Antriebskonzepten erleichtern [11][25]. Die hier beschriebenen Anforderungen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

**Tabelle 3.1.:** Auflistung aller vorgegebenen Anforderungen.

Anforderung	Vorgabe
Elektronenstrahlleistung $P$	1,5 MW
Strahlendosis	200 Gy/s
Einsatzzeit	min. 1 s
Beschleunigungsspannung $U_B$	600 kV
Brennfleckgeometrie	b: 50 $\mu\text{m}$ l: 30 mm
Umgebungsdruck	$10^{-5}$ Pa
Bauraum	$\varnothing \leq 1$ m
Drehfrequenz	$\leq 200$ Hz
Gesamtmasse Anode	$\leq 20$ kg

**Abbildung 3.1.:** Abbildung der Brennfleckgeometrie und Definition eines einheitlichen Koordinatensystems [11].

## 3.2. Konzepte Bauformen

Es gibt diverse Konzepte für die Bauform von Anoden. Um auszuwählen, mit welchem Bauform-Konzept fortgefahren werden soll, wird in diesem Abschnitt eine Bewertungsmatrix aufgestellt. Die zu bewertenden Bauformkonzepte schließen die im Kapitel „Grundlagen“ vorgestellten Konzepte (Steh-, Dreh- und Drehkolbenanode) ein, als auch die Baukonzepte für Band-, Trommel- und Flüssigmetall-Anode. Band- und Trommelanode sind bisher lediglich theoretische Konzepte und Flüssigmetallanoden kommen bisher noch nicht in der Medizin zum Einsatz. Die im Grundlagen-Kapitel noch nicht behandelten Anoden-Bauformen werden nachfolgend kurz erläutert. Im Anschluss daran werden die

Bewertungskriterien vorgestellt.

### Band-Anode:

Die Funktionsweise einer Band-Anode lässt sich am einfachsten mit einer Bandsäge oder einem Bandschleifer vergleichen. Als Target dient ein sich schnell bewegendes Band, das über mindestens zwei Rollen gespannt ist. Abbildung 3.2 zeigt eine vereinfachte Funktionsskizze. Ein Vorteil dieses Konzepts ist, dass durch das Band eine längere Brennbahn realisiert werden kann, als durch eine Drehanode. Dies wiederum führt dazu, dass die Wärme auf mehr Material verteilt werden kann. Nachteilig ist, dass sich das Band durch den Energieeintrag ausdehnen wird. Um eine gleichbleibende Umfangsgeschwindigkeit beibehalten zu können, müssen daher Spannvorrichtungen mit berücksichtigt werden. Generell lässt sich sagen, dass Lager- und Antriebskomplexität höher sind als bei Dreh- und Drehkolben-Anoden.

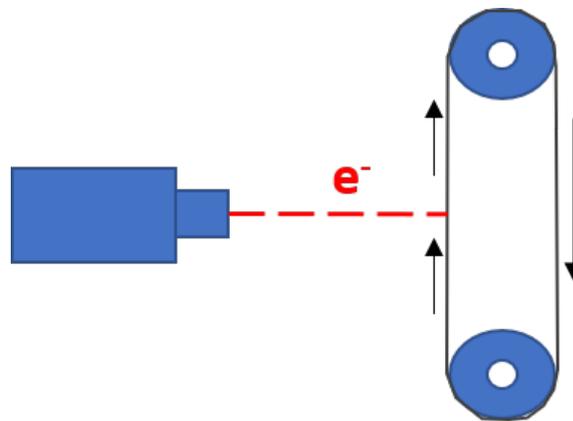


Abbildung 3.2.: Funktionsskizze einer Band-Anode.

### Trommel-Anode:

Abbildung 3.3 zeigt die vereinfachte Funktionsweise der Trommel-Anode. Eine große trommelförmige Struktur dreht sich um dem im Zentrum befindlichen Patienten. Auf der Innenseite der Struktur befindet sich die Brennbahn. Aufgrund des großen Durchmessers der Trommel braucht es keine großen Drehfrequenzen, um hohe Umfangsgeschwindigkeiten zu erzielen [25].

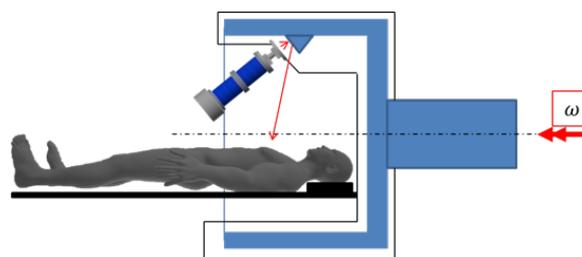


Abbildung 3.3.: Funktionsweise einer Trommelanode[25].

**Flüssigmetall-Anode:** Das Prinzip der Flüssigmetall-Anode beruht nicht wie bei allen anderen Konzepten auf einer Festkörper-Anode, sondern auf einen stetigen Stoffstrom aus einem bei Raumtempera-

tur flüssigen Metall. Der Stoffstrom wird dabei räumlich von der Elektronenquelle getrennt, sodass der Stoffstrom seinen Eigenen geschlossenen Kreislauf besitzt (Abbildung 3.4). Als größte Vorteile sind die hervorragenden Kühlmöglichkeiten des Stoffstroms und der Lebensdauer der Materialien zu nennen.

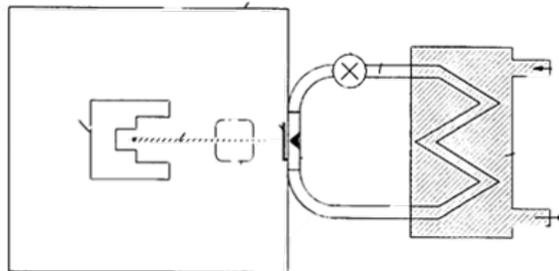


Abbildung 3.4.: Funktionsskizze einer Flüssigmetall-Anode [26].

Aus den gegebenen Anforderungen lassen sich verschiedene Kriterien zur Bewertung der unterschiedlichen Anoden-Bauformen ableiten. Zusätzlich zu den Kriterien aus den technischen Anforderungen, sind auch Kriterien in Hinblick auf den Einsatz in einem Prototyp mit eingeflossen. In Summe werden die Bauform-Konzepte anhand von acht Kriterien mit unterschiedlichen Gewichtungen bewertet. Die Kriterien werden nach dem Muster Sehr wichtig = 10, wichtig = 7,5, neutral = 5, weniger wichtig = 2,5 und unwichtig = 0 gewichtet. Diese Kriterien können wie folgt beschrieben werden:

#### **Kosten:**

Die Kategorie "Kosten" bewertet die generelle Kostenabschätzung für die Konzept-Umsetzung. Für die Umsetzung in einem Prototyp werden die Kosten als weniger wichtig bewertet. (Bewertung: **2,5**)

#### **Bauraum:**

Die Kategorie "Bauraum" bewertet die Abschätzung des benötigten Bauraums. Da es sich um eine Wunschanforderung handelt, die nicht zwingend eingehalten werden soll, wird die Kategorie als weniger wichtig eingestuft. (Bewertung: 2,5)

#### **Gewicht:**

Die Kategorie "Gewicht" bewertet die Abschätzung des Gesamtgewichtes des Konzepts. Da es sich um eine Wunschanforderung handelt, die nicht zwingend eingehalten werden soll, wird die Kategorie als weniger wichtig eingestuft. (Bewertung: **2,5**)

#### **Max. Relativgeschwindigkeit:**

Die Kategorie "Max. Relativgeschwindigkeit" bewertet die abgeschätzte maximale Geschwindigkeit, die mit dem Konzept erreicht werden kann. Der Effekt des Wärmekapazitätslimits steigt proportional mit der Relativgeschwindigkeit. Daher wird eine möglichst hohe Geschwindigkeit angestrebt. (Bewertung: **sehr wichtig**)

(Bewertung: **10**)

#### **Elektronenstrahl Fokussierung:**

Die Kategorie "Elektronenstrahl Fokussierung" bewertet das Potential den Elektronenstrahl zu fokussieren. Um die Qualität der erzeugten Röntgenstrahlung zu garantieren muss eine best mögliche Fokussierbarkeit ermöglicht werden. (Bewertung: **10**)

#### **System Komplexität:**

Die Kategorie "System Komplexität" bewertet Gesichtspunkte wie Anzahl der Einzelkomponenten, Materialverbünde, Antriebs- und Lagerkomplexität. Diese Kategorie ist ein Indikator dafür, wie viel Entwicklungsarbeit in das jeweilige Konzept gesteckt werden muss. (Bewertung: **7,5**)

#### **Wärmemanagement**

Die Kategorie "Wärmemanagement" betrachtet die Aufwandsabschätzung des Kühlsystems und die generelle thermische Beständigkeit des Anodenkonzeptes. (Bewertung: **10**)

#### **Bestehendes Know-how**

Mit der Kategorie "Know-how" werden die Konzepte danach bewertet, inwieweit diese schon Anwendung in der Medizin oder anderen Gebieten gefunden haben und wie die generelle industrielle Wissenslage aussieht, auf die während der Entwicklung zurückgegriffen werden kann. (Bewertung: **7,5**)

Der Quotient aus der Einzelgewichtung und der Summe aller Gewichtungen ergibt die Gewichtung, die zur Bewertung der Bauformen für das Projekt dient. Anschließend werden die Bauformen danach bewertet, inwieweit sie diese Kriterien erfüllen. 10: erfüllt das Kriterium sehr gut, 7,5: erfüllt das Kriterium gut, 5 erfüllt das Kriterium, 2,5: erfüllt das Kriterium mangelhaft, 0: erfüllt das Kriterium ungenügend. Das Produkt aus der Kriteriumsgewichtung und der Bewertung der Erfüllung ergibt einen Wert für die Beurteilung für das jeweilige Konzept. Werden alle Teilbeurteilungen summiert, ergibt es eine Gesamtbeurteilung, anhand welcher der Konzeptvergleich durchgeführt werden kann. Tabelle 3.2 zeigt die Bewertung der einzelnen Bauformen auf. Im direkten Vergleich der Konzepte schneidet die Drehanode am besten ab. Die Drehanode muss sich einzig der Stehanode in mehreren Kategorien

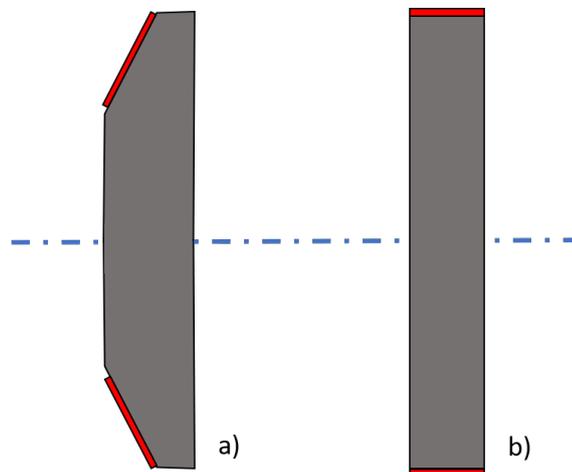
geschlagen geben, da diese lediglich aus einem fest montierten Target besteht. Die Unbeweglichkeit ist aber auch das Ausschlusskriterium der Stehanode, da die Rotation (oder eine andere Bewegungsmöglichkeit) ein essentieller Bestandteil im Prinzip des Wärmekapazitätslimits ist. Drehkolbenanoden haben dank ihres Kühlkonzepts den Vorteil, dass sie deutlich länger im Dauerbetrieb genutzt werden können. Allerdings muss sich wegen dem Kühlkonzept die gesamte Konstruktion bewegen, was zur Folge hat, dass die sich bewegende Masse deutlich größer ist als bei der Drehanode. So werden Antriebs- und Lagerumsetzung erheblich aufwendiger. Wegen der angestrebten Betriebszeit von wenigen Sekunden wiegt der Vorteil der Dauerbelastbarkeit weniger als der Nachteil der höheren Masse. Der größte Nachteil der Drehkolbenanode besteht jedoch darin, dass der Elektronenstrahl nach der Fokussierung innerhalb des Kolbens nochmals umgelenkt werden muss, wodurch der Strahl wieder an Fokussierung verliert. Auch die anderen Konzepte – Trommel-, Band- und Flüssigmetallanode – haben keinen nennenswerten Vorteil gegenüber der Drehanode, die ein den höheren Entwicklungsaufwand rechtfertigen würden. Aufgrund der durchgeführten Bewertung der verschiedenen Bauform-Konzepte für ihre Eignung in der Entwicklung einer Linienfokus-Röntgenröhre fällt die Entscheidung auf die Drehanode.

**Tabelle 3.2.:** Bewertung verschiedener Anodenkonzepten anhand von 8 Kategorien (grün: bestes Konzept, gelb: zweitbestes Konzept, rot: schlechtestes Konzept).

	Kosten	Bauraum	Gewicht	Max. Relativgeschwindigkeit	Elektronenstrahl Fokussierung	System Komplexität	Wärmemanagement	Bestehendes Know-how	Summe
Bewertung	2,5	2,5	2,5	10	10	7,5	10	7,5	52,5
Gewichtung	5%	5%	5%	19%	19%	14%	19%	14%	100%
Stehanode	10	10	10	0	7,5	7,5	2,5	10	5,8
Drehanode	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	5	7,5	7,02
Drehkolbenanode	5	7,5	5	7,5	5	5	7,5	7,5	6,43
Band-Anode	5	7,5	7,5	7,5	7,5	5	7,5	2,5	6,31
Trommel-Anode	2,5	2,5	2,5	5	7,5	5	7,5	2,5	5,24
Flüssigmetall-Anode	5	7,5	7,5	5	7,5	2,5	7,5	2,5	5,48

### 3.3. Konzept Brennbahn

Nachdem die generelle Bauform bestimmt ist, wird an dieser Stelle die Positionierung der Brennbahn diskutiert. Abbildung 3.5 zeigt die favorisierten Konzepte zur Positionierung der Brennbahn.



**Abbildung 3.5.:** Konzeptvorstellung Brennbahnposition: a) Positionierung der Brennbahn auf der Stirnfläche  
b) Positionierung der Brennbahn auf der Mantelfläche (In Anlehnung an [25]).

Variante a) zeigt eine Brennbahn, wie sie in aktuellen Röntgenröhren zum Einsatz kommt [2][13]. Dabei wird die Brennbahn auf die Front der Targetscheibe aufgebracht. Variante b) zeigt eine Überlegung, die bisher nur selten Verwendung findet. Dabei wird die Brennbahn auf die Mantelfläche der Target-Scheibe aufgebracht. Der größte Vorteil von Variante a) liegt in der Fertigung und den Nachbearbeitungsmöglichkeiten. Durch das Aufbringen auf die Front, ist es möglich die Brennbahn zu schmieden und nachzuverdichten [13]. Bei Variante b) ist dies nur bedingt möglich. Nachteilig ist, dass die Umfangsgeschwindigkeit in der Brennbahn mit steigendem Radius ebenfalls steigt. Dadurch ergibt sich eine inhomogene Wärmeverteilung innerhalb der Brennbahn, die wiederum zu einem inhomogenen Spannungszustand führt. Ebenfalls sorgt Variante a) durch den Anodenwinkel (insbesondere bei breiten Brennfleckgeometrien) dazu, dass es zu einer Unschärfe des Röntgenstrahls kommen kann [2]. Variante b) benötigt eine aufwendigere Fertigung, ermöglicht aber auch die Lösung der zuvor genannten Probleme von Variante a). Dadurch, dass die Brennbahn außen auf der Mantelfläche liegt, herrscht über der Breite die gleiche Umfangsgeschwindigkeit und damit eine homogene Ausdehnung innerhalb der Brennbahn. Auch die Winkelunschärfe des Röntgenstrahls fällt deutlich kleiner aus als bei Variante a). Ein weiterer essentieller Vorteil von Variante b) ist, dass durch das Bestrahlen der Mantelfläche das Prinzip der Strahlungskühlung deutlich effektiver genutzt werden kann. Bei herkömmlichen Drehanoden ist es üblich, auf der Rückseite der Anode Graphitkörper zu befestigen. Diese sollen durch ihre hohe Wärmeemissionsfähigkeit die Temperatur der Anode beschränken. Durch das Anbringen der Brennbahn auf der Mantelfläche ist es möglich Vorder- und Rückseite gleichermaßen

für diesen Effekt zu nutzen. Da Variante b) mehrere Vorteile bietet, welche die aufwendigere Fertigung aufwiegen, ist sie die bevorzugte Variante der Brennbahnpositionierung.

### 3.4. Betrachtung der Ausgangslage

Nachdem in diesem Kapitel zunächst verschiedene Bauformen der Röntgenanoden miteinander verglichen wurden, hat es sich herauskristallisiert, dass sich das bestehende Grundprinzip der Drehanode am besten zum Einsatz in einer Linien-Fokus-Röntgenröhre eignet. Die Drehanode überzeugt im Vergleich zu den anderen Konzepten mit einer überschaubaren Anzahl an Komponenten, die Möglichkeit hohe Drehzahlen bzw. hohe Umfangsgeschwindigkeiten zu erzielen und einer hohen thermischen Belastbarkeit. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde die Position der Brennbahnposition diskutiert. Aufgrund mehrerer Vorteile wird empfohlen, die Brennbahn auf der Mantelfläche der Targetscheibe zu positionieren. Eine Drehanode mit außenliegender Brennbahn bildet somit die Ausgangslage für den weiteren Auslegeprozess. Abbildung 3.6 zeigt den schematischen Aufbau dieses Konzeptes.

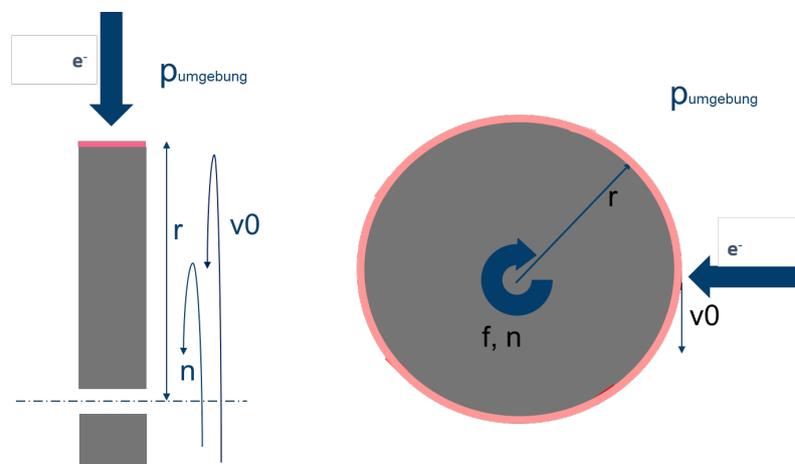


Abbildung 3.6.: Schematische System-Zusammenfassung. Links: Seitenansicht, rechts: Frontansicht.

## 4. Auslegungsstruktur und Systemanalyse

Obwohl das Prinzip der Drehanode auf den ersten Blick einfach erscheint, bergen Konstruktion und Entwicklung viele Herausforderungen. Sowohl die hohe Leistungsdichte als auch die Hochvakuumumgebung verlangen der Struktur einiges ab. Um vermeidbare Auslegeschleifen zu minimieren, wird an dieser Stelle eine Vorgehensweise beschrieben, wie eine Auslegung durchgeführt werden kann. Zunächst wird das System daraufhin analysiert, welche Mechanismen innerhalb des Systems bestehen und von welchen Parametern diese abhängen. Stehen Parameter im Konflikt zueinander, wird ein Optimierungsproblem definiert. Zur Lösung des Optimierungsproblems werden anhand der Systemanforderungen Restriktionen abgeleitet, die die Reihenfolge der Auslegung der Komponenten festlegen. Nach der Bestimmung der Auslegereihenfolge wird eine Materialvorauswahl für die Komponenten vorgenommen. Sind Randbedingungen und Materialauswahl getroffen, wird das System komponentenweise ausgelegt und konstruiert. Dabei werden Dimensionen und Materialien der einzelnen Komponenten konkretisiert und abschließend zusammengefügt. Kann mit dem zusammengeführten Design das Ziel voraussichtlich erfüllt werden, gilt dieser Designvorschlag als Basis für die erweiterte Bauteilentwicklung. Kann begründet werden, warum mit den geforderten Randbedingungen das Ziel nicht erreicht werden kann, müssen diese angepasst werden und die Auslegung dementsprechend neu durchgeführt werden.

### 4.1. Systembetrachtung

Der erste Schritt der Auslegung bildet die Analyse des Gesamtsystems. Dabei wird untersucht, welche Parameter mit welchen Mechanismen interagieren und sich gegenseitig beeinflussen und gegebenenfalls beschränken.

#### 4.1.1. Temperaturanstieg

Aufgrund der Leistungsdichte, die in das Material eingebracht werden soll, ist mit extremen Temperaturen zu rechnen. Ziel ist es, durch eine Parameterauslegung die Temperatur so zu minimieren, dass ein Versagen durch Schmelzen oder Ähnlichem während des Betriebes ausgeschlossen werden kann. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass der Temperaturanstieg pro Umdrehung  $\Delta T$

durch die Gleichung nach Bartzsch (Gleichung 2.2.2) beschrieben werden kann. Aus dieser Gleichung geht hervor, dass wenn eine Elektronenstrahlleistung und ein Brennbahnmaterial gewählt wurden, der Temperaturhub maßgeblich von der Umfangsgeschwindigkeit  $v$  abhängig ist. Dabei setzt sich die Umfangsgeschwindigkeit einer Drehanode aus der Drehfrequenz  $f$  und dem Brennbahnradius  $r$  zusammen.

$$v = 2\pi r f \quad (4.11)$$

Da sich die Umfangsgeschwindigkeit im Divisor der Gleichung 2.2.2 befindet, minimiert sich der Temperaturanstieg, wenn die Umfangsgeschwindigkeit maximal ist.

### 4.1.2. Thermische Spannung

Wird Energie in Materie eingebracht, so dehnt diese sich aus. Thermische Spannungen entstehen dabei in Folge von verhinderter Ausdehnung, unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten im Material (z.B. nicht isotroper Werkstoffe) bzw. im Bauteil (verschiedene Materialien im Verbund) oder durch Temperaturgradienten innerhalb des Bauteils. Die thermischen Spannungen sind immer Resultat der Ausdehnungen des Werkstoffs durch eine Temperaturdifferenz zu einer Referenztemperatur, bei der das Bauteil einen spannungsfreien Zustand besitzt. Als Referenztemperatur wird in der Regel die Temperatur angenommen, die beim Fügen der Werkstoffe vorliegt. Im Allgemeinen kann zwischen drei Fällen der thermischen Spannungsentstehung unterschieden werden. [27]

- Es liegt eine homogene Temperaturänderung im gesamten Bauteil vor. Dies ist z.B. der Fall, wenn ein Bauteil nach einer Wärmebehandlung an der Luft langsam abkühlt. Für die Temperaturdifferenz im Bauteil gilt  $\Delta T = const$ . Spannungen entstehen dabei nur, wenn unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten vorliegen. Die entstehenden Spannungen lassen sich analytisch leicht bestimmen. [27]
- Es liegt ein stationärer Temperaturgradient im Bauteil vor. Ein stationärer Temperaturgradient kann sich im stationären Betrieb einstellen, z.B. im Reaktorbau. Eine Wärmedämmschicht wird durch heiße Gase aufgeheizt während die Reaktorwand von außen gekühlt wird. Damit ist die Temperaturdifferenz ortsabhängig, aber zeitlich unabhängig:  $\Delta T = f(y)$ . In der Regel werden die Verbunde, die für solche Anwendungen genutzt werden, bei hohen Temperaturen gefügt und da die Temperaturen bei solchen Anwendungen knapp unter der Fügtemperatur liegen, sind die Spannungen im Material oft gering. Unter der Annahme eindimensionaler Temperaturgradienten lassen sich die resultierenden Spannungen analytisch bestimmen. [27]
- Es liegt eine instationäre Temperaturänderung vor. Dieser Fall wird allgemein als Thermoschock

bezeichnet und bildet den kritischsten thermischen Lastfall ab. Dabei wird die Bauteiloberfläche in schlagartig erhitzt bzw. abgekühlt. Die Temperaturdifferenz innerhalb des Bauteils ist damit sowohl orts- als zeitabhängig:  $\Delta T = f(y, t)$ . Die Temperaturverteilung und die resultierenden Spannungen müssen im Allgemeinen numerisch bestimmt werden[27].

Der in dieser Arbeit vorliegende Lastfall ist eindeutig dem dritten Fall, dem Thermoschock, zuzuordnen. Da hier ein hochgradig instationärer Lastfall vorliegt, kann eine genaue Spannungsbestimmung nur über einen numerischen Ansatz vorgenommen werden. Dennoch lassen sich in der Literatur einige Ansätze finden, die eine vereinfachte Betrachtung ermöglichen. Die Gleichung

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\alpha E}{1 - \nu} (T_1 - T_0) \quad (4.12)$$

gilt für den Fall einer Plattenoberfläche, die von einer Temperatur  $T_0$  auf eine Temperatur  $T_1$  erhitzt oder abgekühlt wird und sich nur in z-Richtung aber nicht in x- und y-Richtung ausdehnen kann [28]. Obwohl die Gleichung 4.1.2 eine Vereinfachung darstellt, lassen sich mit ihrer Hilfe die ausschlaggebenden Parameter bestimmen, die zu Spannungen im System führen. Ist ein Brennbahnmaterial gewählt (z.B. Wolfram) ist allein die Temperaturdifferenz zwischen  $T_0$  und  $T_1$  maßgebend. Wie schon in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, ist die Temperaturdifferenz maßgeblich von der Umfangsgeschwindigkeit  $v$  bzw. von Drehfrequenz und Anodenradius abhängig. Die minimale thermische Spannung wird erreicht, wenn die Umfangsgeschwindigkeit maximal wird. Es wird angenommen, dass dieser Zusammenhang auf das Gesamtsystem anwendbar ist.

### 4.1.3. Mechanische Spannung

Das in dieser Arbeit verfolgte Prinzip der Drehanode hat zur Folge, dass aufgrund der Rotation Fliehkräfte auf die Targetstruktur wirken, welche wiederum zu Spannungen und zu Bauteilversagen führen können. Unter der Annahme, dass die rotierende Struktur symmetrisch zu ihrer Mittelebene aufgebaut ist und dass sich ihre Stärke nur sehr kleinschrittig ändert, entstehen im Betrieb nur radiale und tangential Zugspannungen[29]. Abbildung 4.1 verdeutlicht den vorliegenden Spannungszustand. Die Fliehkraft  $F_z$ , die auf das Volumenelement  $dV$  wirkt, wird durch die entstehenden Spannungen im Gleichgewicht gehalten. Das heißt, je geringer die Fliehkräfte sind, desto niedriger fallen die Spannungen innerhalb der Struktur aus. Die Fliehkräfte lassen sich mit der Gleichung 4.14 beschreiben.[29]

$$F_z = dm\omega^2 r \quad (4.13)$$

$$\text{bzw. } F_z = dV \rho r (2\pi f)^2 \quad (4.14)$$

$F_z$  : Fliehkraft,  $dV$  : Volumenelement,  $\rho$  : Dichte,  $\omega$  : Winkelgeschwindigkeit,  $f$  : Drehfrequenz,  $r$  : Aussenradius

Aus dieser Gleichung geht hervor, dass ein Material mit einer möglichst geringen Dichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit genutzt werden muss, wenn hohe Umfangsgeschwindigkeiten gefordert werden.

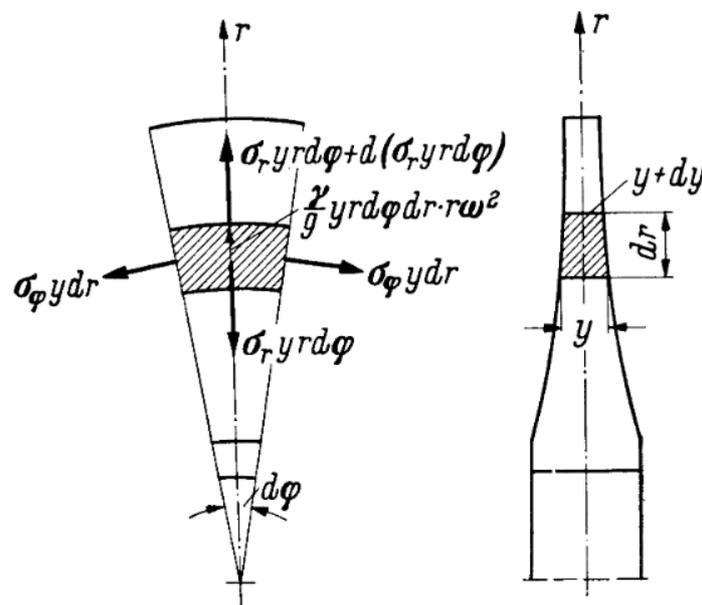


Abbildung 4.1.: Kräfte am Element einer rotierenden Scheibe[30].

#### 4.1.4. Abkühlzeit

Ein wichtiger Aspekt des Prinzips der Drehanode ist, dass sich die Teilstücke der Brennbahn unter dem Elektronenstrahl wegbewegen und nach einer Umdrehung wieder unterhalb dessen sind. In der Zeit, die das Teilstück benötigt, um wieder unterhalb des Strahles zu sein, hat dieses die Möglichkeit abzukühlen. Die Abbildung 4.2 veranschaulicht diese Gegebenheit. Die Zeit  $t_{Brenn}$  in der der Brennfleck innerhalb des Elektronenstrahls liegt, kann als das Verhältnis von Brennfleckbreite  $b$  und Umfangsgeschwindigkeit  $v$  beschrieben werden (Gleichung 4.15).

$$t_{Brenn} = \frac{b}{v} \quad (4.15)$$

Die Zeit  $t_{Abkuehl}$  in der der Brennfleck Zeit hat abzukühlen kann durch das Verhältnisses zwischen dem restlichen Anodenumfangs  $u_{rest}$  mit

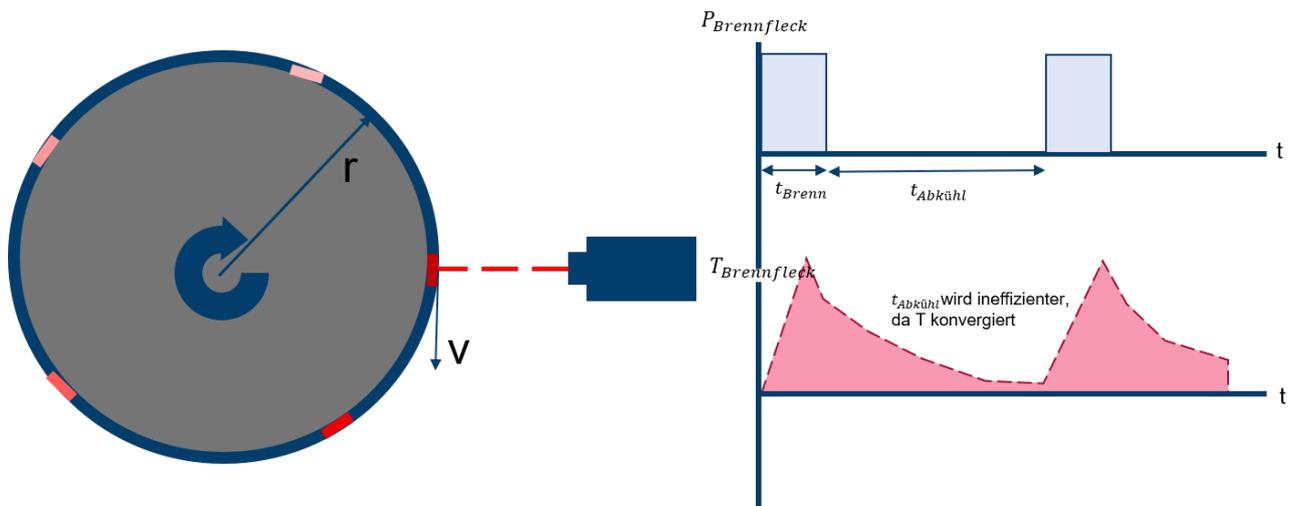


Abbildung 4.2.: Schematische Darstellung der Abkühlung während einer Umdrehung.

$$u_{rest} = 2\pi r - b \quad (4.16)$$

und der Umfangsgeschwindigkeit ermittelt werden.

$$t_{Abkuehl} = \frac{2\pi r - b}{v} \quad (4.17)$$

$$= \frac{1}{f} - \frac{b}{2\pi r f} \quad (4.18)$$

Aus diesem Zusammenhang geht hervor, dass um die Abkühlzeit zu maximieren eine große, sich langsam drehende Scheibe ideal wäre.

#### 4.1.5. Diffusion

Als letzten systeminternen Mechanismus wird das Phänomen der Diffusion betrachtet. Besondere Relevanz hat die Berücksichtigung der Diffusion insbesondere bei der Verwendung von stark kohlenstoffhaltigen Materialien wie Graphit. Aus der Literatur ist bekannt, dass sich durch Kohlenstoffdiffusion Sprödphasen bilden können, die unter der Thermoschockbeanspruchung zum Versagen führen können [18] [15]. Um die Diffusionsprozesse zu reduzieren, werden zwei Gleichungen betrachtet. Zum einen die Gleichung zur Ermittlung der mittleren Diffusionsweglänge  $x$  (Gleichung 4.19) und die Gleichung des Diffusionskoeffizienten  $D$  (Gleichung 4.20) [31].

$$x = \sqrt{2Dt} \quad (4.19)$$

$x$  = mittlere Diffusionsweglänge,  $D$  = Diffusionskoeffizient,  $t$  = Zeit

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (4.20)$$

$$\text{mit } D_0 \approx \alpha_0^2 N \omega \quad (4.21)$$

$Q$  = Energiebarriere,  $R$  = Allgemeine Gaskonstante,  $T$  = Temperatur

$\alpha_0$  = Atomabstand,  $N$  = Anteil an vakanten Gitterplätzen,  $\omega$  = Springfrequenz

Diese beiden Gleichungen zeigen auf, dass das Diffusionsverhalten, abgesehen von den Materialeigenschaften, hauptsächlich von der Zeit (linearer Einfluss) und von der Temperatur (exponentieller Einfluss) abhängig ist. Daraus lässt sich ableiten, dass die Drehanode eine möglichst hohe Drehzahl benötigt.

## 4.2. Zusammenfassung Systemanalyse

Im Verlauf dieses Kapitels wurden die fünf ausschlaggebendsten Effekte auf eine Drehanode betrachtet und daraufhin untersucht, welche Parameter dort Einfluss nehmen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Temperaturhub pro Umdrehung möglichst gering sein muss, damit es nicht zu Thermoschockversagen oder Aufschmelzen der Brennbahn kommt. Dies kann durch eine möglichst hohe Drehzahl und einem möglichst großen Anodendurchmesser realisiert werden. Aber durch die Einwirkung der Fliehkräfte auf die Struktur kann es zum Versagen durch zu hohe mechanische Spannungen kommen. Daher muss, bevor die Brennbahn ausgelegt wird, zunächst ermittelt werden, welcher Durchmesser bei welcher Drehfrequenz möglich ist, um das Versagen der Struktur ausschließen zu können. Sind die maximalen Durchmesser und Drehfrequenzen ermittelt, kann im nächsten Schritt untersucht werden, ob die resultierende Umfangsgeschwindigkeit ausreicht, um den Temperaturhub pro Umdrehung so zu reduzieren, dass es zu keinen Versagen führt. Konnten Materialien und Maße für die Trägerstruktur und die Brennbahn gefunden werden, kann im abschließendem Schritt, falls nötig, zusätzlich eine Diffusionsbarriere zwischen Trägerstruktur und Brennbahn betrachtet werden.

## 5. Trägerstruktur

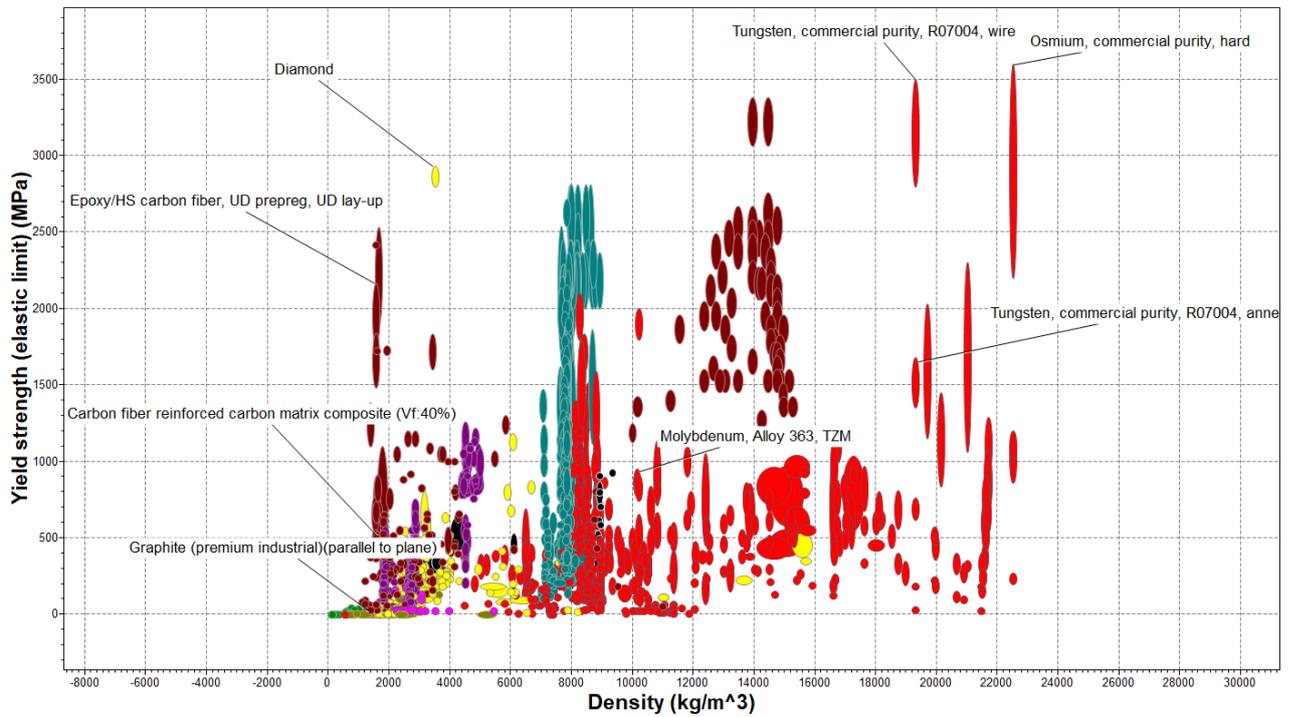
Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, ist die Umsetzung des Vorhabens maßgeblich von der Trägerstruktur abhängig, daher ist es sinnvoll, diese als erstes auszulegen. Dafür wird zunächst eine Materialvorauswahl getroffen. Im Anschluss daran wird die Auslegung schnell rotierender Scheiben nach zwei verschiedenen Ansätzen durchgeführt. Die Ergebnisse beider Auslegungen werden verglichen und um die Ergebnisse abzusichern, wird das bessere Ergebnis mithilfe einer FE-Simulation überprüft und genauer betrachtet.

### 5.1. Materialauswahl

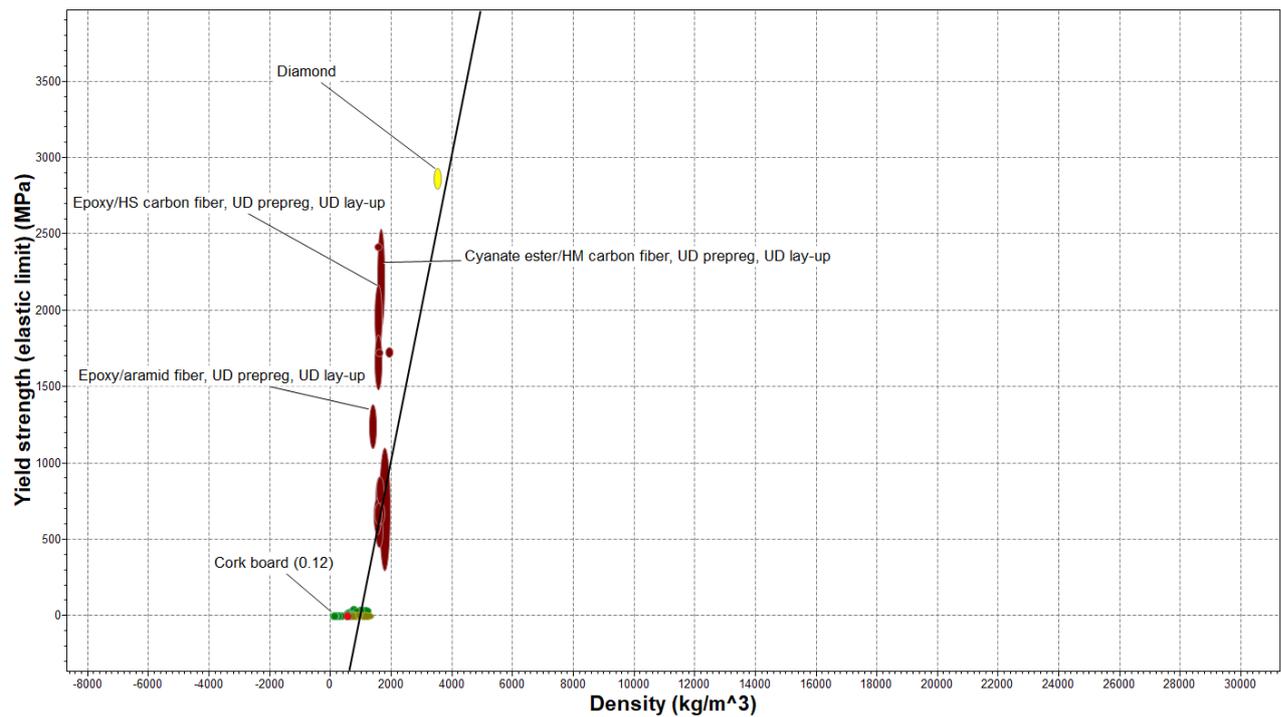
Durch die vorangegangene Systembetrachtung ist bereits bekannt, dass die durch die Rotation entstehenden Fliehkräfte den ausschlaggebenden Effekt auf die Anodenstruktur darstellen. Daraus folgt, dass ein idealer Werkstoff eine möglichst geringe Dichte bei möglichst hoher Festigkeit aufweisen muss. Zum Zweck der Materialvorauswahl wird auf Basis einer Materialdatenbank<sup>1</sup>, die Werkstoff-Festigkeit über die Werkstoff-Dichte aufgetragen (Abbildung 5.1). Es werden dabei Materialien der Gruppen, Keramiken und Gläser, Metalle und Legierungen und die der Verbundwerkstoffe miteinander verglichen. Aus diesem Diagramm geht hervor, dass Diamant gefolgt von verschiedenen CFK-Materialien am besten für diese Anwendung geeignet sind (Abbildung 5.2). Da aber davon auszugehen ist, dass sehr hohe Leistungen über den Anodenteller abgeführt werden müssen, muss auch die Temperaturbeständigkeit des Anodentellers berücksichtigt werden. Aus der Literatur ist bereits bekannt, dass sich innerhalb des Anodentellers Temperaturen von über 1000 °C einstellen können [15]. Daher wird eine minimale Schmelztemperatur von 1500 °C festgesetzt. Mit dieser zusätzlichen Eigenschaft reduziert sich die Anzahl der möglichen Werkstoffe deutlich (Abbildung 5.3). Nach dieser Reduzierung bleiben unter anderem die heute schon üblichen Anodenmaterialien wie Wolfram, Molybdän bzw. Titan-Zirkonium-Molybdän(TZM)-Legierungen und Graphit übrig. Zudem ist CFC (Carbonfiber reinforced Carbon) weiterhin in der Auswahl und bietet unter den Materialien, die sich zum Bau von Strukturen eignen, das beste Verhältnis aus Festigkeit und Dichte (Abbildung 5.4). Diamant eignet sich nicht zu Fertigung von größeren Strukturen, daher wird es im Weiterem nicht betrachtet.

<sup>1</sup>CES EDUPACK2022, Materialien der Stufe 3

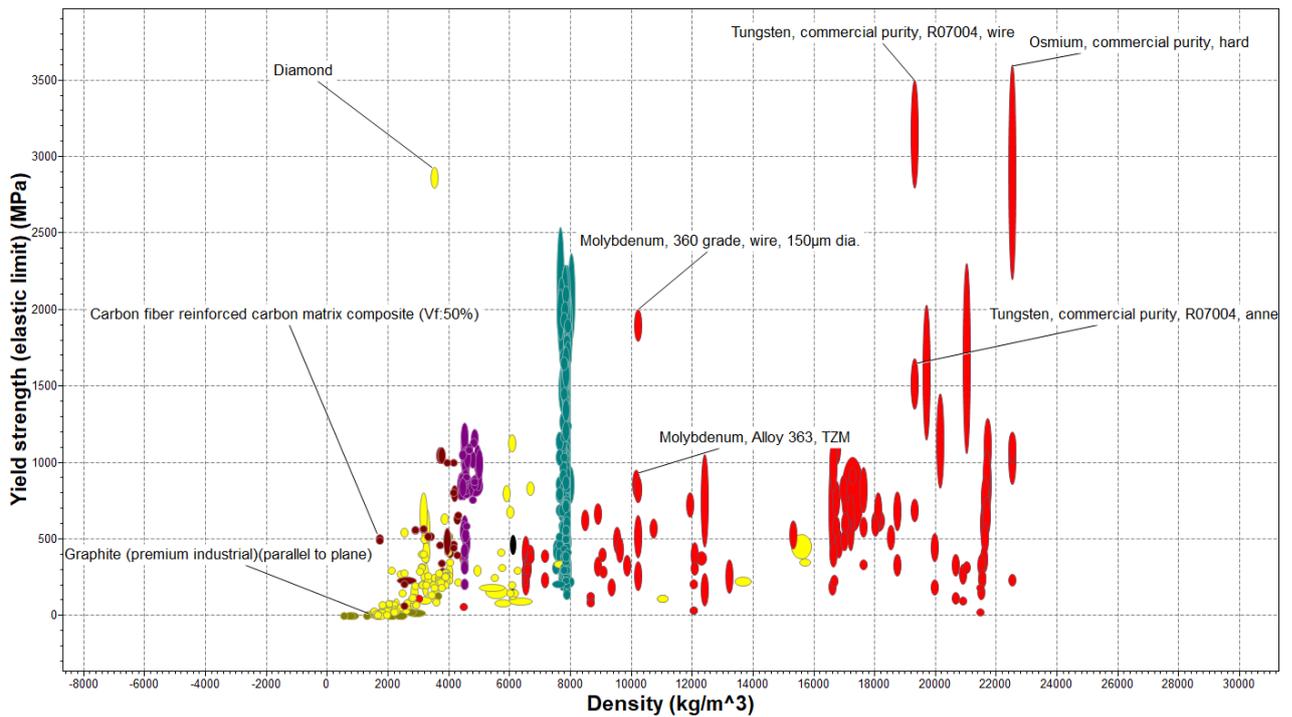
Für die weitere Auslegung wird sich auf Graphit, CFC, TZM und Wolfram beschränkt. Tabelle 5.1 fasst dabei alle wichtigen materialspezifischen Parameter zusammen.



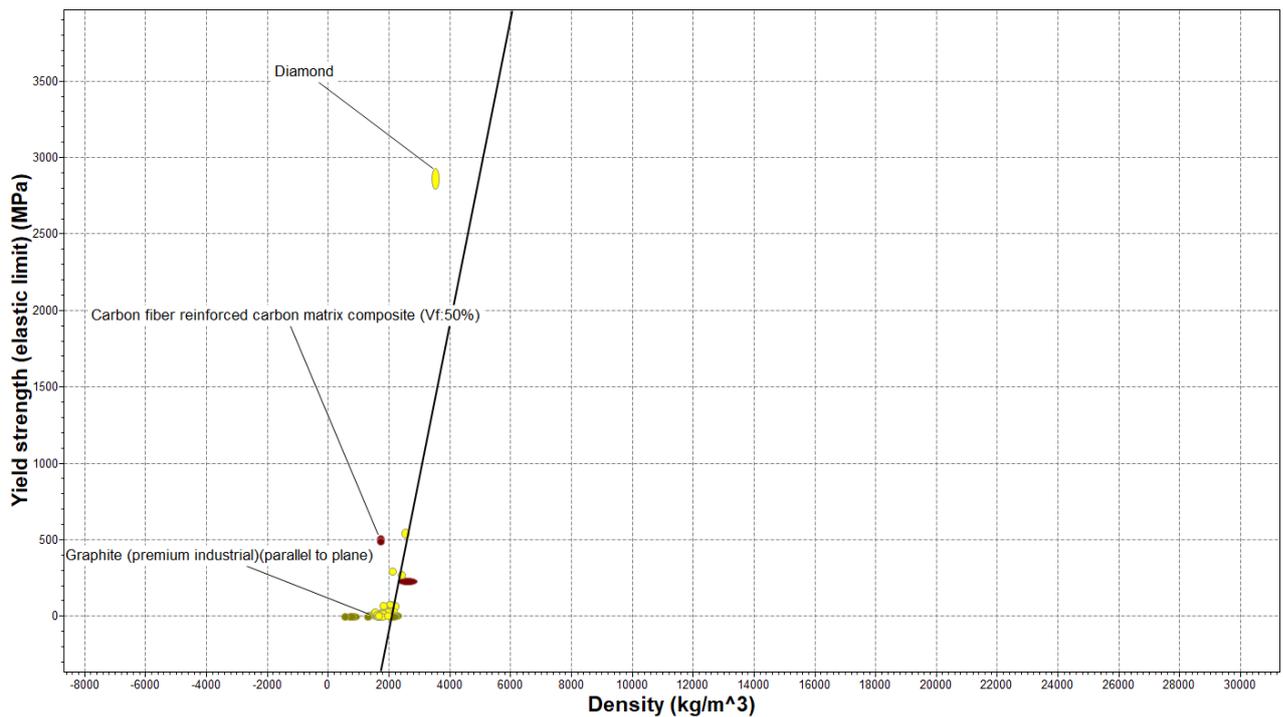
**Abbildung 5.1.:** Ashby-Plot 1, Trägerstruktur-Materialvorauswahl: Vergleich von Materialien aus den Gruppen: Keramiken und Gläser, Metalle und Legierungen und aus den Verbundwerkstoffen (Stufe 3). Vergleich der Materialeigenschaften Material-Festigkeit und Material-Dichte (Datenbank:Granta EDUPack 2021R).



**Abbildung 5.2.:** Ashby-Plot 2, Trägerstruktur-Materialvorauswahl: Vergleich von Materialien aus den Gruppen: Keramiken und Gläser, Metalle und Legierungen und aus den Verbundwerkstoffen (Stufe 3). Vergleich der Materialeigenschaften Material-Festigkeit und Material-Dichte. Ermittlung des besten Festigkeits zu Dichteverhältnisses (Steigung der Index-Geraden 1, Datenbank:Granta EDUPack 2021R).



**Abbildung 5.3.:** Ashby-Plot 3, Trägerstruktur-Materialvorauswahl: Vergleich von Materialien aus den Gruppen: Keramiken und Gläser, Metalle und Legierungen und aus den Verbundwerkstoffen (Stufe 3). Vergleich der Materialeigenschaften Material-Festigkeit und Material-Dichte. Ausschluss aller Materialien die einen Schmelzpunkt  $< 1500$  °C haben. (Datenbank: Granta EDUPack 2021R).



**Abbildung 5.4.:** Ashby-Plot 4, Trägerstruktur-Materialvorauswahl: Vergleich von Materialien aus den Gruppen: Keramiken und Gläser, Metalle und Legierungen und aus den Verbundwerkstoffen (Stufe 3). Vergleich der Materialeigenschaften Material-Festigkeit und Material-Dichte. Ausschluss aller Materialien die einen Schmelzpunkt  $< 1500^{\circ}\text{C}$  haben. Ermittlung des besten Festigkeits zu Dichteverhältnisses (Steigung der Index-Geraden: 1)(Datenbank:Granta EDUPack 2021R).

**Tabelle 5.1.:** Materialkennwerte der vorausgewählten Werkstoffe zur Auslegung einer Röntgentarget-Struktur [32][33][17][34].

	Graphit	CFC	TZM	Wolfram
Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,5-1,9	1,5-1,9	10	19
$\sigma_{zul}$ [MPa]	44	250	900	1000
$T_{schmelz}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	3000	3000	2600	3000
$\nu$	0,3	0,33	0,3	0,3

## 5.2. Analytische Betrachtung

In diesem Abschnitt werden auf der Basis analytischer Berechnungen der ideale Werkstoff, sowie die optimale Geometrie und Drehzahl des Drehanodentellers bestimmt. Der in dieser Arbeit betrachtete Fall fordert eine möglichst hohe Umlaufgeschwindigkeit und eine möglichst geringe Masse des Anodentellers. Dazu werden die analytischen Auslegeverfahren nach der SScheibe konstanter Dicke und der "Scheibe gleicher Festigkeit" durchgeführt und miteinander verglichen.

Bei der Festigkeitsbetrachtung von rotierenden Scheiben wird zunächst von einem zweiachsigen, achsensymmetrischen Hauptspannungszustand ausgegangen und die Normalspannungen in axialer Richtung werden vernachlässigt. Zudem erfolgt die Betrachtung bei konstanter Drehzahl, d.h. es wirken kein Moment in axialer Richtung. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 beschrieben, erfährt ein Massenelement durch die Rotation eine Fliehkraft  $dZ$  nach Gleichung 4.14. Das resultierende Kräftegleichgewicht kann nach Abbildung 4.1 wie folgt aufgestellt werden [29]:

$$\rho(\omega r)^2 y dr d\phi + d(\sigma_r y r) - \sigma_t y dr d\phi = 0 \quad (5.22)$$

Durch differenzieren erhält man:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r \frac{r dy}{y dr} + \sigma_r - \sigma_t + \rho(\omega r)^2 = 0 \quad (5.23)$$

Durch das Hook'sche Gesetz können zusätzlich zwei Ausdrücke für die Dehnungen in radialer und tangentialer Richtung ausgedrückt werden:

$$\epsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu \sigma_t) = \frac{du}{dr} \quad (5.24)$$

$$\epsilon_t = \frac{1}{E}(\sigma_t - \nu \sigma_r) = \frac{u}{r} \quad (5.25)$$

$\epsilon_r$  : Dehnung radial,  $\epsilon_t$  : Dehnung tangential,  $E$  : Elastizitätsmodul,

$\nu$  : Querkontraktionszahl,  $u$  : örtliche Verschiebung

Durch zusätzliches Differenzieren der Gleichung 5.25 nach  $r$  und dem Einsetzen in Gleichung 5.24 erhält man die Differenzialgleichung:

$$r \left( \frac{d\sigma_t}{dr} - \nu \frac{d\sigma_r}{dr} \right) + (1 + \nu)(\sigma_t - \sigma_r) = 0 \quad (5.26)$$

Die Differenzialgleichungen 5.23 und 5.26 bilden das Gleichungssystem anhand dessen die Spannungsverteilung in einer rotierenden Scheibe ermittelt werden kann.

### 5.2.1. Scheibe konstanter Dicke

Die einfachste Form der rotierenden Scheibe ist die Scheibe konstanter Dicke. Für diese gilt:

$$\frac{dy}{dr} = 0 \quad (5.27)$$

Die Scheibe besitzt über den gesamten Durchmesser einen konstante Dicke  $y$ . Die Gleichung 5.23 wird dadurch vereinfacht und kann nach  $\sigma_t$  aufgelöst und in Gleichung 5.26 eingesetzt werden:

$$\frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + \frac{3}{r} \frac{d\sigma_r}{dr} + \rho\omega^2(3 + \nu) = 0 \quad (5.28)$$

Für eine Scheibe ohne Loch ergibt sich folgende Lösung für die Radialspannung.

$$\sigma_r = \rho\omega^2 r_a^2 \frac{(3 + \nu)}{8} \left(1 - \left(\frac{r}{r_a}\right)^2\right) \quad (5.29)$$

Die Lösung für  $\sigma_t$  erhält man durch Einsetzen von Gleichung 5.29 in Gleichung 5.23

$$\sigma_t = \rho\omega^2 r_a^2 \frac{(3 + \nu)}{8} \left(1 - \left(\frac{1 + 3\nu}{3 + \nu}\right) \left(\frac{r}{r_a}\right)^2\right) \quad (5.30)$$

Hierbei muss gesagt werden, dass die Spannungen doppelt so hoch für eine Scheibe mit Loch ausfallen kann [35]. Das Problem der Spannungsspitzen aufgrund einer Durchgangsbohrung wird in Abschnitt 5.3 wieder aufgegriffen.

Um diese Gleichung für die Auslegung nutzen zu können, wird eine Optimierungs- bzw Maximierungsaufgabe definiert:

$$\max u(r_a, f) = 2\pi r_a f \quad (5.31)$$

Die Umfangsgeschwindigkeit soll durch Variation von  $r_a$  und  $f$  maximiert werden. Durch die im Kapitel 3.1 (Tabelle 3.1) eingeführten Anforderungen wird die Optimierungsaufgabe durch folgende Restriktionen beschränkt:

- Aussenradius:  $r_a \leq 0,5 \text{ m}$
- Drehfrequenz:  $f \leq 200 \text{ Hz}$
- Masse:  $m \leq 20 \text{ Kg}$
- Spannung:  $\sigma_r, \sigma_t < \sigma_{zul}$

**Tabelle 5.2.:** Ergebnisse der Auslegung nach dem Ansatz "Scheibe konstanter Dicke" für ausgewählte Materialien.

	Graphit	CFC	TZM	Wolfram
$r_{max}$ [mm]	188	334	145	105
$f_{max}$ [Hz]	200	200	200	200
$v_{max}$ [m/s]	236	419	183	132
m [kg]	6,366	20	20	20
S	1	1,79	6,5	7,23

Tabelle 5.2 fasst die Lösungen der Optimierungsaufgabe für die vier im Vorfeld ausgewählten Werkstoffe zusammen. Eine Scheibe aus CFC kann unter der Berücksichtigung aller Restriktionen eine deutlich höhere Umfangsgeschwindigkeit erzielen. Ebenfalls ist der resultierende Sicherheitswert von  $\approx 2$  ein gutes Ergebnis. Zu bemerken ist, dass die Scheiben aus CFC, TZM und Wolfram sowohl an die Drehfrequenz- als auch an die Massen-Restriktion stoßen, ohne die zulässige Spannung zu überschreiten. Durch das Steigerung der Drehfrequenz-Restriktion könnten noch deutlich höhere Umfangsgeschwindigkeiten erzielt werden, bzw. eine schnellere Rotation von leichteren Scheiben.

### 5.2.2. Scheibe gleicher Festigkeit

Bei dem Prinzip der Scheibe gleicher Festigkeit wird davon ausgegangen, dass die beiden Spannungen  $\sigma_r$  und  $\sigma_t$  in der ganzen Scheibe einen festen und gleichen Wert annehmen [29] [30].

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma \quad (5.32)$$

Aus diesem Zusammenhang ergibt sich, dass Gleichung 5.26 entfällt und sich Gleichung 5.23 wie folgt vereinfacht:

$$\sigma_r \frac{r}{y} \frac{dy}{dr} + \rho(\omega r)^2 = 0 \quad (5.33)$$

Aus der Differenzgleichung ergibt sich die Scheibendicke  $y$  in Abhängigkeit von  $r$ :

$$y(r) = y_i e^{\frac{-\rho(\omega r)^2}{2\sigma}} \quad (5.34)$$

$y_i$ : Scheibendicke an der Wurzel

Dadurch dass die Brennfleckgeometrie die Mindestdicke bei  $y_{ra}$  vorgibt, kann die Gleichung nach  $y_i$  umgestellt werden und aus der gegebenen Dicke  $y_{ra}$  kann die Wurzeldicke  $y_i$  ermittelt werden.

$$y_i(r_a) = y_{ra} e^{\frac{\rho(\omega r_a)^2}{2\sigma}} \quad (5.35)$$

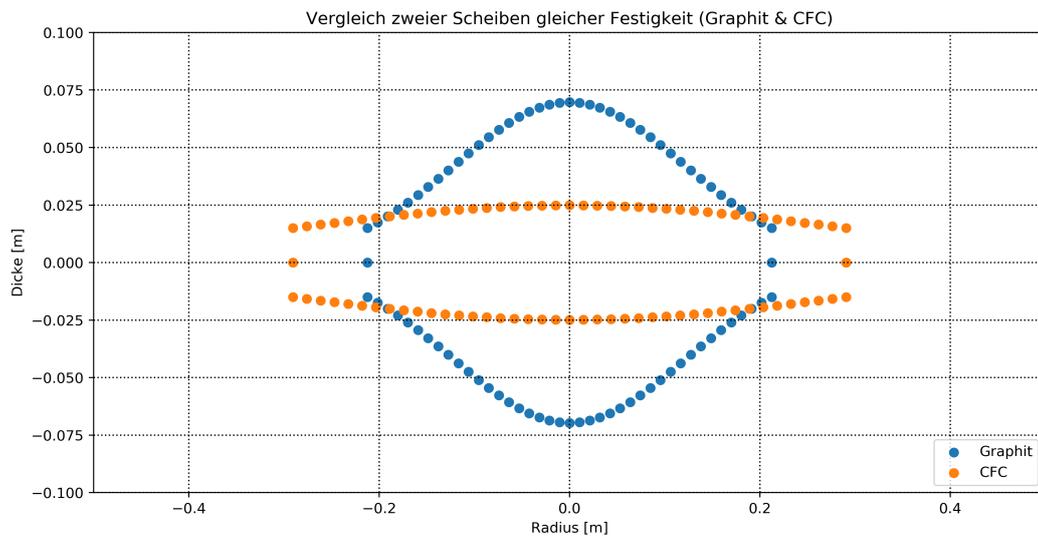
Mit dieser Gleichung lässt sich die Geometrie und damit die Masse der Scheibe gleicher Festigkeit errechnen. Die Optimierungsaufgabe ist auch schon wie bei der Scheibe konstanter Dicke die Maximierung der Umfangsgeschwindigkeit.

$$\max u(r_a, f) = 2\pi r_a f \quad (5.36)$$

mit den Restriktionen:

- Aussenradius:  $r_a \leq 0,5 \text{ m}$
- Drehfrequenz:  $f \leq 200 \text{ Hz}$
- Masse:  $m \leq 20 \text{ Kg}$
- Spannung:  $\sigma = \sigma_{zul}$

Anders als bei der Scheibe konstanter Dicke ist die entstehende Spannung kein resultierender Parameter, sondern ein Input-Parameter, der die Geometrie maßgeblich beeinflusst. Deutlich wird dies beim Vergleich zwischen einer CFC- und einer Graphitscheibe (Abbildung 5.5). Die Materialien besitzen ungefähr die gleiche Dichte, aber durch die geringere zulässige Spannung fällt die Wurzeldicke der Graphitscheibe deutlich höher aus. Aus den in Tabelle 5.3 zusammengefassten Ergebnissen geht hervor, dass die CFC-Scheibe die höchste Umfangsgeschwindigkeit erzielt. Die Scheibe aus Graphit erzielt ebenfalls hohe Umfangsgeschwindigkeiten, ist aber durch die große Wurzeldicke keine praxistaugliche Lösung.



**Abbildung 5.5.:** Vergleich der Scheiben-Geometrien nach der Auslegung der "Scheibe gleicher Festigkeit" für die Werkstoffe CFC und Graphit (Drehfrequenz 200 Hz).

### 5.2.3. Zwischen Fazit

In den beiden vorherigen Abschnitten wurden zwei Auslegevarianten vorgestellt. Im Vergleich der beiden Ansätze fällt auf, dass die Scheiben konstanter Dicke, bis auf die aus Graphit, eine höhere Umfangsgeschwindigkeit erzielen können als die Scheiben gleicher Festigkeit. Dies liegt daran, dass bei den vorgegebenen Anforderungen die Materialeigenschaften nicht vollends ausgeschöpft werden.

Zum Verdeutlichen wird für das Beispiel der CFC-Scheibe konstanter Dicke die Massen-Restriktion schrittweise erhöht (Tabelle 5.4). Hieraus wird ersichtlich, dass bei einer Rotation mit 200 Hz die maximal mögliche Umfangsgeschwindigkeit  $562 \text{ m/s}$  betragen kann. Die Scheibe weist dabei einen Außenradius von  $0,44 \cdot m$  und eine Masse von  $35 \text{ kg}$  auf. Unter diesen Bedingungen sinkt der Sicherheitsfaktor auf 1. Möchten noch höhere Geschwindigkeiten erreicht werden, muss auf Kosten exponentiell wachsender Masse auf die Scheibe gleicher Festigkeit zurückgegriffen werden (Abbildung 5.6).

Für diese Arbeit ist die Scheibe konstanter Dicke aus CFC die vielversprechendste Lösung, da bei Einhaltung der Wunschanforderungen (Masse, Bauraum, Drehfrequenz) die höchste Umfangsgeschwindigkeit erzielt werden kann. Zusätzlich ist aufgrund der Fertigungsverfahren von CFC eine plane Geometrie leichter und kosten günstiger umzusetzen.

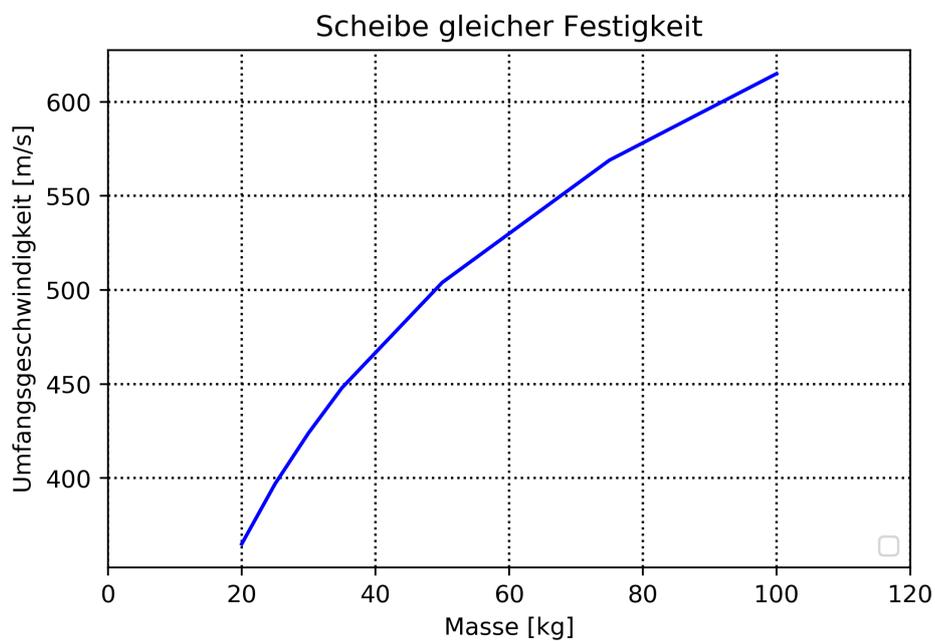
Da es sich bei CFC um ein nicht isotropes Material handelt, wird im nächsten Abschnitt eine Finiten-Elemente-Simulation (FE-Simulation) durchgeführt, um den Einfluss der Anisotropie abbilden zu können und die analytischen ausgelegte Geometrie genauer zu untersuchen.

**Tabelle 5.3.:** Ergebnisse der Auslegung nach dem Ansatz "Scheibe gleicher Festigkeit" für ausgewählte Materialien.

	<b>Graphit</b>	<b>CFC</b>	<b>TZM</b>	<b>Wolfram</b>
$r_{max}$ [mm]	212	290	139	97
$f_{max}$ [Hz]	200	200	200	200
$v_{max}$ [m/s]	266	365	174	122
m [kg]	20	20	20	20

**Tabelle 5.4.:** Ergebnisse der Auslegung nach dem Ansatz "Scheibe konstanter Dicke" bei schrittweiser Erhöhung der Massenrestriktion (CFC-Substrat).

<b>Massenrestriktion [Kg]</b>	<b>35</b>	<b>30</b>	<b>25</b>	<b>20</b>
$r_{max}$ [mm]	440	410	370	334
$f_{max}$ [HZ]	200	200	200	200
$V_{max}$ [m/s]	556	514	470	420
S	1,02	1,19	1,43	1,79



**Abbildung 5.6.:** Verhältnis zwischen Umfangsgeschwindigkeit und Masse einer "Scheibe gleicher Festigkeit".

## 5.3. FE-Simulation

Die in diesem Abschnitt durchgeführte Simulation dient zur Absicherung der analytischen durchgeführten Auslegung und zur weiteren Verfeinerung des Designs. Dabei werden sowohl die Verbundmaterial-spezifischen Versagenskriterien als auch die Hauptnormal- und Scherspannungen analysiert.

Zur Analyse der Struktur wird der implizierte Fenite-Elemente-Solver<sup>2</sup> verwendet.

### 5.3.1. Material Modell

Das in diesem Modell verwendete CFC-Material-Modell besitzt ein anisotropes Materialverhalten. Die Werte in Tabelle 5.5 weisen die Material-Parameter für eine UD-Lage (Faser:T300 [36]) mit 50% Faservolumen auf. Die aufgeführten Parameter wurden durch die Mischungsregel für Faserverbund-Werkstoffe [37] berechnet. Da es sich in diesem Fall um einen Rotationslastfall handelt, wäre ein quasi-isotropes Materialverhalten ideal. Auf Basis der UD-Parameter werden über die klassische Laminattheorie für Mehrschichtverbunde [37] die Material-Parameter für ein 0/90 Gewebe ermittelt (Tabelle 5.6). Diese Materialdaten werden nun genutzt um im ACP-Modul von Ansysworkbench ein quasi-isotropes (0°/30°/60°) Laminat mit einer Dicke von 30 mm aufzubauen. Das in Abbildung 5.7 abgebildete Polardiagramm zeigt das Materialverhalten für das erzeugte Laminat und bezeugt, dass es sich dabei um ein quasi-isotropes Materialverhalten handelt.

**Tabelle 5.5.:** Liste der Material-Parameter einer UD-Lage mit einem 50% Faservolumen-Anteil. Errechnete Werte basieren auf der Mischungsregel für Faserverbund-Werkstoffe [37]. Bestandteile: 50% T300-Kohlenstoff-Faser [36] 50% Graphit-Matrix [32].

Material Parameter UD-Lage 50% Faservolumen-Anteil	
<b>r Dichte</b>	1,730 g/cm <sup>3</sup>
<b>E Zug-E-Modul längs</b>	105.022 MPa
<b>E Zug-E-Modul quer</b>	10.762 MPa
<b>Gxy Quer/Längs-Schubmodul</b>	7332 MPa
<b>nyx Querkontraktion</b>	0,151 -
<b><math>\alpha</math> thermische Ausdehn. längs</b>	-0,64 10 <sup>-6</sup> /K
<b><math>\alpha</math> thermische Ausdehn. quer</b>	8,49 10 <sup>-6</sup> /K

<sup>2</sup>Ansys Mechanical (Version 2020R2)

Tabelle 5.6.: Ermittelte Material-Parameter für ein 0/90 CFC-Gewebe mit 50% Faservolumen-Anteil.

Material Parameter 0/90 Gewebe	
r Dichte	1,730 g/cm <sup>3</sup>
Ex Zug-E-Modul längs	59.821 MPa
Ey Zug-E-Modul quer	59.821 MPa
Ez Zug-E-Modul normal	10.762 MPa
Gxy Quer/Längs-Schubmodul	34.000 MPa
nyx Querkontraktion y-Richt.	0,0561 -
nxy Querkontraktion x-Richt.	0,0561 -
vx,xy Schubkopplungsverh. sx	0,0000 -
vxy,x Schubkopplungsverh. txy	0,0000 -
EB,x Biege-E-Modul längs	59.821 MPa
EB,y Biege-E-Modul quer	59.821 MPa
ax thermische Ausdehn. längs	0,39 10-6/K
ay thermische Ausdehn. quer	0,39 10-6/K
axy therm. Ausd. längs/quer	0,00 10-6/K
az therm. Ausdehn. normal	8,49 10-6/K

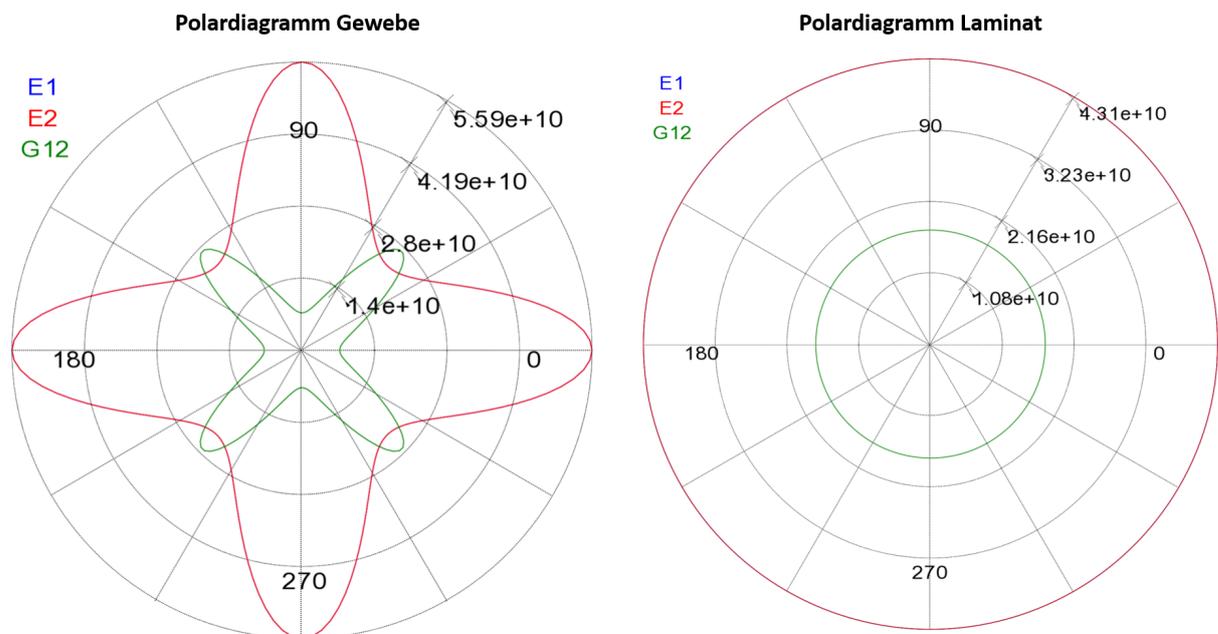


Abbildung 5.7.: Abbildung der richtungsabhängigen Materialeigenschaften durch Polardiagramme. Anisotropes Materialverhalten einer Gewebelage (links), quasi-isotropes Materialverhalten eines 0/30/60 Laminats (rechts).

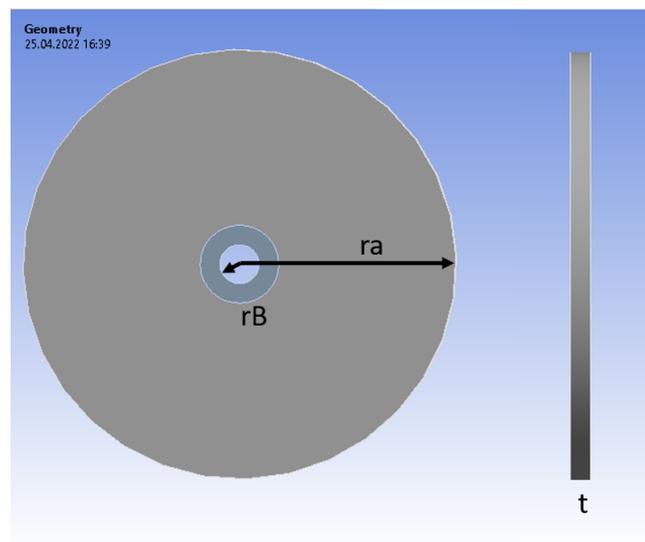
### 5.3.2. Definition Randbedingungen

Das geometrische Modell basiert auf der vorher analytisch bestimmten Geometrie. Zusätzlich wird eine 60 mm Durchgangsbohrung eingebracht. Das Modell hat folgende Parameter:

- Dicke  $t$  : 30 mm
- Aussendradius  $r_a$ : 330 mm
- Durchmesser Bohrung  $d_B$ : 60 mm

In Abbildung 5.8 wird das verwendete Modell veranschaulicht.

Als Randbedingung erhält die Struktur innerhalb der Durchgangsbohrung eine Lagerung, die nur die Bewegung in axialer Richtung beschränkt, in radialer Richtung kann sich die Struktur frei ausdehnen. Zusätzlich wird die Struktur mit einer Drehfrequenz von 200 Hz belastet. Die Beschleunigung auf diese Geschwindigkeit wird dabei nicht betrachtet. Die Lösung wird quasi-statisch durchgeführt.



**Abbildung 5.8.:** Geometrisches-Modell der FE-Simulation. Aussendradius  $r_a$ : 330 mm, Radius Durchgangsbohrung  $r_{i1}$ : 30 mm.

### 5.3.3. Auswertungskriterium

Die Struktur wird darauf untersucht, ob die Festigkeit des Verbundes genügt, um ein Versagen während des Betriebs auszuschließen.

Bei isotropen Werkstoffen wird in der Regel eine Festigkeitshypothese genutzt um eine Vergleichsspannung  $\sigma_v$  zu berechnen. Diese wird anschließend mit der zulässigen Spannung  $\sigma_{zul}$  verglichen. Als Festigkeitshypothese dient in vielen Fällen die von-Mises Vergleichsspannung.

$$\sigma_{v,M} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_x\sigma_z - \sigma_y\sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (5.37)$$

Bei Faserverbundmaterialien muss aufgrund der Anisotropie und der zu Metallen unterschiedlichen Versagensarten auf andere Kriterien zurückgegriffen werden. Eins davon ist das Versagenskriterium nach "Max-Stress". Dieses Kriterium berechnet mithilfe der richtungsabhängigen zulässigen Spannungen einen Wert, mit dem man Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit treffen kann. Nimmt der berechnete Fehlerindex einen Wert über 1 an, kann von einem Versagen der Struktur ausgegangen werden. [38]

Der Fehlerindex nach Max-Stress setzt sich wie folgt zusammen [39]:

$$F = \max \left| \frac{\sigma_{11}}{S_{11}^+}, \frac{\sigma_{11}}{S_{11}^-}, \frac{\sigma_{22}}{S_{22}^+}, \frac{\sigma_{22}}{S_{22}^-}, \frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right| \quad (5.38)$$

mit:

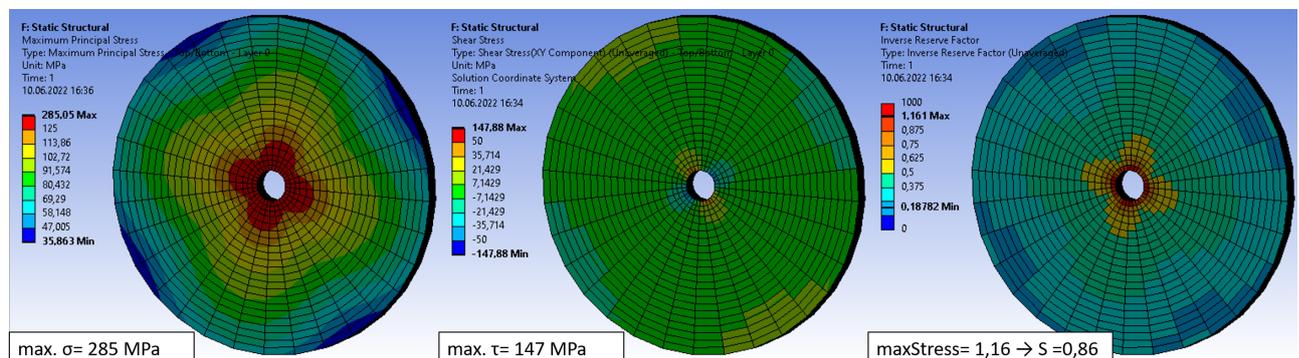
- $S_{11}^+$ : Zugfestigkeit parallel zur Faser
- $S_{11}^-$ : Druckfestigkeit parallel zur Faser
- $S_{22}^+$ : Zugfestigkeit senkrecht zur Faser
- $S_{22}^-$ : Druckfestigkeit senkrecht zur Faser
- $S_{12}$ : Scherfestigkeit

Da CFC ein faserbasierendes Material ist, können unterschiedliche Fasern je nach Art Anwendung eingesetzt werden. Die Eigenschaften der Fasern können sich dabei sehr variieren [32][40][41][42]. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf eine Zugfestigkeit von 250 MPa, eine Druckfestigkeit von 150 MPa und auf eine Scherfestigkeit von 50 MPa.

#### 5.3.4. Ergebnisse FE-Simulation

Die Auswertung der Spannungen und des Fehlerindex (Max-Stress) (Abbildung 5.9) zeigen, dass die FE-Simulation ähnliche Ergebnisse wie die analytische Betrachtung liefert. Dies ist ein Indiz dafür, dass das zugrundeliegende Modell valide aufgebaut ist. Die Auswertung des Fehlerindex zeigt auf, dass in der ganzen Struktur großflächig ein Sicherheitswert von über 2 vorliegt. Lediglich im Bereich der Bohrung kommt es zu Spannungskonzentrationen und einem Unterschreiten des Sicherheitswertes unter 1 ( $S = 0,8$ ). Im Weiteren ist es zu untersuchen, wie sich die Festigkeit in diesem Bereich verbessern lässt. Dennoch lassen die Ergebnisse der ersten Simulation darauf schließen, dass die prinzipielle

Nutzung von CFC unter den gegebenen Betriebsbedingungen eine vielversprechende Lösung darstellt. Im nachfolgenden Abschnitt wird das Design nochmals erweitert.



**Abbildung 5.9.:** Spannungsanalyse einer Scheibe aus CFC während eines Betriebs mit 200 Hz. Betrachtung der maximalen Normalspannungen (links), Betrachtung der Scherspannungen (mitte), Betrachtung des Sicherheitsfaktors nach "max. Stress"(rechts).

## 5.4. Designerweiterung

Die bereits erlangten Ergebnisse zeigen, dass um die Bohrung eine Spannungskonzentration auftritt und dass der Sicherheitswert in diesem Bereich unter 1 fällt. Aus diesem Anlass wird das simple Anfangsdesign erneut betrachtet. Im Bereich um die Bohrung wird eine Verstärkung eingebracht, zusätzlich zu der Verringerung der Spannungen hat die Verstärkung den Vorteil, dass die Scheibe dadurch besser zentriert werden kann. Abbildung 5.10 zeigt den Spannungsverlauf, den Fehlerindex nach Max-Stress und die Verformung für den Fall, dass eine einseitige Verstärkung vorgenommen wird. Das Resultat der einseitigen Verstärkung ist, dass die Steifigkeit der Scheibe nicht mehr symmetrisch ist. Dies hat zur Folge, dass sich die Elemente auf der Seite ohne Verstärkung weiter ausdehnen als die Elemente auf der verstärkten Seite. Das heißt, die Scheibe erfährt eine Biegung und die dadurch entstehenden zusätzlichen Spannungen verschlechtern das Gesamtergebnis. Durch das zusätzliche Aufbringen einer Verstärkung auf der Rückseite lässt sich die Symmetrie wiederherstellen und die Ergebnisse sind deutlich besser als im ursprünglichen Design (Abbildung 5.11). Durch die Verstärkungen konnte der Sicherheitswert von 0,8 auf 1,33 erhöht werden. Die Spannungsbetrachtung zeigt, dass die maximalen Spannungen konzentrisch um die Verstärkungen liegen, dies ist mit dem Steifigkeitssprung zwischen dem verstärkten und dem nicht verstärkten Bereich zu erklären. Um den Spannungsverlauf und den damit einhergehenden Sicherheitsfaktor weiter zu verbessern, können zu einem mehrere Gewebelagen zu einem Paket zusammen genäht werden, was die Scherfestigkeit des Laminats erhöht, zum anderem kann die Verstärkung fasergerechter designt werden. Zu diesem Zweck kann das Laminat in diesem Bereich stufenförmig umgesetzt werden. Dadurch wird ein abrupter Steifigkeitssprung vermieden. Der erneute Blick auf das Design zeigt auf, dass mittels einfacher Überlegungen das Design verbessert

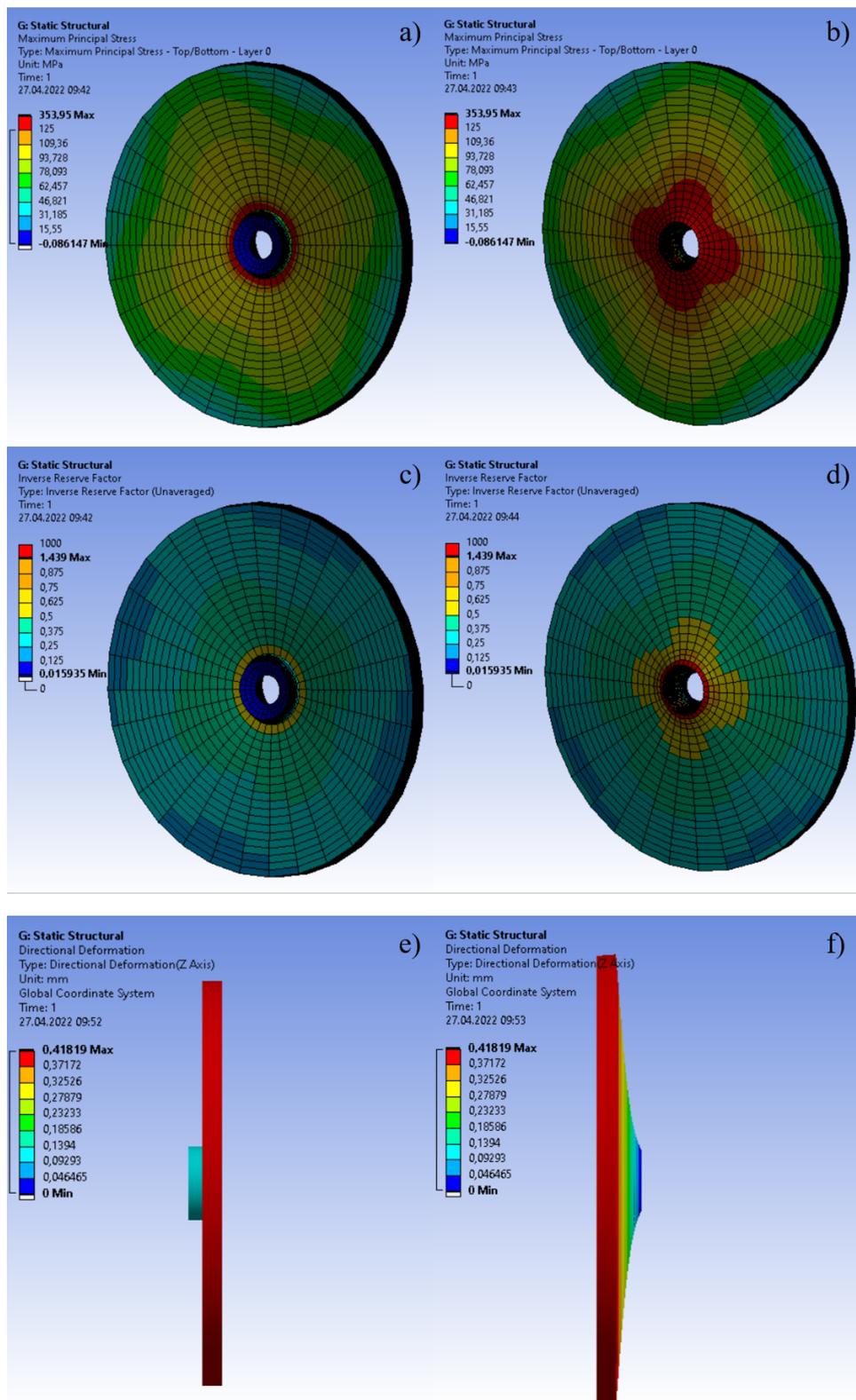
werden kann. Durch eine Verstärkung mit einem weicheren Übergang nähert sich das Design wieder an die Scheibe gleicher Festigkeit an. Eine optimale Geometrie wird in der Praxis eine Mischung aus den beiden vorgestellten Varianten sein.

## 5.5. Anmerkung

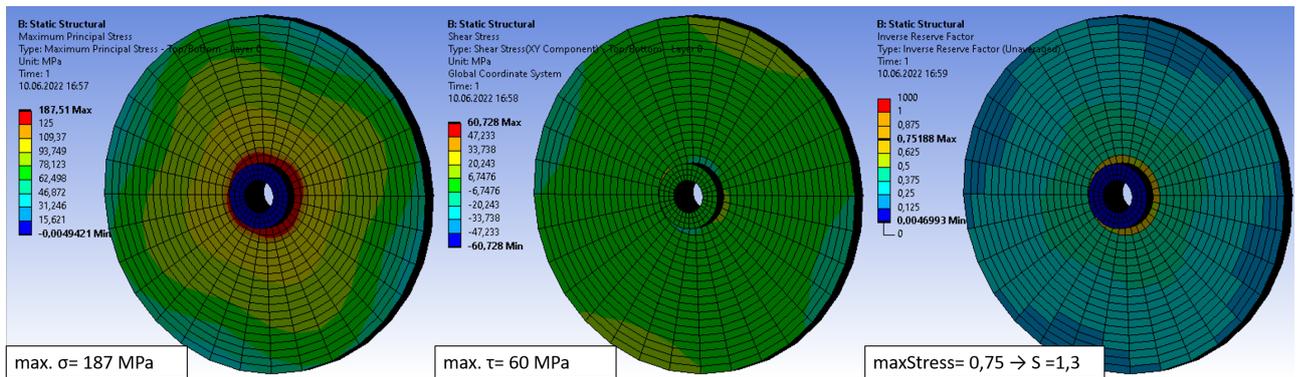
Mithilfe der FE-Simulation lassen sich ideale Laminare (d.h. perfekt symmetrische Laminare mit vordefinierten Faser-Winkeln) aufbauen und untersuchen. Diese idealen Laminare spiegeln in vielen Fällen nicht die Realität wieder. Durch Positionierungsfehler der einzelnen Gewebelagen kann es zu Winkel Fehlern kommen und durch die vom Material vorgegebenen Lagendicke können gegebenenfalls nicht alle Laminatdicken symmetrisch aufgebaut werden. Abbildung 5.12 zeigt ein mögliches Verformungsbild durch Imperfektion innerhalb des Laminats. Solche Verformungen könnten während des Betriebes zu unerwünschten Schwingungen und zum Versagen des Systems führen. Daher muss unter Absprache mit dem Fertigungspartner während der Herstellung auf ausreichende Genauigkeit geachtet und zusätzlich ein Konzept zur Wuchtung der Scheibe erarbeitet werden.

## 5.6. Zusammenfassung Trägerstruktur

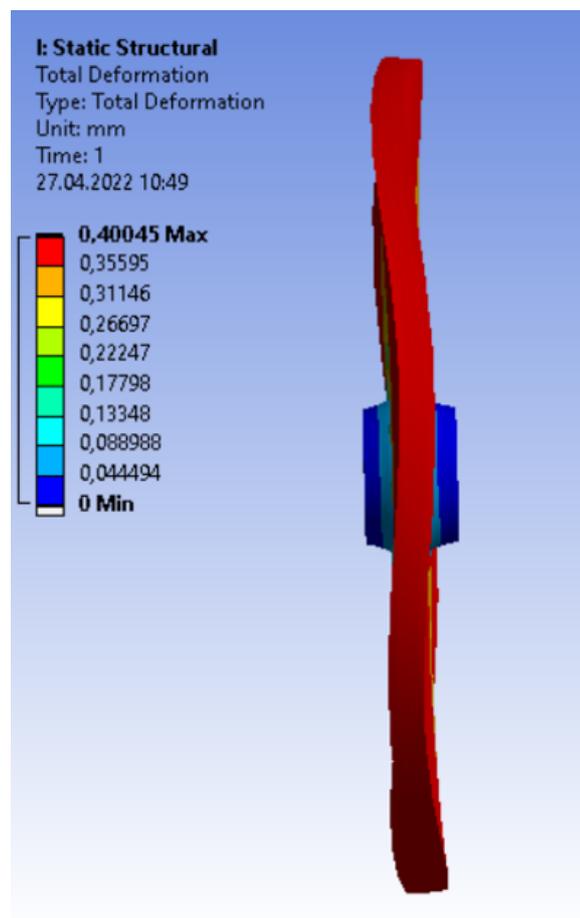
Dieses Kapitel befasste sich mit verschiedenen Aspekten der Entwicklung der Trägerstruktur. Im ersten Schritt wurden verschiedene Materialien unter anderem mithilfe von Ashby-Plots auf ihre generelle Tauglichkeit als Werkstoff für die Trägerstruktur untersucht. Aus dieser Betrachtung ging hervor, dass sich das auf Kohlenstofffasern basierende Material CFC und der Werkstoff Graphit sich am besten für die Anwendung eignen. Im Weiterem wurden mittels analytischer Ansätze verschiedene Geometrien rotierender Scheiben betrachtet. Diese Analyse wies auf, dass eine Scheibe aus CFC, unter der Einhaltung der vorher definierten Randbedingungen, die höchste Umfangsgeschwindigkeit erzielen kann. Die Scheibe aus CFC hat demnach einen Radius von  $334\text{ mm}$ , ein Gewicht von  $20\text{ kg}$  und kann während eines Betriebs mit  $200\text{ Hz}$  eine Umfangsgeschwindigkeit von  $419\text{ m/s}$  erreichen. Zur Absicherung dieser Ergebnisse wurden FE-Simulationen mit anisotropen Materialmodell aufgebaut und durchgeführt. Die Resultate dieser Simulationen lassen darauf schließen, dass die prinzipielle Nutzung von CFC als Trägerstruktur-Werkstoff unter den gegebenen Betriebsbedingungen eine vielversprechende Lösung darstellt.



**Abbildung 5.10.:** Spannungsanalyse mittels Fe-Simulation. a) und b): Betrachtung der entstehenden Normalspannungen aufgrund einseitiger Versteifung. c) und d): Betrachtung des resultierenden Sicherheitsfaktors nach "max. Stess". e) und f): Betrachtung des Verformungsbildes. Maximale Normalspannung: 353 MPa, Sicherheitsfaktor: 0,71.



**Abbildung 5.11.:** Spannungsanalyse einer Scheibe aus CFC mit zusätzlicher Verstärkung während eines Betriebs mit 200 Hz. Betrachtung der maximalen Normalspannungen (links), Betrachtung der Scherspannungen (mitte), Betrachtung des Sicherheitsfaktors nach "max. Stress"(rechts).



**Abbildung 5.12.:** Mögliches Verformungsbild aufgrund fehlerhafter Fertigung.

## 6. Brennbahn

Nachdem im letzten Kapitel die grundlegende Geometrie der Trägerstruktur bestimmt wurde, kann in diesem Kapitel die Brennbahn dieser ausgelegt werden. Die Brennbahn der Drehanode bildet das Herzstück der Anode. Sie hat die wichtige Funktion der Erzeugung der Röntgenstrahlung. Zur Auslegung der Brennbahn wird analog zum vorherigen Kapitel vorgegangen. Zunächst werden Materialien auf Basis der vorgegebenen Anforderungen auf ihre Tauglichkeit untersucht. Im Weiteren wird die Brennbahn analytisch und mithilfe von FE-Simulationen weiter ausgelegt. Ziel ist es, Material und Schichtdicke der Brennbahn festzulegen und Aussagen über Temperaturbeständigkeit und Betriebsbedingungen zu treffen.

### 6.1. Materialauswahl Brennbahn

Die Brennbahn wird direkt dem Elektronenstrahl ausgesetzt. Daher erfährt die Brennbahn extreme thermische Belastungen. Ein ideales Brennbahnmaterial kann anhand der folgenden vier Auswahlkriterien bestimmt werden.

**Schmelztemperatur**  $T_{schmelz}$  Die Schmelztemperatur ist ein Auswahlkriterium, welches die Anzahl an möglichen Materialien bereits stark einschränkt. Sie ist ein Maß dafür wie lang und mit wie viel Leistung am Stück eine Anode betrieben werden kann. Zur genaueren Auswahl werden nur Materialien und Legierungen betrachtet, die einen Schmelzpunkt oberhalb von 2000 °C aufweisen.

#### **Röntgenumwandlungseffizienz**

Der Erzeugungswirkungsgrad  $\eta$  von Röntgenbremsstrahlung hängt maßgeblich von der Ordnungszahl  $Z$  des Anodenmaterials und der Röntgenröhrenspannung  $U_B$  ab. Der Wirkungsgrad lässt sich annähernd beschreiben mit [43][44]:

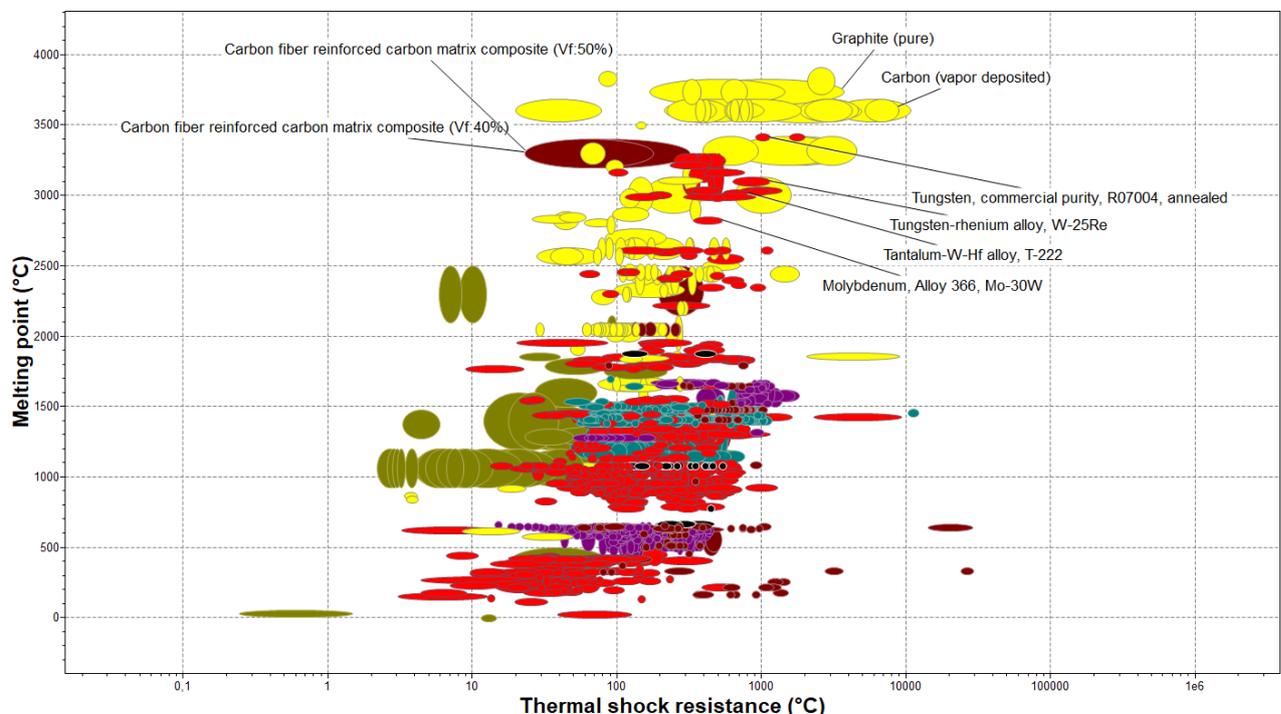
$$\eta \approx 10^{-9} \cdot Z \cdot U_B \quad (6.39)$$

Bei der in dieser Arbeit vorgegebenen Beschleunigungsspannung von  $600 \text{ kV}$  ergeben sich für Kohlenstoff (Z:6), Molybdän (Z:42) und Wolfram (Z:74) Effizienzen von 0,36 %, 2,5 % und 4,4 %. Aus diesem Zusammenhang lässt sich schließen, dass die Elemente mit einer ähnlichen Ordnungszahl wie der von Wolfram besonders effizient wären.

**Thermoschockresistenz  $R$**  Durch die Umfangsgeschwindigkeit von  $419 \text{ m/s}$  und der Brennfleckbreite von  $50 \text{ }\mu\text{m}$  erfährt das Material im Brennpunkt eine Temperaturhub von mehreren hundert Kelvin in ca.  $1e^{-7} \text{ s}$ . Dieser Lastfall beschreibt einen extremen Temperaturschock. Der Thermoschockresistenzwert  $R_{th}$

$$R_{th} = \frac{\sigma_{zul}}{E\alpha} \quad (6.40)$$

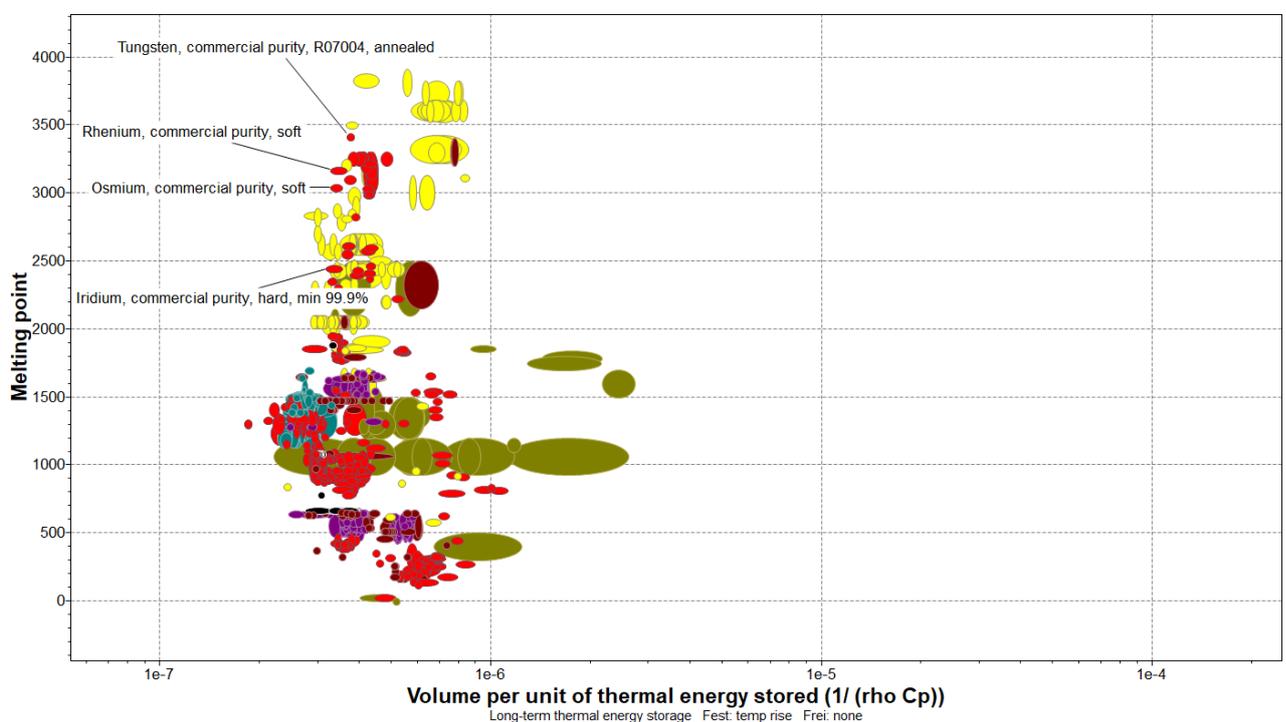
beschreibt eine Temperatur, anhand welcher unterschiedliche Materialien verglichen werden können. Diese Temperatur gibt ungefähr an, ab welcher Temperaturdifferenz es zur Schädigung des Werkstücks kommen kann [33]. Je höher der Wert ausfällt, desto thermoschockresistenter ist ein Material. Da sich dieser Wert aber auf das schockartige Abkühlen z.B in Wasser oder Öl bezieht[33], dient er in dieser Arbeit nur als grobe Richtungsangabe. Dennoch lässt sich aus dem Vergleich (Abbildung 6.1) auf eine Tauglichkeit von Wolfram und dessen Legierungen schließen.



**Abbildung 6.1.:** Ashby-Plot 5, Brennbahn-Materialvorauswahl: Vergleich von Materialien aus den Gruppen: Keramiken und Gläser, Metalle und Legierungen und aus den Verbundwerkstoffen (Stufe 3). Vergleich der Materialeigenschaften Material-Schmelztemperatur und Material-Thermoschockresistenz (Datenbank:Granta EDUPack 2021R).

### Wärmekapazitätslimit Tauglichkeit

Die Temperaturdifferenz nach Bartzsch (Gleichung 2.2.2) hängt von den materialspezifischen Dichte  $\rho$  und Wärmekapazität  $c$  ab. Je höher das Produkt dieser beiden Parameter ist, desto geringer fällt die Temperaturdifferenz aus. Daher wird das Produkt dieser Parameter als neuer Leistungsindex definiert. Die Materialdatenbank CES EDUPACK2022 bietet den Kehrwert dieses Wertes als vordefinierten Leistungsindex (Abbildung 6.2) an. In dem gezeigtem Ashby-Plot sind verschiedene Materialien aufgezeigt, die sich aufgrund von Schmelztemperatur, Verarbeitbarkeit und dem Produkt aus Dichte und spezifischer Wärmekapazität als Brennbahnmaterial eignen.



**Abbildung 6.2.:** Ashby-Plot 6, Brennbahn-Materialvorauswahl: Vergleich von Materialien aus den Gruppen: Keramiken und Gläser, Metalle und Legierungen und aus den Verbundwerkstoffen (Stufe 3). Vergleich der Materialeigenschaften Material-Schmelztemperatur und Material-Wärmekapazitätslimittauglichkeit ( $\rho^{-1}c^{-1}$ ) (Datenbank:Granta EDUPack 2021R).

**Zwischenfazit** Im Laufe dieses Kapitels wurden bisher vier Auswahlkriterien beschrieben und verschiedene Materialien dahingehend untersucht, welche die Kriterien am besten erfüllen. Die Betrachtung anhand der Schmelztemperatur zeigt auf, dass schon aufgrund der erwartbaren Temperaturen ein Großteil der möglichen Materialien ausgeschlossen werden kann. Wolfram hat von den Metallen die höchste Schmelztemperatur und weist eine sehr gute Thermoschock-Beständigkeit auf. Besonders im Hinblick auf die Röntgenumwandlungseffizienz sind die Elemente rund um Wolfram den Elementen niedriger Ordnungszahlen deutlich überlegen und auch das Verhältnis von Dichte zur Wärmekapazität beeinflusst die Temperaturdifferenz positiv. Die Betrachtung dieser vier Kriterien spiegelt die aktuellen

technische Umsetzungen gut wider. Durch die hervorragenden Eigenschaften von Wolfram und dem relativ niedrigen Preis gegenüber den anderen hochschmelzenden Elementen, basieren heutige Brennbahnen aus diesem bzw. aus dessen Legierungen [14][15]. Die am häufigsten verwendete Legierungen in diesem Anwendungsbereich sind Wolfram-Rhenium Legierungen [15][3]. Durch das Beimischen von wenigen Prozent Rhenium erhöht sich die Duktilität und die Dauerfestigkeit des Wolframs deutlich [45][20]. Aufgrund des durchgeführten Materialvergleichs und der Praxistauglichkeit von Wolfram bzw. von Wolfram-Rhenium Legierungen wird empfohlen, die Brennbahn der Drehanode für den Einsatz in einer Linienfokus-Röntgenröhre aus Wolfram-Rhenium Legierungen zu fertigen. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass die mechanischen Materialeigenschaften von Wolfram und dessen Legierungen stark von dem Verformungsgrad abhängig sind und starke Schwankungen aufweisen können. [33][46]. So können die Festigkeiten von reinem Wolfram zwischen 400-4700 MPa je nach Verarbeitung annehmen. [33] [47][17] Tabelle 6.1 stellt die wichtigsten Materialeigenschaften von Wolfram und Wolfram-Rhenium Legierungen bei Raumtemperatur gegenüber. Aus der Literatur ergeben sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Materialdaten, sodass bei Anwendungen, die an die Grenzen des Materials gehen sollen, Vorversuche unabdingbar sind.

Im Weiterem wird sich bei der Auslegung der Brennbahn, unter der Annahme, dass durch das Hinzufügen von Rhenium die Materialeigenschaften positiv beeinflusst werden, auf die Materialdaten von reinem Wolfram bezogen, da die Informationslage dafür deutlich umfangreicher ist.

**Tabelle 6.1.:** Materialeigenschaften für Wolfram und Wolfram-Rhenium Legierungen [18].

Eigenschaft / Material		W (Standard)	W (PVD)	W-Re6% (CVD)	W-Re10% (PM)
Dichte	$\text{g/cm}^3$	19,2	16-18	19,4	19
Thermischer Ausdehnungskoeffizient (25 °C)	$\mu\text{m/mK}$	4,5	4,7	5,3	5,1
Thermische Leitfähigkeit (25 °C)	$\text{W/mK}$	173	155	170	77
Wärmekapazität (25 °C)	$\text{J/gK}$	0,13	0,13	0,13	0,13
E-Modul (25 °C)	$\text{GPa}$	410	270-290	410	375

## 6.2. Analytische Betrachtung

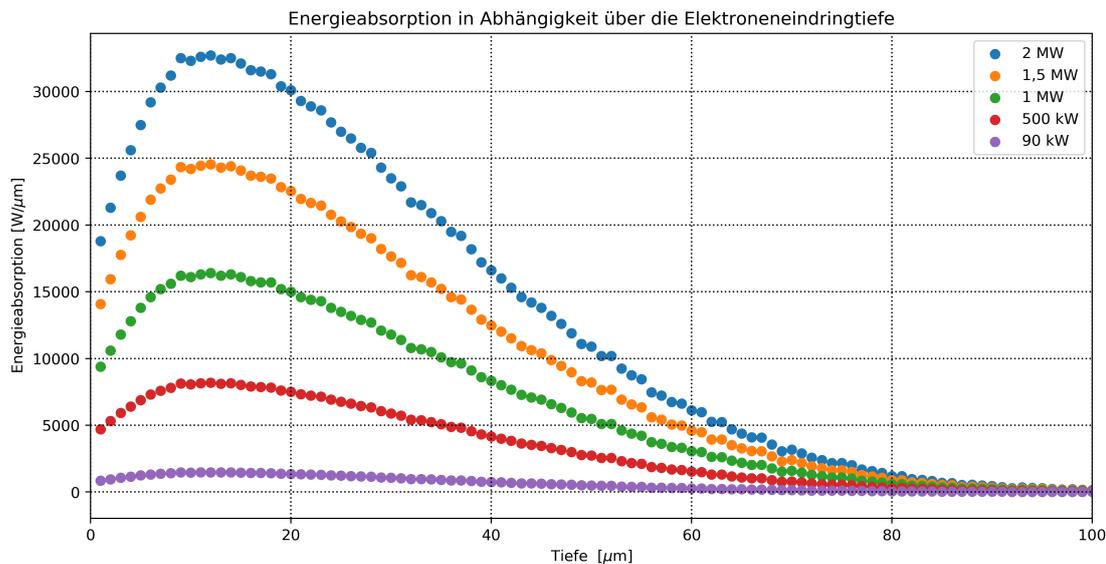
Im folgenden werden die zu erwartenden Temperaturen und Spannungen auf analytischer Basis betrachtet.

### Temperaturhub

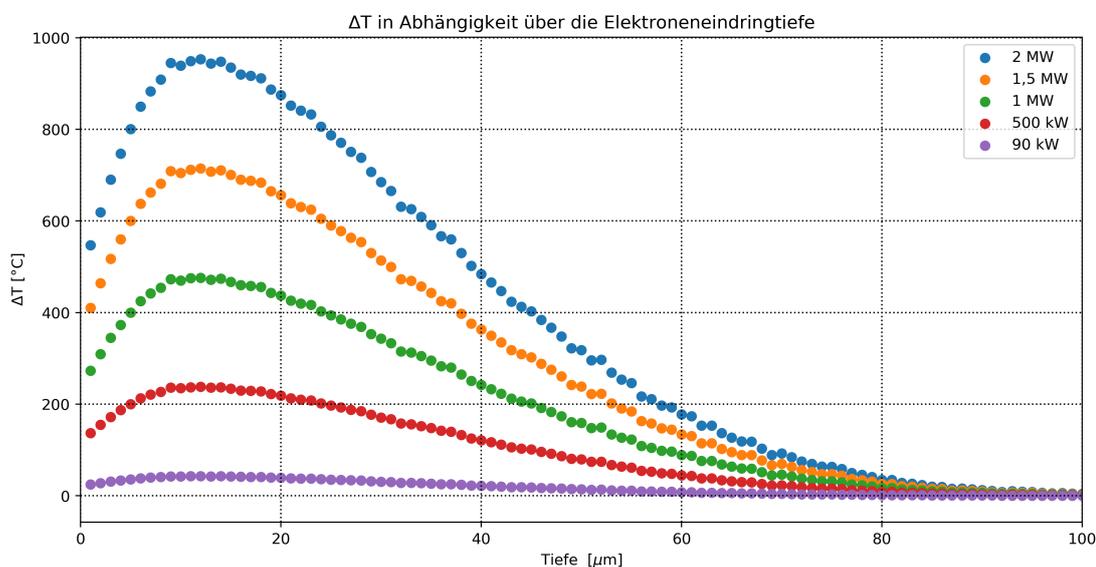
Die analytische Betrachtung der Brennbahn stellt eine große Herausforderung da  $r$ , die in der Regel numerisch gelöst wird. Dennoch lassen sich analytische Vorbetrachtungen durchführen, anhand denen das FE-Modell im nächsten Schritt auf dessen Plausibilität geprüft werden kann. Eine vom Helmholtz Zentrum München<sup>1</sup> bereitgestellte Monte-Carlo-Simulation untersuchte die Energieabsorption über die Eindringtiefe von hochenergetischen Elektronen für eine Beschleunigungsspannung von  $600 \text{ keV}$  (Abbildung 6.3 für verschiedene Leistungen in Wolfram. Aus dieser Simulation lassen sich über die Temperaturdifferenz nach Bartzsch, die zu erwartenden Temperaturdifferenzen ermitteln (Abbildung 6.4). Für die in dieser Arbeit angestrebten  $1,5 \text{ MW}$  und der vorermittelten Umfangsgeschwindigkeit von  $419 \text{ m/s}$  ergibt sich ein ungefährender Temperaturhub von ca.  $700 \text{ °K}$ . Dabei ist zu erwähnen, dass die Maximaltemperatur nicht auf der Oberfläche des Targets auftritt, sondern in einer Tiefe von ca.  $15 \text{ }\mu\text{m}$ . Dieser Temperaturhub beschreibt die Temperaturdifferenz, die das Material im Brennfleck bei jeder Umdrehung erfährt. Zwischen zwei Umdrehungen kühlt das Material wieder ab und gibt in Form von Strahlung Energie an die Umgebung und über Wärmeleitfähigkeit an die restliche Anodenstruktur weiter. Durch die starke instationarität dieses Szenarios lässt sich der Temperaturverlauf über mehrere Umdrehungen nicht ohne Weiteres per Hand lösen.

---

<sup>1</sup>Helmholtz Zentrum München GmbH, German Research Center for Environmental Health, Institute of Radiation Medicine, Neuherberg, Germany



**Abbildung 6.3.:** Energieabsorption über Elektroneneindringtiefe innerhalb einer Brennbahn aus Wolfram. Beschleunigungsspannung: 600 kV, Elektronenstrahlleistung: 90 kW-2 MW [48].



**Abbildung 6.4.:** Ermittelte Temperaturdifferenz nach dem Wärmekapazitätslimit in Abhängigkeit der Elektroneneindringtiefe. Beschleunigungsspannung: 600 kV, Elektronenstrahlleistung: 90 kW-2 MW, Umfangsgeschwindigkeit: 419 m/s, Brennbahnmaterial: Wolfram.

## Thermospannung

Die Brennbahn ist vielen plötzlichen Temperaturänderungen ausgesetzt. Die Betrachtung der Thermospannungen ist ein wichtiger Schritt zur Dimensionierung der Brennbahn. Die Thermospannungen

hängen dabei von drei verschiedenen Randbedingungen ab [28]:

- Materialeigenschaften:
  - Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha$
  - elastische Konstanten  $E$  und  $\nu$
  - Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$
  - spezifische Wärmekapazität  $C$
  - Dichte  $\rho$
- Geometrische Randbedingungen
- Thermische Randbedingungen

Zur Bestimmung der thermischen Spannungen durch eine plötzliche Temperaturänderung wird ein nicht stationärer Fall betrachtet. Hierbei wird angenommen, dass eine Platte, welche die Anfangstemperatur  $T_0$  besitzt auf einer Seite eine Temperaturerhöhung auf  $T_1$  erfährt. Es wird angenommen, dass die Oberfläche sofort die Temperatur  $T_1$  annimmt, während der Rest der Platte weiterhin eine Temperatur von  $T_0$  aufweist. Weiterhin wird angenommen, dass sich die Platte nur in z-Richtung aber nicht in x- und y-Richtung ausdehnen kann. Die dadurch resultierenden Spannungen und Dehnungen können durch folgende Gleichungen beschrieben werden [28]:

$$\epsilon_x = -\alpha(T_1 - T_0) = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad (6.41)$$

$$\epsilon_y = -\alpha(T_1 - T_0) = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad (6.42)$$

Die Spannungen ergeben sich dem nach mit:

$$\sigma_x = \sigma_y = -\frac{\alpha E(T_1 - T_0)}{1 - \nu} \quad (6.43)$$

mit den Materialeigenschaften von Wolfram und einem Temperaturhub von 700 °C belaufen sich die Spannungen auf:

$$\sigma_{Th} = \frac{4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} 400 \times 10^9 \text{ Pa} 700 \text{ K}}{1 - 0,29} = 1774,64 \times 10^6 \text{ Pa} \approx 1800 \text{ MPa}$$

Die Aussagekraft dieser Berechnung lässt sich jedoch stark anzweifeln. Durch den hohen Temperaturhub kann nicht mehr mit konstanten Materialeigenschaften gerechnet werden, sodass mit den Temperaturabhängigkeiten gerechnet werden muss [45][49]. Einen besonders großen Effekt hat die Temperatur auf die Festigkeit von Wolfram. Ist Wolfram bei Raumtemperatur ein relativ sprödes Material, so bekommt es bei der sogenannten "Brittle to Ductile" Temperatur ein weitaus duktileres Verhalten [50]. Diese Temperatur liegt bei reinem Wolfram bei ca. 300 °C [50]. Demnach lassen sich durch diese Vorbetrachtung keine aussagekräftigen Schlüsse ziehen.

### 6.3. FE-Simulation Brennbahn

In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche Simulationen betrachtet. Die erste hat das Ziel, eine optimale Dicke der Brennbahn zu bestimmen und die zweite Simulation dient dazu, Aussagen über den Temperatur- und Spannungsverlauf innerhalb des Brennbahn- Trägerstrukturverbundes treffen zu können. Im Weiteren wird das temperaturabhängige Materialmodell von Wolfram eingeführt, das für beide Simulationen genutzt wird und zusätzlich wird erläutert, wie der Energieeintrag durch den Elektronenstrahl in beiden Modellen umgesetzt wird. Anschließend werden beide Simulationen separat betrachtet und ausgewertet.

#### 6.3.1. Materialmodell Wolfram

Wie schon bei der analytischen Betrachtung erwähnt, verändern sich die Materialeigenschaften von Wolfram mit zunehmender Temperatur, sodass nicht mit konstanten Werten gerechnet werden kann. Das in diesen Simulationen verwendete Modell berücksichtigt die nachfolgenden temperaturabhängigen Materialeigenschaften:

- E-Modul(T) (Tabelle 6.2)
- Plastischesverhalten(T) (Tabelle 6.3)
- Wärmeleitfähigkeit(T) (Tabelle 6.4)
- Thermischer Ausdehnungskoeffizient(T) (Tabelle 6.5)
- Spezifische Wärmekapazität(T) (Tabelle 6.6)

Zwischen den einzelnen Datenpunkten wird, während der Simulation, linear interpoliert.

**Tabelle 6.2.:** Material: Wolfram. Elastizitäts-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur [45][51].

<b>T</b> [ $^{\circ}C$ ]	<b>E-Modul</b> [ $GPa$ ]
22	400
200	400
1400	350
2000	280
2400	160

**Tabelle 6.3.:** Material: Wolfram. Plastisches Dehnungsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur [52].

500 $^{\circ}C$		600 $^{\circ}C$	
true Stess [MPa]	plastic Strain [%]	true Stess [MPa]	plastic Strain [%]
320	0	320	0
480	0,005	450	0,005
550	0,015	520	0,015
630	0,045	600	0,045
760	0,195	730	0,195

800 $^{\circ}C$		1000 $^{\circ}C$	
true Stess [MPa]	plastic Strain [%]	true Stess [MPa]	plastic Strain [%]
320	0	320	0
400	0,005	380	0,005
440	0,015	400	0,195
490	0,045		
500	0,195		

**Tabelle 6.4.:** Material: Wolfram. Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur [45].

T [ $^{\circ}C$ ]	$\lambda$ [ $W/mK$ ]
-273,15	200
0	170
22	170
200	153
400	136
600	125
800	120
1500	115
3000	115

**Tabelle 6.5.:** Material: Wolfram. Thermischer Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperatur [45].

T [ $^{\circ}C$ ]	$\alpha$ [ $\mu m/m$ ]
22	4,4
200	4,4
400	4,5
1400	5,1

**Tabelle 6.6.:** Material: Wolfram. Spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur [45].

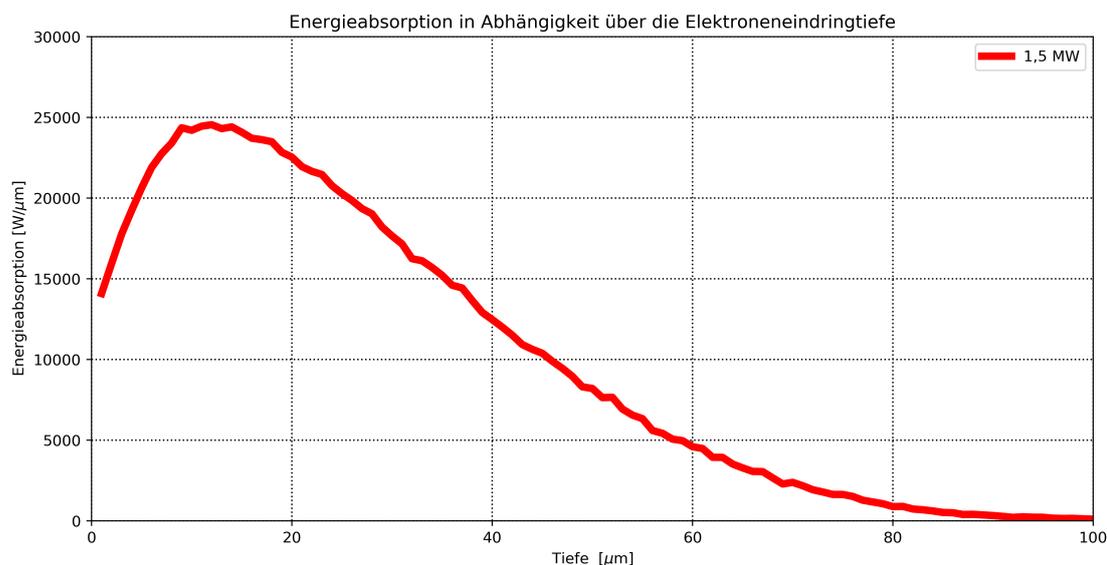
T [ $^{\circ}C$ ]	Spezifische Wärmekapazität [ $J/kgK$ ]
22	138
1100	160
3000	195
3500	350

### 6.3.2. Brennfleckmodellierung

In dieser Arbeit wird erstmals, zur Entwicklung einer Röntgenanode, die Elektroneneindringtiefe und das damit einhergehende Wärmekapazitätslimit berücksichtigt. Das heißt, die Energieabgabe der Elektronen wird nicht wie üblich als Fläche, sondern als Volumen angenommen.

Der in dieser Arbeit behandelte Elektronenstrahl besitzt bei einer Beschleunigungsspannung von 600 kV und einem Strom von 2,5 A eine Leistung von 1,5 MW und die Energieabsorption in der

Tiefe bezieht sich auf die 1-D Monte-Carlo Simulation, durchgeführt vom Helmholtz-Zentrum München<sup>2</sup> (Abbildung 6.5). Die Ergebnisse dieser Simulation zeigen zunächst, dass nicht die gesamten 1,5 MW in das Material eindringen. Durch die Rückstreuung mancher Elektronen beläuft sich die effektive Leistung auf ca. 1 MW (-33%).



**Abbildung 6.5.:** Ergebnisse einer Monte-Carlo Simulation zur Untersuchung der Energieabsorption in Wolfram bei einer Beschleunigungsspannung von 600 kV und einer Elektronenstrahlleistung von 1,5 MW [48].

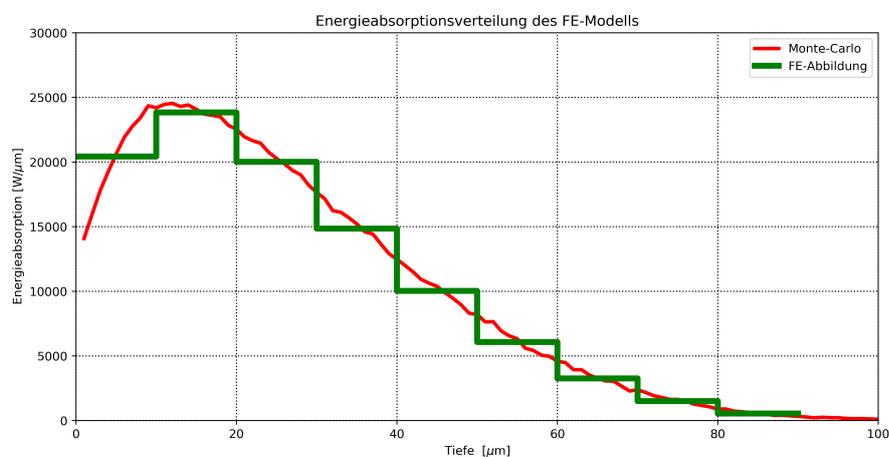
Der Berechnungs-Solver bietet die Möglichkeit, einzelnen Elementen eine *HeatGeneration* mit der Einheit [ $W/mm^3$ ], also eine Leistung pro Volumen zuzuweisen. Durch die vorgegebene Brennfleck-Geometrie von  $50 \mu m \times 30 mm$  und der ungefähren effektiven Elektroneneindringtiefe von  $90 \mu m$  ergibt sich eine Leistung pro Volumen von  $\approx 7,4 MW/mm^3$ . Nach der Gleichung des Wärmekapazitätslimits (Gleichung 2.2.2) kann mit einem mittleren Temperaturanstieg von  $\approx 325 \text{ }^\circ K$  gerechnet werden.

Doch durch das Ergebnis der Monte-Carlo Simulation, lässt sich eine Inhomogenität im Verlauf der Energieabsorption feststellen. Diese Inhomogenität ist so stark ausgeprägt, dass nicht mit einem Mittelwert der Eindringtiefe gerechnet werden kann, ohne das lokale Temperaturmaximum zu vernachlässigen. Daher wird der Brennfleck in der Tiefe nicht nur mit einem, sondern mit mehreren Elementen abgebildet. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation lassen es theoretisch zu, den Brennfleck auf  $1 \mu m$  genau abzubilden, aber aus praktischen Gründen ist dies nicht ratsam.

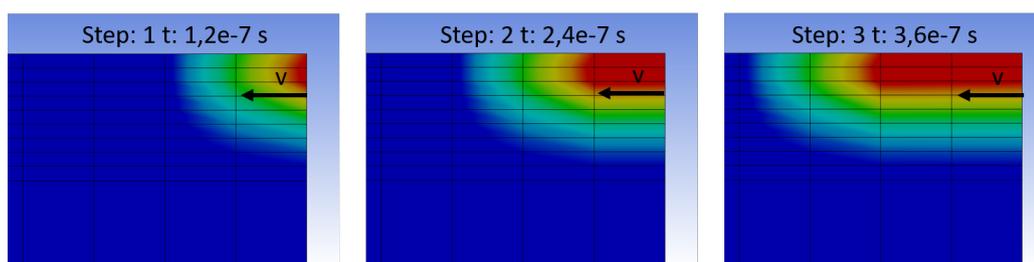
In Bezug auf Anzahl der Elemente bzw. der damit einhergehenden Rechenzeit und der Genauigkeit

<sup>2</sup>Helmholtz Zentrum München GmbH, German Research Center for Environmental Health, Institute of Radiation Medicine, Neuherberg, Germany

der Abbildung, wird der Brennfleck in der Tiefe mit 9 Elemente mit einer Dicke von jeweils  $10\ \mu\text{m}$  aufgelöst, sodass sich eine Energieverteilung nach Abbildung 6.6 ergibt. Mit diesem Stand ist es möglich, eine statische Simulation in Anlehnung an eine Stehanode durchzuführen. Um nun eine Drehanode abbilden zu können, muss eine Bewegung mit ins System eingefügt werden. Anstatt, dass die Anode eine Bewegung erfährt, wird in diesem Modell die Wärmequelle über das Target bewegt. Für diesen Zweck wurde ein APDL (ANSYS Parametric Design Language) Skript verfasst (s. Anhang). Dieses ermöglicht, dass sich die Wärmequelle schrittweise über das Target bewegt und für jeden Schritt eine Lösung berechnet wird (Abbildung 6.7).



**Abbildung 6.6.:** Abbildung des Elektronenstrahls ( $P:1,5\ \text{MW}$ ,  $U_B: 600\ \text{kV}$ ) mit einer Auflösung von neun Finiten-Elementen über der Tiefe.



**Abbildung 6.7.:** Veranschaulichung der inkrementellen Bewegung der Wärmequelle zur Abbildung des Brennfleckes während des Betriebs.

Aufgrund der schrittweisen Betrachtung der Brennbahnteilstücke und dem Größenverhältnisses zwischen der Brennfleckbreite von  $50\ \mu\text{m}$  und dem gesamten Brennbahnumfang von ca.  $2073\ \text{mm}$  werden in diesen Simulationen ausschließlich Ersatzmodelle mit einer Breite von  $0,75\ \text{mm}$ , was der Breite von 15 Brandflecken entspricht, betrachtet. Die Leistungseinbringung erfolgt in mehreren Intervallen, wobei die Zeit  $t_{Brenn}$  die Zeit ist in der sich der Elektronenstrahl über dem Ersatzmodell befindet und die Zeit  $t_{Abkhl}$  in welcher der Elektronenstrahl die Zeit abwartet die er für die restliche Umdrehung

benötigen würde. Das Skript ist dabei so parametrisiert, dass verschiedene Szenarien untersucht werden können. Der Tabelle 6.7 lassen sich alle Input-Parameter des Skriptes mit allen Werten für die in diesem Kapitel durchgeführten Simulationen entnehmen.

**Tabelle 6.7.:** APDL-Input-Parameter der Brennflecksimulation

Parameter Elektronenstrahl			Simulationsparameter		
max. Eindringtiefe	90	$\mu m$	Umfangsgeschwindigkeit	419	m/s
Auflösung der Tiefe	9	Elemente	Drehfrequenz	200	Hz
Element Dicke	10	$\mu m$	Ersatzmodellbreite	0,75	mm
Brennfleckbreite	50	$\mu m$	$t_{Brenn}$	1,70E-06	s
Brennfleklänge	30	mm	$t_{Abkhl}$	0,005	s
Heat-Genaeation Elektronenstrahl					
1. Element	2,04E+05	$W/m^3$			
2. Element	2,23E+05	$W/m^3$			
3. Element	2,00E+05	$W/m^3$			
4. Element	1,49E+05	$W/m^3$			
5. Element	1,00E+05	$W/m^3$			
6. Element	6,08E+04	$W/m^3$			
7. Element	3,26E+04	$W/m^3$			
8. Element	1,51E+04	$W/m^3$			
9. Element	5,45E+03	$W/m^3$			

### 6.3.3. Auslegung Brennbahndicke

Die erste Simulation befasst sich mit dem Ziel der Ermittlung einer idealen Brennbahndicke. Die Brennbahn hat nicht nur den Zweck, Röntgenstrahlung zu erzeugen, sondern auch das Material, welches unter der Brennbahn liegt vor Thermoschocks und der Wechselbelastung durch Auf- und Abkühlung zu schützen.

#### Geometrisches Modell

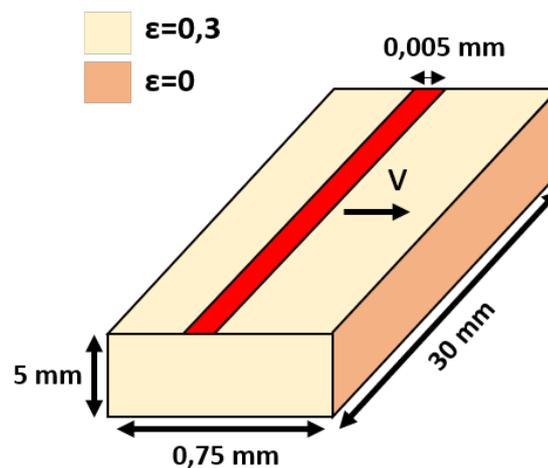
Für die erste Simulation wird ein Ersatzmodell in Form eines Blockes mit einer Tiefe von 5 mm einer Länge von 30 mm und einer Breite von 0,75 mm, was einer Länge von 15 Brennflecken entspricht, erstellt.

## Materialmodell

Der betrachtete Block besteht aus reinem Wolfram. Die temperaturabhängigen Materialeigenschaften können den Tabellen 6.2 - 6.6 entnommen werden.

## Lastfall und Randbedingungen

Der Wolframblock erfährt insgesamt drei Intervalle der Energieeinbringung. Der Elektronenstrahl hat dabei eine Leistung von  $1,5\text{ MW}$  und bewegt sich mit einer lateralen Geschwindigkeit von  $419\text{ m/s}$  über das Modell. Als thermische Randbedingungen werden auf den Außenseiten des Blockes der thermische Austausch mittels Strahlung mit einem Emissionswert von  $0,3$  [17] ermöglicht. Die Schnittebenen in Bewegungsrichtung erlauben keinen Wärmeaustausch. Die Abbildung 6.8 zeigt den Schematischen Aufbau des Simulationsmodells.

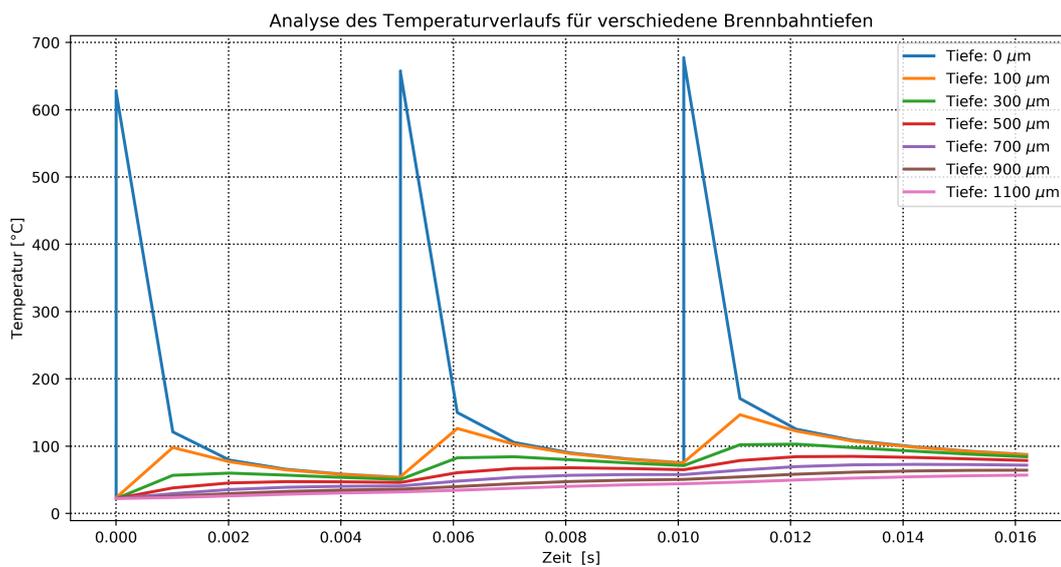


**Abbildung 6.8.:** Schematische Aufbau des Simulationsmodells zur Auslegung einer optimalen Brennbahndicke. Die farbliche Markierung zeigt, an welchen Flächen des Blockes Wärmestrahlung mit der Umgebung ausgetauscht werden kann.

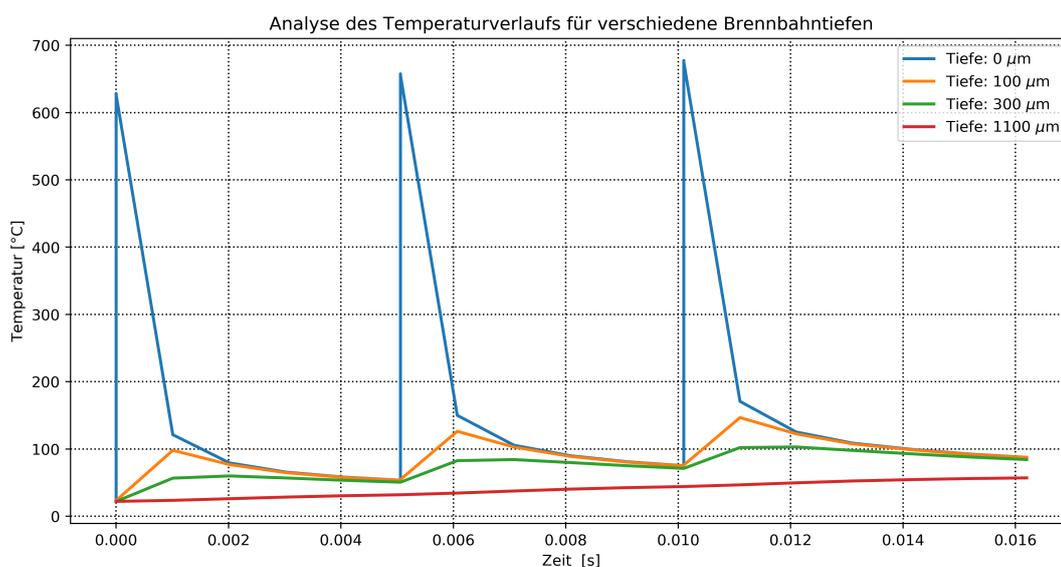
## Ergebnis Brennbahndicke

Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse der Simulation auf. In diesem Plot sind die Temperaturverläufe in verschiedenen Tiefen aufgetragen. Dabei bezieht sich die Tiefe auf den Abstand zur Oberfläche. Der Graph *Brennfleck* (blau) gibt die Oberflächentemperatur wider. Mit dieser Simulation lässt sich zunächst feststellen, dass mit der Abbildung des Elektronenstrahles die generierte Temperatur sehr gut mit der erwarteten Temperatur korreliert. Des Weiteren kann gesehen werden, dass die Oberfläche sich nach einer Umdrehung um fast 85 % wieder abkühlt. Ob es sich dabei um ein konstantes Verhalten handelt, muss über eine längere Simulationszeit geklärt werden. Die weiteren Graphen geben die Temperaturverläufe in  $200\ \mu\text{m}$  Schritten, angefangen bei  $100\ \mu\text{m}$ , unter der Oberfläche wider. Sieht

man bei den Graphen bis 500  $\mu\text{m}$  Tiefe noch einen deutlich schwankenden Temperaturgradienten, so lässt sich zwischen 900 und 1100  $\mu\text{m}$  keine merkliche Schwankung mehr feststellen (Abbildung 6.10). Zusammenfassend lässt sich aus diesen Ergebnissen schlussfolgern, dass zum Schutz des unter der Brennbahn liegenden Materials vor thermischen Schocks und Wechselbelastungen eine Brennbahndicke von ca. 1 mm ideal wäre.



**Abbildung 6.9.:** Ergebnisse der Simulation zur Auslegung der optimalen Brennbahndicke. Die angegebenen Tiefen beziehen sich auf den Abstand zur Brennbahnoberfläche.



**Abbildung 6.10.:** Ergebnisse der Simulation zur Auslegung der optimalen Brennbahndicke. Betrachtung des linearen Temperaturverlaufs in einer Tiefe von 1100  $\mu\text{m}$ . Die angegebenen Tiefen beziehen sich auf den Abstand zur Brennbahnoberfläche.

Mit einer Dicke von 1 *mm* fällt die Brennbahn nicht mehr generell unter die Dicke der Dünnschichttechnologien [53]. Dennoch zeigen Arbeiten wie die von der Firma Acerde [14], dass auch Wolfram-Rhenium-Schichten mit ähnlichen Dicken über das CVD-Verfahren (chemical vapour deposition) fertigbar sind. Alternativ würden sich bei solchen Dicken Verfahren der Gruppe des thermischen Spritzens anbieten. Welches Verfahren zur Herstellung dieser Schichtdicken genutzt werden soll, muss unter Berücksichtigung von Kosten und der Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften sowie der Materialeigenschaften der so erzeugten Schichten getroffen werden. Da die Literatur für den Werkstoffverbund CFC/Wolfram-Rhenium sehr gering ausfällt wird an dieser Stelle empfohlen, mehrere Proben im kleinem Maßstab für die Bestimmung und den Vergleich der Schichteigenschaften anzufertigen.

#### 6.3.4. Analyse Brennbahn

Durch die vorhergegangene Simulation konnte die Brennbahndicke bestimmt werden, ab der ein gleichmäßiger Temperaturanstieg vorliegt. Um nun Aussagen über den Temperaturverlauf für längere Bestrahlungen und den Spannungszustand innerhalb der Brennbahn treffen zu können, wird ein Ersatzmodell aufgebaut, welches die Targetscheibe aus CFC mit abbildet. Schon in der vorherigen Simulation war zu sehen, dass nach 16  $\mu s$  ein Temperaturanstieg in einer Tiefe von über 1 *mm* festzustellen war. Da CFC andere thermische Eigenschaften hat, muss bei einer längeren Betrachtung die Trägerstruktur aus CFC mitberücksichtigt werden. Dasselbe gilt für eine Spannungsbetrachtung. Mit ca. 400 *GPa* hat Wolfram eine deutliche höhere Steifigkeit als das CFC. Hinzu kommt, dass das CFC eine Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften aufweist. Aus diesen Gegebenheiten wird ersichtlich, dass ein zusätzliches Modell benötigt wird.

#### Geometrisches Modell

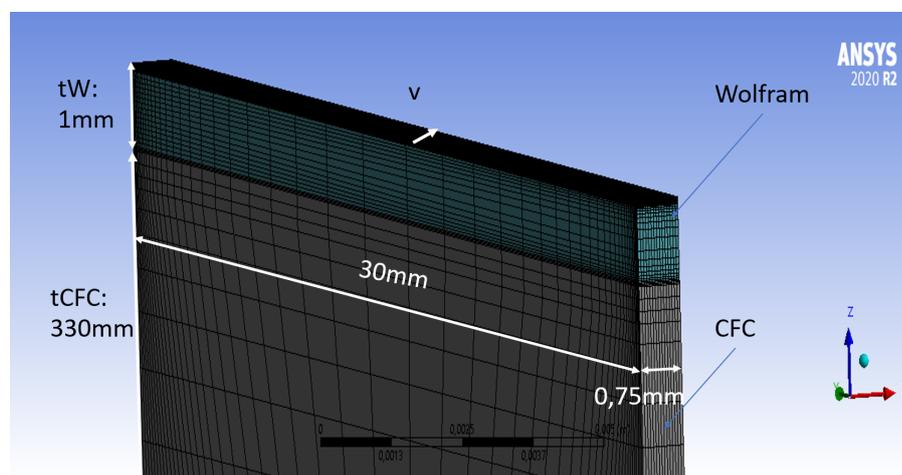
Für den Zweck der Simulation wird auch hier wieder ein Ersatzmodell erstellt, das der Abbildung von 15 Brennflecken entspricht. Das Modell besteht aus zwei Körpern, der Brennbahn und dem Targetteller. Der Brennbahnkörper besteht aus einem Wolframkörper mit einer Breite von 30 *mm*, einer Länge von 0,75 *mm* und einer Tiefe von 1 *mm*. Die Targetscheibe wird über einen CFC-Körper mit einer Länge von 30 *mm*, einer Breite von 0,75 *mm* und einer Tiefe von 330 *mm* dargestellt (Abbildung 6.11).

#### Materialmodell

Die verwendeten Materialmodelle für diese Simulation können für CFC dem Kapitel 5.3.1 und für Wolfram dem Kapitel 6.3.1 entnommen werden.

### Lastfall und Randbedingungen

Die zu betrachtende Struktur erfährt insgesamt 200 Intervalle der Energieeinbringung mit anschließender Abkühlzeit. Dies entspricht einer gesamt Simulationszeit von 1 s. Der Elektronenstrahl hat dabei eine Leistung von 1,5 MW und bewegt sich mit einer lateralen Geschwindigkeit von 419 m/s über das Modell. Als thermische Randbedingung wird auf den Außenseiten des Blockes der thermische Austausch mittels Strahlung mit einem Emissionswert von 0,3 (Wolfram) [17] und einem Wert von 0,8 (CFC)[32] ermöglicht. Die Schnittebenen in Bewegungsrichtung erlauben keinen Wärmeaustausch. Für die Ermittlung der Spannungen und Dehnungen werden zusätzlich Bewegungsrestriktionen eingeführt. Den Knoten auf den Schnittebenen wird die Bewegungsfreiheit in x-Richtung eingeschränkt. Dadurch ist dem Material nur eine Ausdehnung in x- und z-Richtung möglich.

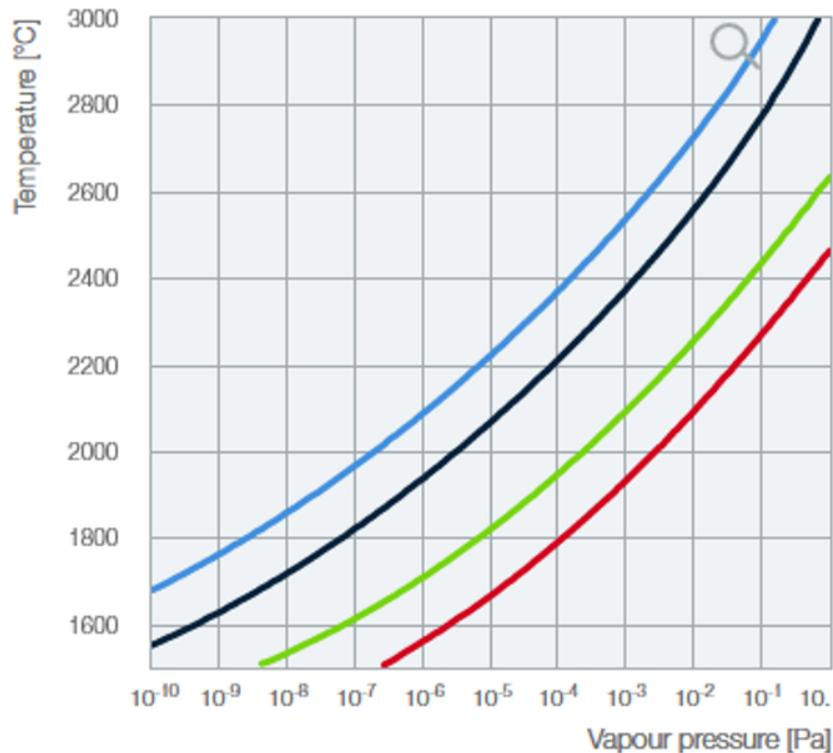


**Abbildung 6.11.:** Geometrisches Modell zur Analyse der Spannungs- und Temperaturverläufe innerhalb der Brennbahn.

### Auswertekriterium

In der nachfolgenden Simulation werden sowohl die thermischen Verläufe als auch die Spannungsverläufe über die Zeit in verschiedenen Tiefen des Materials untersucht. Als erstes Versagenskriterium der Struktur wird die Temperatur eingeführt, bei der Wolfram bei einem Umgebungsdruck von  $10^{-5}$  Pa beginnt auszugasen. Die Temperatur liegt nach Abbildung 6.12 bei ca. 2200 °C. Durch die dabei freigesetzten Wolframatomen verschlechtert sich die Vakuumumgebung so, dass sich das auf die Leistung der Röntgenröhre auswirken würde. Daher gilt die Grenze von 2200 °C als maximale Temperatur, die auf der Oberfläche erreicht werden darf. Zusätzlich wird die Temperatur an der Grenzfläche zwischen Wolfram und CFC untersucht. Aus der Literatur ist bekannt, dass sich Wolframcarbide (WC) durch Diffusionsprozesse ab einer Temperatur von 1400 °C vermehrt bilden [54] [55] [18]. Da sich die Materialeigenschaften von Wolfram zu Wolframcarbide stark voneinander unterscheiden und Wolframcarbide deutlich spröder und anfälliger gegen Thermoschocks ist, gilt es die Entstehung dieser zu vermeiden.

Für die Spannungsbetrachtung werden die Hauptnormalspannungen innerhalb des Brennfleckes ausgewertet und in Zusammenhang mit der Dauerfestigkeit von Wolfram gesetzt.



**Abbildung 6.12.:** Dampfdrücke für hoch schmelzende Metalle. Blau: Wolfram, schwarz: Tantal, grün: Niob, rot: Molybdän. Die Dampfdrucktemperatur von Wolfram in einer Umgebung von  $10^{-5}$  Pa liegt bei ca.  $2200$  °C [56].

### Ergebnis Spannungsbetrachtung

Um eine Aussage über den Spannungsverlauf treffen zu können, werden zunächst die Hauptnormalspannungen innerhalb der Brennbahn über drei Temperaturhübe untersucht (Abbildung 6.13-6.15). Die Ergebnisse zeigen, dass es durch die Bestrahlung des Elektronenstrahls und die darauf folgende Abkühlung zu starken Wechselbelastungen durch Zug und Druckspannungen kommt. Dabei fällt auf, dass die Normalspannung in z-Richtung deutlich geringer ausfällt, als in den beiden anderen Richtungen. Dies ist durch die fast uneingeschränkte Ausdehnungsmöglichkeit in z-Richtung zu erklären. Die Spannungen der x- und y-Richtungen liegen beide in einem Bereich von  $\pm 600$  MPa. In der Literatur und verschiedenen Materialdatenblättern lassen sich Dauerfestigkeitswerte für wechselnde Belastungen von 200-600 MPa finden [33][20][57]. Die Aussagekraft der Spannungsbetrachtung mittels FE-Methode ist an dieser Stelle sehr kritisch zu hinterfragen. Sowohl auf Grundlage der Simulationsbedingungen als auch der materialspezifischen Eigenschaften lassen sich anhand der Ergebnisse keine Aussagen über eine mögliche Dauerfestigkeit der Brennbahn unter diesen Betriebsbedingungen treffen. In der

vorliegenden Simulation wird eine Temperatur von 22 °C berücksichtigt, bei der ein spannungsfreier Zustand herrscht. Dies ist in der Realität nicht der Fall. Je nach Füge- und Beschichtungsverfahren liegen grundsätzlich andere Spannungszustände vor. Bevor eine Aussage mittels FE-Methode getroffen werden kann, muss die Frage nach dem Fertigungsverfahren diskutiert werden. Darüber hinaus können sich je nach Fertigungsverfahren die Materialeigenschaften von Wolfram drastisch unterscheiden [20] [46], [57], sodass auch das im FE-Modell genutzte Materialmodell der Fertigungstechnik angepasst werden muss. Ebenfalls muss erwähnt werden, dass die Energieeinwirkung und die damit einhergehende Wechselbelastung innerhalb von ca. 100 ns erfolgt. Solch eine Dynamik war in diesem Zusammenhang bisher noch kein Bestandteil von Studien.

Um eine Aussage über Dauerbeständigkeit der Brennbahn treffen zu können, wird empfohlen, Vorversuche im kleinen Maßstab mit dem Ziel durchzuführen, die Dauerfestigkeit verschiedener Beschichtungs- und Fügeverfahren zu charakterisieren. Zusätzlich soll untersucht werden, ob das Vorwärmen des Systems auf die "brittle to ductile"-Temperatur von Wolfram (ca. 300 °C) einen zusätzlichen positiven Effekt mit sich bringt.

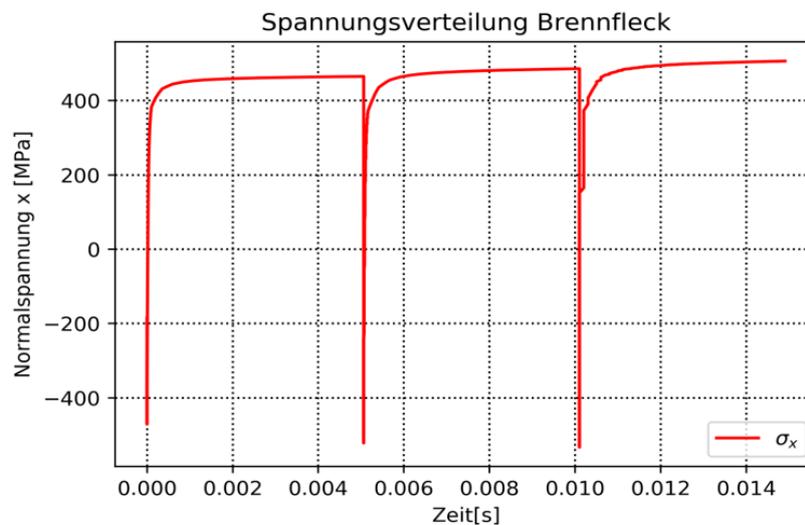


Abbildung 6.13.: Verlauf der Hauptnormalspannung in x-Richtung innerhalb eines Brennbahnteilstückes.

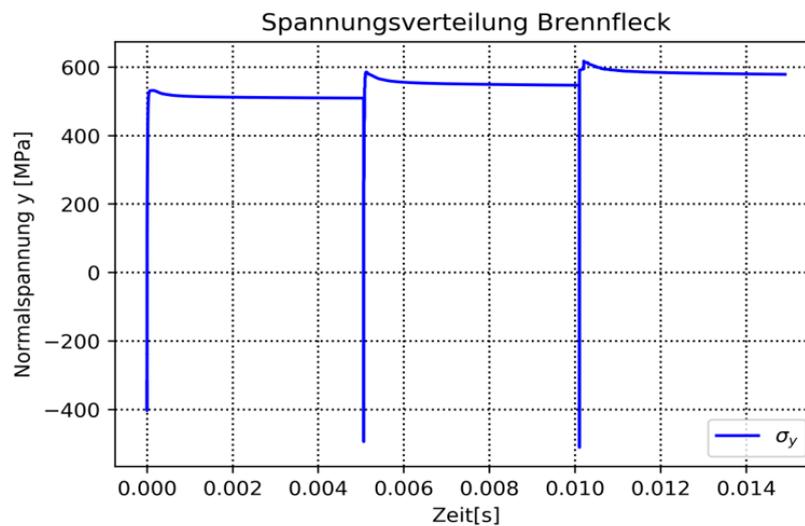


Abbildung 6.14.: Verlauf der Hauptnormalspannung in y-Richtung innerhalb eines Brennbahnstücks.

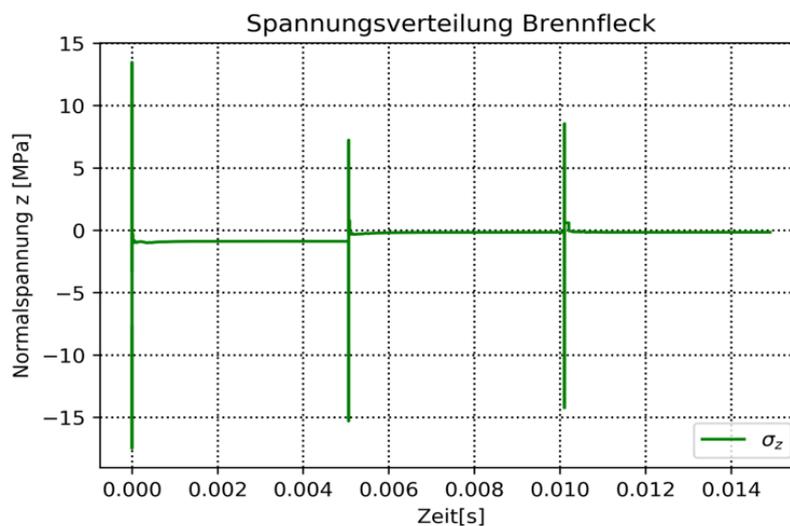


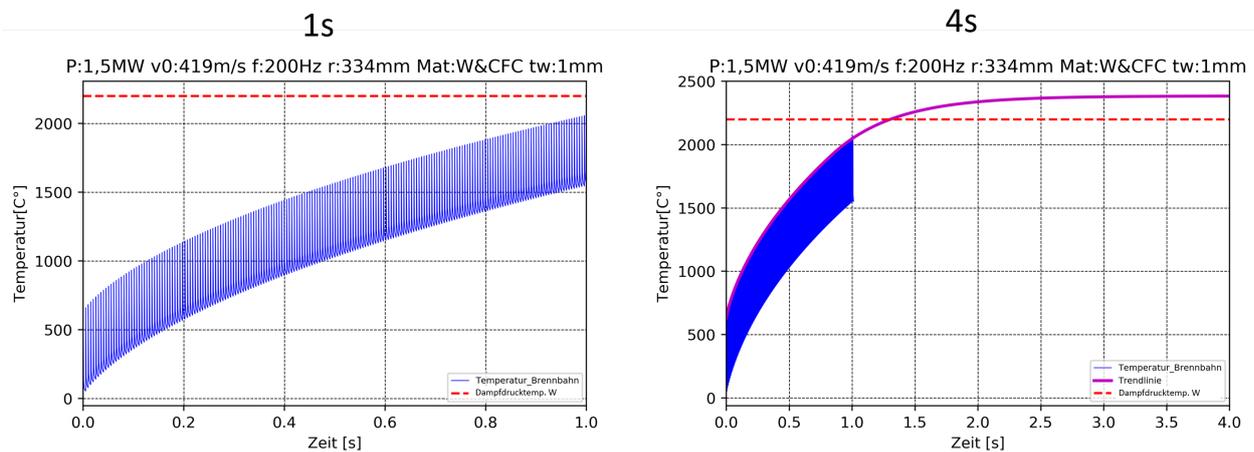
Abbildung 6.15.: Verlauf der Hauptnormalspannung in z-Richtung innerhalb eines Brennbahnstücks.

### Ergebnis thermische Betrachtung

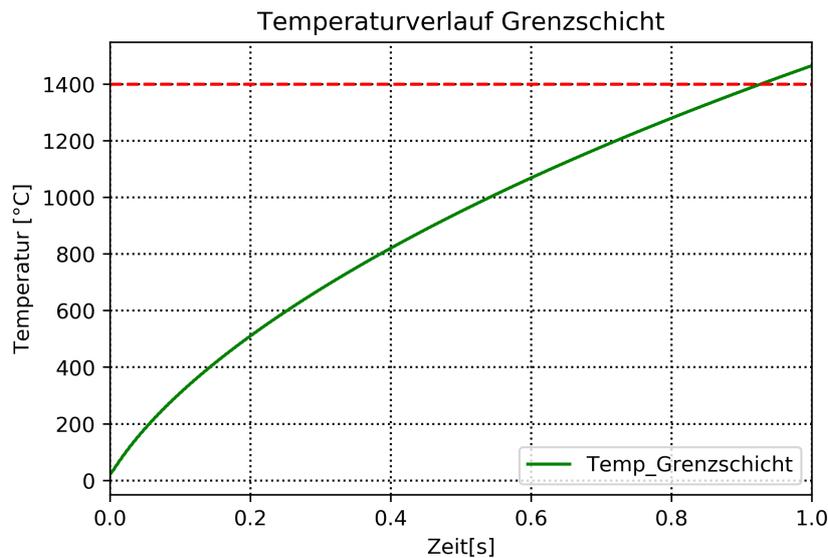
Die Abbildung 6.16 zeigt den Temperaturverlauf im Brennfleck für eine Gesamtsimulationszeit von 1 s. Die mit rot markierte Temperatur kennzeichnet die Verdampfungstemperatur von Wolfram bei einem Umgebungsdruck von  $10^{-5} \text{ Pa}$  (2200 °C). Sieht es bis zu einer Betrachtung von 0,1 s noch so aus, als würde die Temperatur linear steigen, lässt sich bei einer längeren Betrachtung erkennen, dass die Brennflecktemperatur anfängt zu konvergieren. Nach einer Simulationszeit von 1 s wurde die Temperatur von 2200 °C noch nicht erreicht, sodass über einen numerischen Extrapolationsansatz die Kurve bis zu einer Zeit von 4 s erweitert wird. Aus dieser Betrachtung geht hervor, dass nach einer Zeit von ca. 1,4 s die maximal erlaubte Temperatur überschritten wird und dass sich ab ca. 2,5 s

ein thermisches Gleichgewicht oberhalb der 2200 °C ( ca. 2400 °C) einstellt. Darüber hinaus lässt sich beobachten, dass die Temperatur an der Grenzfläche die Temperatur von 1400 °C überschreitet (Abbildung 6.17). Die Simulation hat zum Ergebnis, dass eine Bestrahlung mit einer Dauer von ca. 1,4 Sekunden aus thermischer Sicht generell möglich ist. Auch unter Berücksichtigung eines möglichen Vorheiz-Prozesses auf die "brittle to ductile"-Temperatur von Wolfram (ca. 300-400 °C, kann die mindest Anforderung an die Bestrahlungszeit von mindestens 1 s gewährleistet werden.

Um denn noch längere Bestrahlungen zu ermöglichen, müssen die in Kapitel 5 aufgeführten Design-Restriktionen (Gewicht und Drehfrequenz) angepasst werden oder der Betriebsmodus des Elektronenstrahls angepasst werden. Zusätzlich muss wegen dem Überschreiten der Grenzflächentemperatur von 1400 °C zwischen der CFC-Targetscheibe und der Wolfram Brennbahn eine diffusionshemmende Barriere eingebracht werden.



**Abbildung 6.16.:** Ergebnisse der FE-Simulation zur Betrachtung des Temperaturverlaufs innerhalb eines Brennbahn-Teilstückes. Simulationsergebnisse über eine Simualtionszeit von 1 s (links). Extrapolation der Simulationsergebnisse auf eine Gesamtzeit von 4 s(rechts). Verlauf der Brennbahntemperatur (blau), Markierung der Dampfdrucktemperatur von Wolfram in einer Druckumgebung von  $10^{-5}$  Pa (rot).



**Abbildung 6.17.:** Temperaturverlauf im Bereich der Kontaktzone zwischen Brennbahn und Trägerstruktur. Markierung der Temperatur der erhöhten Wolframcarbiddbildung (rot).

### 6.3.5. Variation des Betriebsmodus

Durch die erste thermische Betrachtung der Brennbahn im Dauerbetrieb konnte nachgewiesen werden, dass die Brennbahn nach ca. 1,4 s eine kritische Oberflächentemperatur von 2200 °C erreicht. Um dennoch eine längere Bestrahlungszeit erzielen zu können und ohne die definierten Design-Rstriktionen ändern zu müssen, werden in diesem Abschnitt zwei unterschiedliche Betriebsmodi vorgestellt, die das Ziel haben, eine längere Betriebsdauer zu ermöglichen.

#### Betriebsmodus 1:

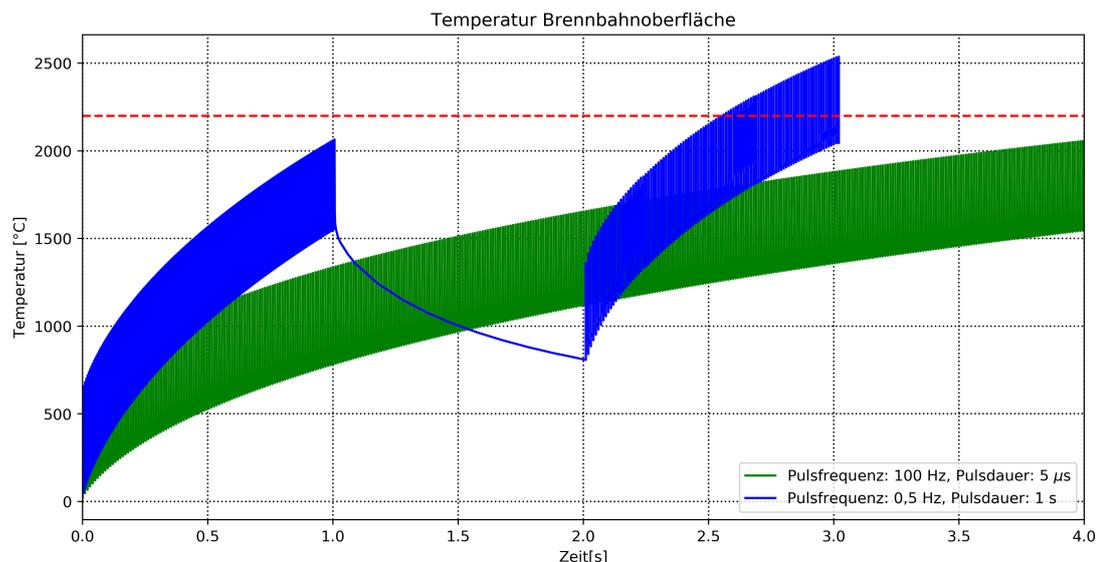
Pulsung des Elektronenstrahls mit einer Frequenz von 100 Hz und einer Pulsdauer von 5  $\mu$ s.

#### Betriebsmodus 2:

Pulsung des Elektronenstrahls mit einer Frequenz von 0,5 Hz und einer Pulsdauer von 1 s.

Die Analysen der beiden Betriebsmodi zeigen vielversprechende Ergebnisse auf (Abbildung 6.18). Durch das Pulsieren des Elektronenstrahles mit einer Frequenz vom 100 Hz fällt der Temperaturverlauf deutlich flacher aus als bei dem Dauerbetrieb. So ist es mit diesem Betriebsmodus möglich, bei einer Bestrahlung von 4 s unter einer Temperatur von 2200 °C (max Temp.  $\approx$  2100 °C) zu bleiben. Dennoch liegt dabei kein thermisches Gleichgewicht vor, sodass ein noch längerer Betrieb zur Folge hätte, dass die Temperatur über die kritische Temperatur schreitet. Betriebsmodus 2 schneidet gegenüber dem Ersten schlechter ab. Durch die Abkühlzeit von 1 s kann sich die Oberfläche um ca. 700 °C abkühlen. Diese s Abkühlen reicht aber nicht, um nochmals ein Bestrahlungsintervall von 1 s zu überstehen ( max. Temp. 2500 °C). Im Abkühlungsverlauf lässt sich schon eine Konvergenz erkennen, die mit der

abnehmenden Strahlungskühlung zu erklären ist. Eine längere Abkühlphase wird demnach ineffizienter. Als Ergebnis dieser Betrachtung lässt sich zusammenfassen, dass durch Pulsung des Elektronenstrahls die Betriebsdauer deutlich erhöht werden kann. Durch weitere Anpassung bzw. der Kombination aus Pulsung und aktiver Abkühlzeit könnte die Betriebsdauer noch weiter erhöht werden.



**Abbildung 6.18.:** Vergleich zweier Elektronenstrahl-Betriebsmodi. Abbildung des Temperaturverlaufs eines Brennbahnteilstückes. Grün: Betriebsmodus 1, Blau: Betriebsmodus 2.

## 6.4. Zusammenfassung Brennbahn

Im Laufe dieses Kapitels wurden unterschiedliche Aspekte zur Auslegung der Brennbahn betrachtet. Zunächst wurden anhand von verschiedenen Bewertungskriterien mögliche Brennbahnmaterialien miteinander verglichen. Aufgrund der sehr guten Eigenschaften wie der hohen Schmelztemperatur und der hohen Thermoschockbeständigkeit wird empfohlen, die Brennbahn aus Wolfram bzw. aus Wolfram/Rhenium anzufertigen. Zudem ist die Praxisuntauglichkeit von Wolfram/Rhenium für Anwendungen mit geringeren Leistungsdichten bereits bekannt. Im Weiteren wurden verschieden FE-Simulationen aufgebaut und durchgeführt. Eine Besonderheit dieser Simulationen ist die erstmalige Abbildung einer sich bewegenden Elektronenstrahlquelle, die die Energie nicht nur flächig, sondern voluminös ins Material einbringen kann und damit das Phänomen des Wärmekapazitätslimits berücksichtigt. Durch den Vergleich der Simulationsmethoden mit einem flächigen und voluminösen Energieeintrag konnte dargelegt werden, dass die Umsetzungen solch hoher Leistungsdichten in einen realistischen Bereich rücken. Mithilfe dieser Simulation konnte eine Brennbahndicke gefunden werden, ( $\approx 1 \text{ mm}$ ) bei der die thermische Belastung in der Tiefe des Materials von einem stark schwellenden zu

einem homogenen Temperaturverlauf wechselt. Dies hat zur Folge, dass es im Bereich der Grenzfläche zwischen Brennbahn und Targetscheibe zu keinen zusätzlichen Wechselbelastungen durch Ab- und Aufheizung kommt. Durch zusätzliche Simulationen konnte festgestellt werden, dass ein Dauerbetrieb der Anode mit den vorgegebenen Betriebsparametern nicht über  $\approx 1,4$  s gewährleistet ist. Um dennoch eine längere Betriebszeit erzielen zu können, wurden zwei Konzepte mit unterschiedlichen Betriebsmodi untersucht. Diese zeigten vielversprechende Ergebnisse, mit denen sich die Betriebsdauer der Anode erhöhen lässt. Bei der Betrachtung des thermischen Verlaufes im Bereich der Grenzschicht musste festgestellt werden, dass sich dort Temperaturen oberhalb von  $1400$  °C einstellen. Da es bekannt ist, dass es ab dieser Temperatur verstärkt zur unerwünschten Bildung von Wolframcarbid kommt, muss eine zusätzliche Zwischenschicht eingeführt werden die als Diffusionsbarriere agiert [58][59][18]. Zusätzlich zu der thermischen Analyse der Anode wurde auch der Spannungsverlauf im Brennfleck betrachtet. Diese zeigten, dass durch das Herüberfahren des Elektronenstrahls in der Brennbahn Wechselbelastungen von  $\pm 600$  MPa auftreten. Diese Analyse ist aber aufgrund des verwendeten Materialmodelles und den Materialeigenschaften, die in der Realität sehr schwanken können, kritisch zu hinterfragen. Dennoch lässt sich durch diese Analyse feststellen, dass während des Betriebs keine statische, sondern eine hochdynamisch wechselnde Belastung vorliegt. Um eine Aussage über die Dauerfestigkeit der Brennbahn im Verbund mit einer CFC-Struktur treffen zu können, wird empfohlen, verschiedene Vorversuche durchzuführen, um diese zu charakterisieren (Kapitel 8).

## 7. Zwischenschicht

Die Notwendigkeit einer zusätzlichen Schicht zwischen der Wolframbrennbahn und der CFC-Targetscheibe ergibt sich durch die erwarteten Temperaturen im Bereich der Grenzschicht oberhalb von 1400 °C und der damit einhergehenden erhöhten Wolframcarbiddbildung. In Tabelle 7.1 werden die mechanischen und thermischen Materialeigenschaften von Wolfram, CFC und Wolframcarbid miteinander verglichen. Beim Vergleich von Wolfram und Wolframcarbid fällt insbesondere die Abnahme von Dichte, Bruchdehnung und Wärmeleitfähigkeit auf. Durch die temperaturgetriebene Diffusion von Kohlenstoff in Wolfram bildet sich über die Zeit eine sehr spröde Isolationsschicht zwischen Brennbahn und Targetscheibe. Durch die deutliche Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit kommt es zum Wärmestau in der Brennbahn und damit im schlimmsten Fall zur Überhitzung der Brennbahn. Zusätzlich kann es durch die Zunahme des Volumens und der gleichzeitigen Versprödung zum Abplatzen der Brennbahn kommen.

Damit sich ein Material als Zwischenschichtmaterial eignet, müssen folgende Eigenschaften erfüllt sein:

**Tabelle 7.1.:** Materialeigenschaften von Wolfram (W), Wolframcarbid (WC) und CFC [18].

	W	WC	CFC
Dichte [g/mm <sup>3</sup> ]	19,2	15,6	1,9
Ausdehnungskoeffizient [µm/mK]	4,5	5,2	1-8
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	173	29	50
Dehnung	10%	0,1%	-

- Schmelztemperatur: >2000 °C
- Gute Adhäsions-Eigenschaften zu Wolfram und CFC
- Wärmeleitfähigkeit  $\geq$  CFC (Verhinderung von Wärmestau)
- Thermischer Ausdehnungskoeffizient  $0 < \alpha < 8 \times 10^{-6} K^{-1}$
- Unterbindung von Kohlenstoffdiffusion

Zwar ist das Phänomen der unerwünschten Aufkohlung im Zusammenhang mit der Verwendung von

Bauteilen aus Graphit und CFC nicht neu, dennoch bilden diese Anforderungen nochmals einen sehr speziellen Anwendungsfall. Im Weiterem wird auf zwei Techniken, die bereits in der Industrie für ähnliche Anwendungen eingesetzt werden, eingegangen und diskutiert, inwieweit sie sich für die in dieser Arbeit behandelte Anwendung eignen und wie sie gegebenenfalls verbessert werden können.

Alle in diesem Kapitel aufgeführten Bildungsenthalpien sind, wenn nicht anders gekennzeichnet, mit dem Online-Tool Materialsproject<sup>1</sup> ermittelt worden.

## 7.1. Keramik Zwischenschicht

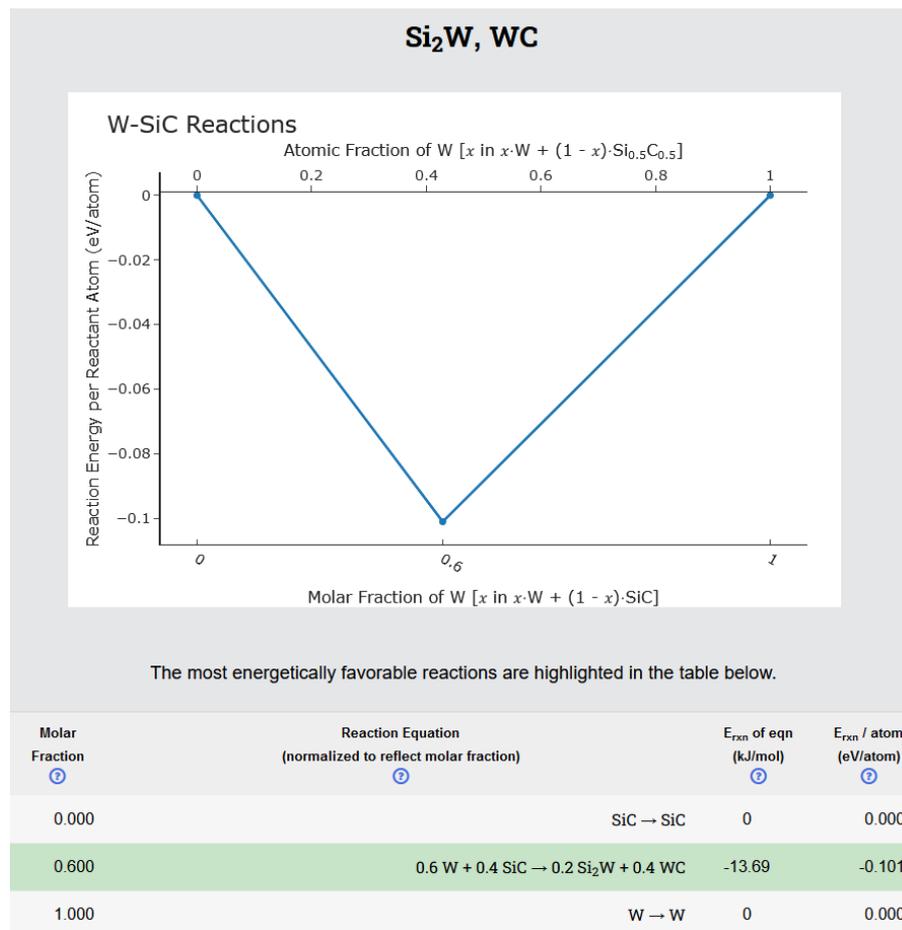
Eine der Standardanwendungen von CFC sind Chargiergestelle für Hochtemperaturöfen. Dabei ist die Verwendung von Keramiken als Diffusionsbarriere eine gängige Praxis [60]. Die üblich für diesen Zweck eingesetzten Keramiken sind Siliziumcarbid (SiC) und Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [60] [61]. Die Materialeigenschaften (Tabelle 7.2) von SiC zeigen die sehr gute Eignung dieser Keramik für diesen Einsatz. Sowohl thermischer Ausdehnungskoeffizient, Wärmeleitfähigkeit und Schmelztemperatur erfüllen die vorher definierten Voraussetzungen.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wird aufgrund der schlechten thermischen Leitfähigkeit von  $30 \text{ W/mK}$ , einem Schmelzpunkt von  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  und einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $>8 \times 10^{-6}$  nicht weiter betrachtet.

Trotz der sehr vielversprechenden Ausgangslage von SiC wird von der Verwendung in Zusammenhang mit Wolfram abgeraten. Im Folgenden werden die Bildungsenthalpien von den möglichen Kombinationen von Wolfram, Silizium und Kohlenstoff betrachtet. Aus diesen Elementen können sich drei stabile Phasen bilden:  $\text{Si}_2\text{W}$  ( $\Delta H = -33,48 \text{ kJ/mol}$ ), SiC ( $\Delta H = -19,87 \text{ kJ/mol}$ ) und WC ( $\Delta H = -11,89 \text{ kJ/mol}$ ) [62]. Dabei ist die Bildung von  $\text{Si}_2\text{W}$  durch die niedrige Bildungsenthalpie am wahrscheinlichsten. Auch eine Kontaktflächensimulation (durchgeführt mit "materialsproject/Interface Reaction) zwischen W und SiC führt zu der Annahme, dass sich sowohl  $\text{Si}_2\text{W}$  als auch WC bilden wird (Abbildung 7.1. Durch den hohen Ausdehnungskoeffizienten von  $\text{Si}_2\text{W}$  von  $\alpha = 9,2 \times 10^{-6}$  ist diese Phase zu vermeiden. Die Untersuchungen von Yina Du in "Assessment of the Potential Diffusion Barriers between Tungsten and Silicon Carbide for Nuclear Fusion Application" können auf experimenteller Basis die getroffenen Aussagen bestätigen [63].

Aus den aufgeführten Gründen wird von der Verwendung von SiC als Zwischenschicht abgeraten.

---

<sup>1</sup>[www.materialsproject.org](http://www.materialsproject.org)



**Abbildung 7.1.:** Simulation der Phasenbildung im Kontaktbereich von Wolfram und Siliciumcarbid. Durchgeführt mit "materialsproject.org".

**Tabelle 7.2.:** Materialeigenschaften von Siliziumcarbid (SiC) und Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [18].

	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Dichte [g/mm <sup>3</sup> ]	19,2	15,6
Ausdehnungskoeffizient [µm/mK]	4,5	5,2
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	173	29
E-Modul [GPa]	440	380
Schmelztemperatur [°C]	2730	2054

## 7.2. Multischicht-System

Eine weitere vielversprechende Technik, die bereits eingesetzt wird, um Wolframschichten vor ungewolltem Aufkohlen zu schützen, ist die Verwendung von Rhenium-Multschichten (Abbildung 7.2). Dies ist eine Technik, die im Fusionsreaktorbau und auch bei Drehanoden mit niedrigeren Leistungsdichten Einsatz findet [59][14] Rhenium ist eines der wenigen Elemente, welches unter herkömmlichen

Bedingungen keine thermisch stabilen Carbide bildet [18][64]. Daher ist die Verwendung von Rhenium als Zwischenschicht zuerst naheliegend und auch die Materialeigenschaften von Rhenium passen zur Anwendung (Tabelle 7.3). Trotz der erstmals sehr guten Eigenschaften hat sich herausgestellt, dass Rhenium zwar selbst keine Carbide bildet, aber durchaus bei hohen Temperaturen eine Diffusion zwischen CFC und Wolfram zulässt. [64][59] [65].

Der Ansatz hinter dem Multischicht-System ist, dass zunächst abwechselnd Rhenium- und Wolframschichten auf das CFC-Substrat aufgetragen werden (Vakuum-Plasma-Spritzen oder CVD) und anschließend wird die Brennbahn aufgetragen. Dadurch, dass Rhenium keine Carbide und sich somit die Materialeigenschaften nicht ändern bzw. verspröden, können die Rheniumschichten die Ausdehnung und thermische Spannungen der Carbidschichten kompensieren [59][66] [65].

Die Firma Acerde ist bereit in der Lage, mittels CVD-Verfahren Gesamtdicken von 2 mm herzustellen. Obwohl sich diese Technik sehr vielversprechend anhört, ist dieses Zwischenschicht-System keine Dauerlösung. Da Wolframcarbide sich mit der Zeit auch in der obersten Wolframschicht bilden, wird mit diesem Verfahren nur die Carbidbildung in der Brennbahn verzögert. Durch Temperaturen oberhalb von 1600 °C beschleunigt sich dieses Verhalten nochmals deutlich, [64] [65] wodurch diese Temperatur nicht überschritten werden sollte.

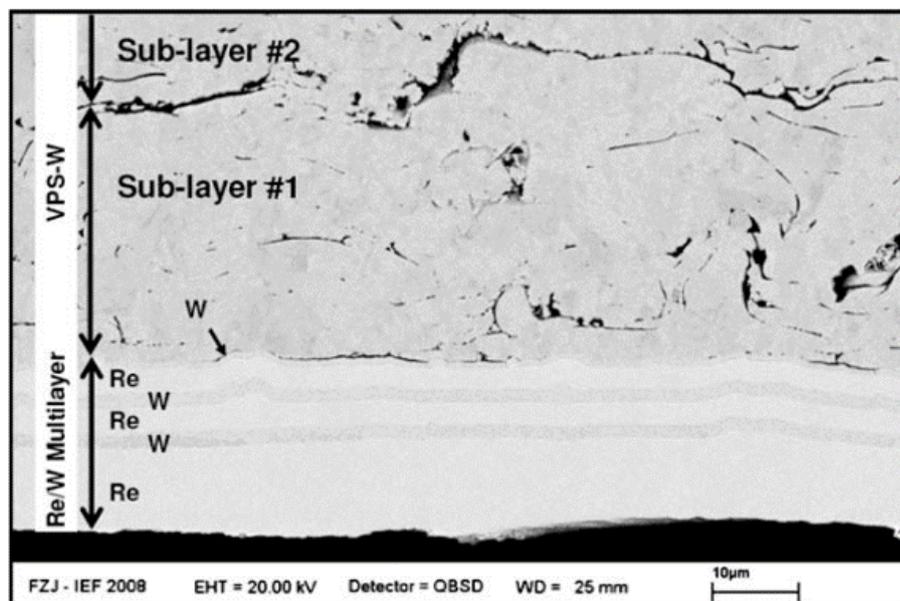
Alle in diesem Abschnitt genannten Studien betrachten eine Beschichtung, die parallel zur Faserrichtung aufgetragen wurde und Leistungsdichten, die nicht direkt mit der hier behandelten Anwendung zu vergleichen sind. Dennoch lässt insbesondere die Anwendung in bereits bestehenden Drehanoden darauf hoffen, dass dies es Verfahren eine vielversprechende Möglichkeit ist. Um die Eignung und Dauerbeständigkeit dieses Verfahrens zu überprüfen, wird empfohlen, mehrere Testreihen im kleinen Maßstab durchzuführen.

Die Technik, abwechselnd Rhenium- und Wolframschichten aufzutragen, bildet aktuell die beste Möglichkeit, die Brennbahn vor Versagen zu schützen. Um dieses Verfahren weiter zu verbessern, wird ein Element gesucht, das thermisch stabilere Carbide bildet als Wolfram. Dazu wird das Ellingham-Richardson-Diagramm der Carbide (Abbildung 7.3) betrachtet [67]. Aus diesem geht hervor, dass Tantal (Ta), Titan (Ti) und Zirkonium (Zr) Carbide bilden, die thermisch deutlich stabiler sind als die von Wolfram. Durch den Vergleich der Materialeigenschaften der reinen Elemente (Tabelle 7.4) können Titan und Zirkonium aufgrund der thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $> 8 \times 10^{-6}$  von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Daher wird im Weiterem nur Tantal betrachtet.

Die durchgeführte Kontaktflächensimulation (Abbildung 7.4) lässt, anders als bei SiC, darauf schließen, dass Wolfram im Kontakt mit TaC keine weiteren Karbide bildet. Die Studie "Tantalum and molybdenum barriers to prevent carbon diffusion in spark plasma sintered tungsten" befasst sich mit

der Verhinderung von Wolframcarbiden während Sinterprozessen. Die in dieser Studie durchgeführten Diffusions-Simulationen (Abbildung 7.5) und -Versuche (Abbildung 7.6) weisen nach, dass Tantal einen effizienten Schutz vor ungewollter Carbiddbildung im Wolfram darstellt. Auch die Interaktion zwischen Tantal, Wolfram und Rhenium wird aufgrund der Phasendiagramme (Abbildung 7.7 und 7.8) als unkritisch angesehen. Die Solidustemperatur beider Systeme und auch die eutektische Temperatur des Re-Ta Systems liegen oberhalb der zu erwartenden Temperaturen und daher wird davon ausgegangen werden, dass es nicht zur Schmelzung kommt.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann das Ersetzen der Wolfram-Zwischenschichten eine sehr vielversprechende Alternative zu dem bestehenden Verfahren darstellen.



**Abbildung 7.2.:** Verfahren des Multischicht-Systems. Kompensation von thermischen Spannungen und Ausdehnungen durch Rheniumschichten [59].

**Tabelle 7.3.:** Material Eigenschaften von Rhenium [68]

Eigenschaft / Material		Rhenium
Dichte	$[g/cm^3]$	21
Thermischer Ausdehnungskoeffizient (25 °C)	$[\mu m/mK]$	6,7
Thermische Leitfähigkeit (25 °C)	$[W/mK]$	48
Wärmekapazität (25 °C)	$[J/gK]$	0,137
E-Modul	$[GPa]$	470
Schmelztemperatur	$[°C]$	3186

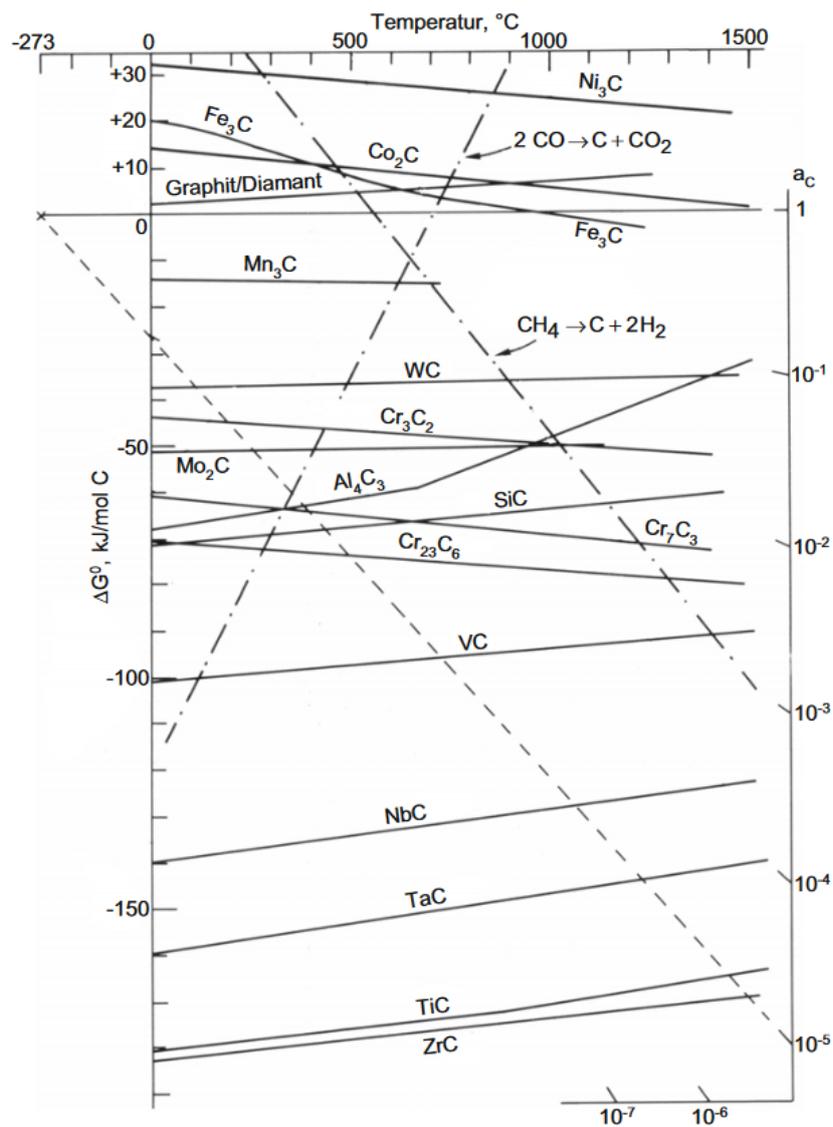
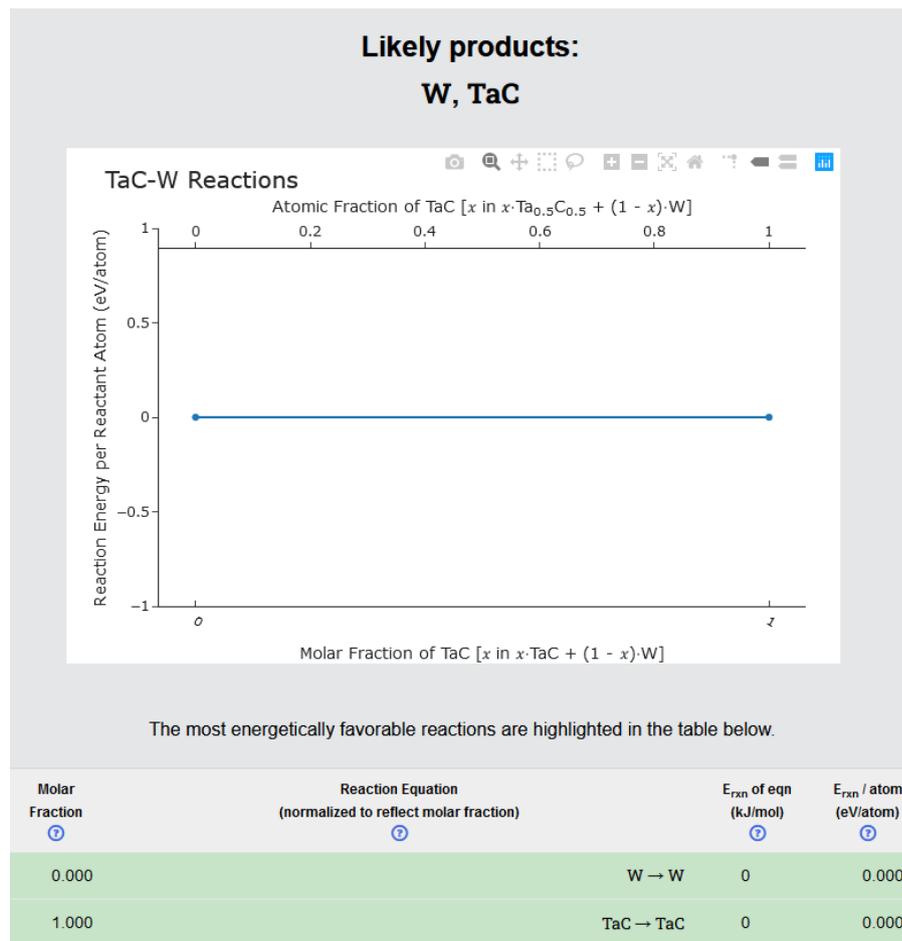


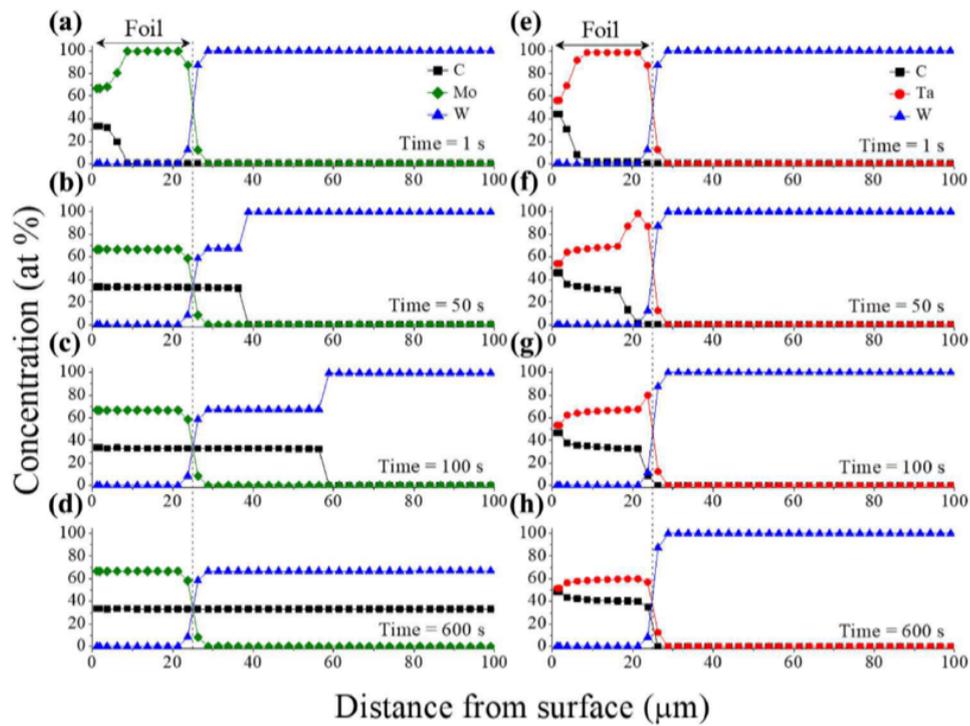
Abbildung 7.3.: Ellingham-Richardson-Diagramm einiger Karbidreaktionen [67].

Tabelle 7.4.: Material Eigenschaften von Wolfram, Tantal, Titan Zirkonium und deren Carbide [33].

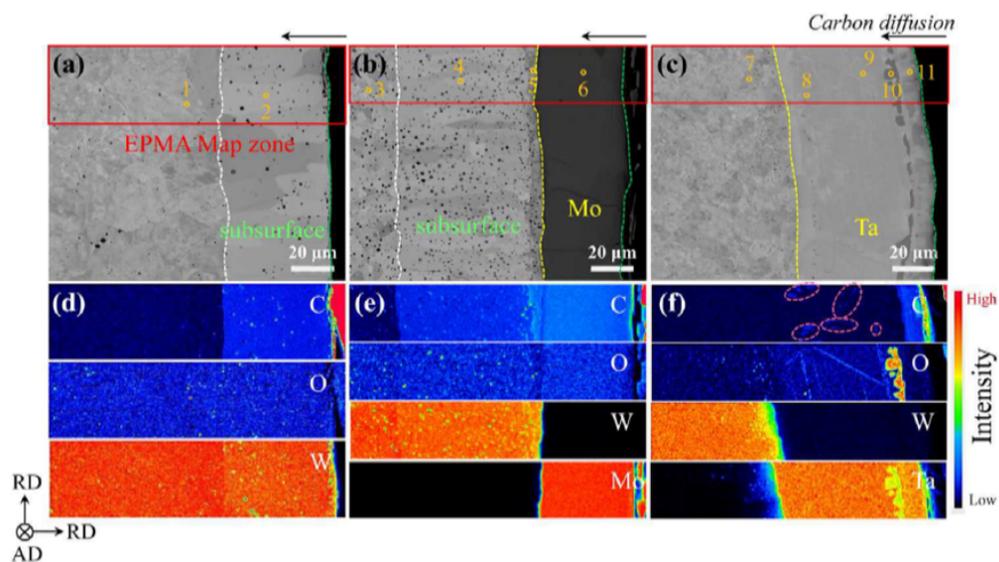
	W	Ta	Ti	Zr
$\alpha$ [ $\mu\text{m}/\text{mK}$ ]	4,5	6,5	8,6	10
$\lambda$ [ $\text{W}/\text{mK}$ ]	173	57,5	21	22,7
	WC	TaC	TiC	ZrC
$\alpha$ [ $\mu\text{m}/\text{mK}$ ]	5,2	6-7	6,7-7	6,8
$\lambda$ [ $\text{W}/\text{mK}$ ]	29	22	17-30	21



**Abbildung 7.4.:** Simulation der Phasenbildung im Kontaktbereich zwischen Wolfram und Tantalcarbid. Durchgeführt mit "materialsproject.org".



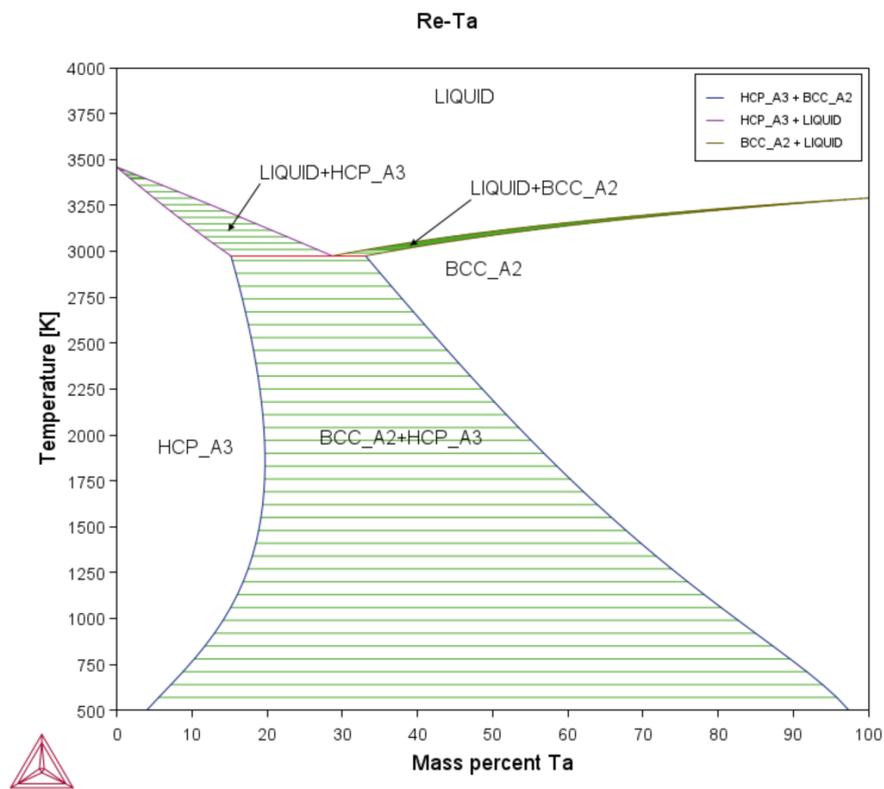
**Abbildung 7.5.:** DICTRA-Diffusionssimulation, Kohlenstoff-Konzentration in Abhängigkeit über der Zeit für zwei verschiedene Systeme.(a-d): W-Mo-C, (e-h): W-Ta-C. Temperatur: 1700 °C [69].

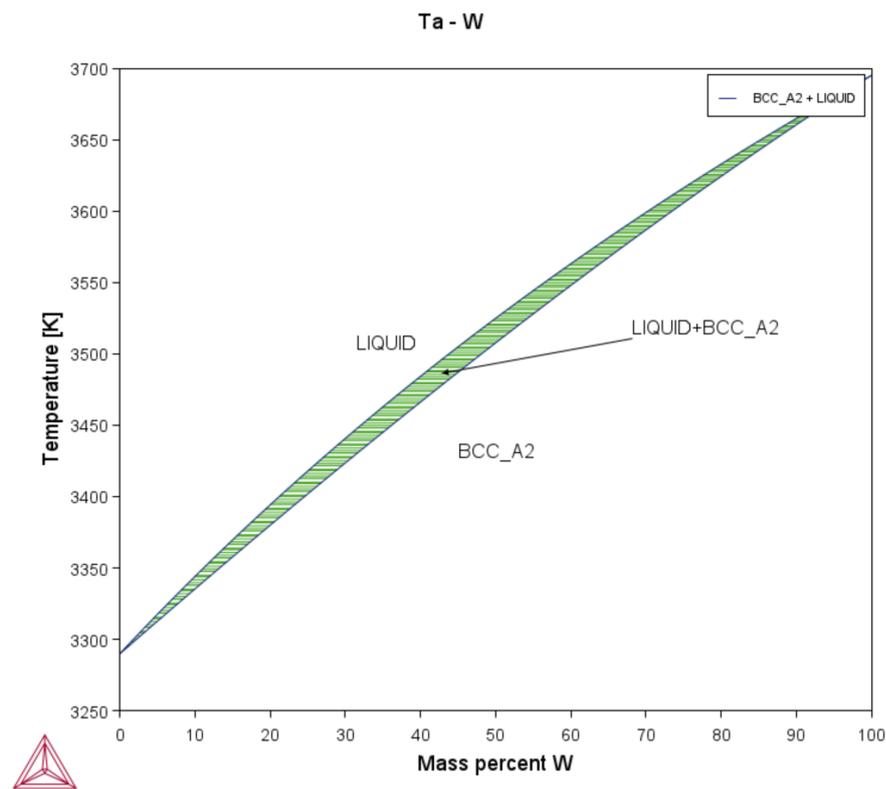


**Abbildung 7.6.:** SEM-Analyse (a-c) und EPMA (d-f) von Proben die bei 1700 °C für 10 Minuten gesintert wurden. (a,d): W-C, (b,e): W-Mo-C, (c,f): W-Ta-C. Die schwarzen Pfeile kennzeichnen die Richtung der Kohlenstoffdiffusion. Die roten Markierungen kennzeichnen die für die EPMA genutzten Bereiche. Die mit Gelb gekennzeichneten Bereiche (1-11) weisen unterschiedliche Phasen auf. Die Zusammensetzungen der Phasen werden in Tabelle 7.5 aufgeführt [69].

**Tabelle 7.5.:** Zusammensetzung der unterschiedlichen Phasen 1-11 der Abbildung 7.6 [69].

System	Point	W	Ta	Mo	C	O	Phase
W-C	1	96.2	0	0	2.65	1.15	W
	2	72.8	0	0	26.4	0.8	W <sub>2</sub> C
	3	96.4	0	0.1	3.5	0	W
W-Mo-C	4	71.2	0	0.1	28.1	0.6	W <sub>2</sub> C
	5	48.9	0	5.6	45.5	0	WC
	6	0.1	0	65.2	34.7	0	Mo <sub>2</sub> C
	7	98.7	0.5	0	0	0.8	W
W-Ta-C	8	2.4	69.6	0	26.9	1.1	Ta <sub>2</sub> C
	9	3.3	92.2	0	0	4.5	Ta
	10	1.1	31.9	0	1.1	65.9	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	11	1.7	46.2	0	50.6	1.5	TaC

**Abbildung 7.7.:** Binäres Phasendiagramm Rhenium-Tantal. Erstellt mit "Thermo-Calc" auf Basis des Datenpaketes "PURE5:SGTE Unary".



**Abbildung 7.8.:** Binäres Phasendiagramm Wolfram-Tantal. Erstellt mit "Thermo-Calc" auf Basis des Datenpaketes "PURE5:SGTE Unary".

### 7.3. Zusammenfassung Zwischenschicht

In diesem Kapitel wurden zwei gängige Techniken vorgestellt, die die Brennbahn vor ungewollter Carbiddbildung schützen sollen. Durch eine umfassende Literaturrecherche wurden diese darauf untersucht, ob sie sich zur Anwendung in einer LFXT eignen. Die für Hochtemperatur-Chargiergestelle üblichen Keramikbeschichtungen haben sich als nicht geeignet herausgestellt. Die Technik, die im Reaktorbau und auch schon in anderen Drehanodenanwendung findet, mehrere Zwischenschichten abwechselnd aus Wolfram und Rhenium vorzusehen, stellt aktuell die Methode mit dem größten Potenzial dar. Zusätzlich wurde die These aufgestellt, dass durch die Ersetzung der Wolfram-Zwischenschichten durch Tantal die Lebensdauer der Brennbahn nochmals gesteigert werden kann. Die erarbeiteten Ergebnisse und bereits durchgeführte Studien aus anderen Anwendungsbereichen stützen diese These. Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit der Tantalschichten müssen weitere Versuche durchgeführt werden. Auf Basis der Ergebnisse wird empfohlen, die Technik der Multischichten mit Wolfram und Rhenium und alternativ mit Tantal und Rhenium auf die Tauglichkeit für den Einsatz in einer LFXT durch Versuche zu überprüfen.

## 8. Ableitung eines Versuchsplans

Viele der in dieser Arbeit erzeugten Ergebnisse stützen sich auf Überlegungen, die bisher noch nicht untersucht wurden. Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem thermomechanischen Verhalten der Brennbahn und dem Verbund zur Target-Scheibe. Aufgrund des bisher genutzten Auslegeverfahren nach Oosterkamp wurde noch nie versucht, Drehanode mit solch hohen Energiedichten zu belasten. Auch im Reaktorbau sind die Energiedichten deutlich geringer als die hier betrachteten.

Um keine Ressourcen zu verschwenden, wird ein Versuchsplan nach dem Muster in Abbildung 8.1 erstellt. Nach diesem Plan werden schrittweise die Komplexität und der Ressourceneinsatz erhöht.

Soweit ein Versuch nicht erfolgreich ist, muss der Ansatz überarbeitet werden. Sind alle Vorversuche erfolgreich, kann schlussendlich ein Gesamtprototyp gefertigt und getestet werden.

Im Folgenden werden die ersten zwei Versuche konzipiert, die nötig sind, um die Ergebnisse aus dieser Arbeit zu verifizieren.

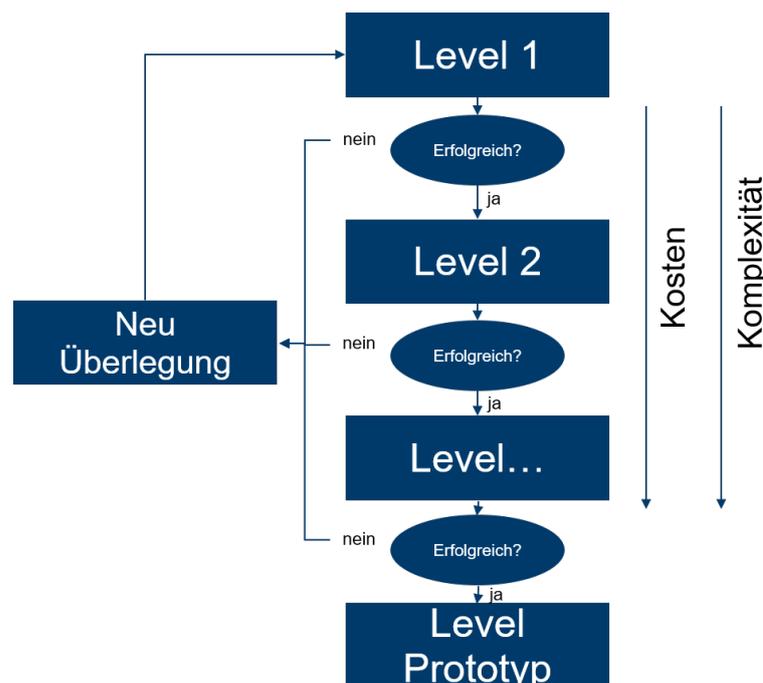


Abbildung 8.1.: Schematischer Ablauf des Versuchsplans.

## 8.1. Versuch 1: Thermoschockverhalten

Konventionelle Drehanoden beruhen auf dem Wärmekapazitätslimit (Oosterkamp). Das heißt, die Wärme wird an der Oberfläche erzeugt. Bei Anwendungen in LFXTs werden höhere energetische Elektronenstrahlen genutzt, sodass ein Übergang ins Wärmekapazitätslimit (Bartzsch) stattfindet. Dabei kann der Energieeintrag als Volumenkörper angenommen werden. Im ersten Schritt der Machbarkeitsstudie sollen das Thermoschockverhalten und das Thermozyklierverhalten an einer Wolfram oder Wolfram-Rhenium Brennbahn untersucht werden.

Das erste Experiment erfolgt mit einer Stehanode, die im späteren Versuchen durch eine Drehanode ersetzt wird.

Die Abbildung 8.2 veranschaulicht den Versuchsaufbau. Die Umgebungsbedingungen sollen ab dem ersten Versuch möglichst nah an die späteren Einsatzbedingungen angepasst sein.

Zur Untersuchung des Thermoschockverhaltens und der Ausnutzung des Wärmekapazitätslimits unter der Berücksichtigung der späteren Bedingungen ergeben sich folgende fixe Anforderungen:

- Beschleunigungsspannung  $600 \text{ keV}$
- Brennfleckbreite maximal  $50 \mu\text{m}$
- Leistungsdichte  $1\text{e}12 \text{ W/m}^2$
- Umgebungsdruck  $10\text{e-}5 \text{ Pa}$

Die Länge des Brennflecks lässt sich reduzieren. Folglich können die Strahlleistung und der Strom ebenfalls bei konstanter Leistungsdichte reduziert werden. Dies ermöglicht die Versuchsdurchführung auch auf schwächeren Beschleunigern. Tabelle 8.1 zeigt die geforderten Strahlleistungen für Brennflecke zwischen  $30 \text{ mm}$  und  $0,5 \text{ mm}$  Länge.

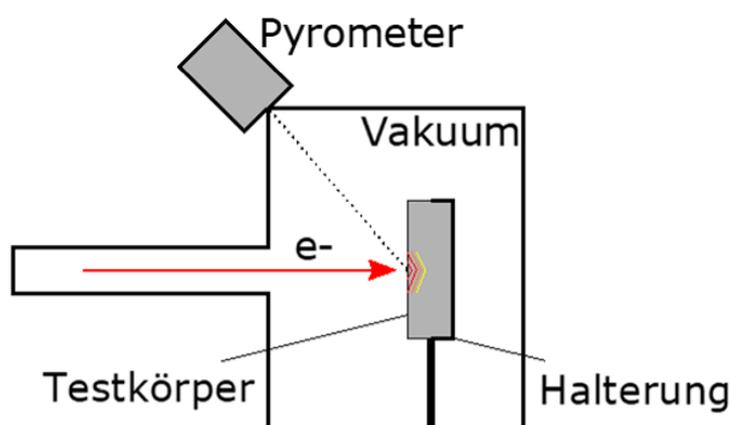
Die Pulsfrequenz und Pulsdauer ergeben sich in Analogie zur Drehanode. Der Puls eines Schusses wird wie die Zeit des Elektronenstrahles auf einen Brennfleck berechnet. Mit  $b = 50 \mu\text{m}$  und einer Umfangsgeschwindigkeit von  $419 \text{ m/s}$  ergibt sich eine Pulsdauer von  $120 \text{ ns}$ . Die Pulsfrequenz sollte dabei analog zur Drehfrequenz mit  $200 \text{ Hz}$  erfolgen. Die Versuchsdauer sollte im ersten Versuch  $0,1 - 1$  Sekunde betragen (20-200 Expositionen).

**Tabelle 8.1.:** Anpassung der Gesamtleistung in Abhängigkeit der Brennfleckgröße [25].

Länge [m]	Strahlleistung [W]	Strom [A]
3,00E-02	1,50E+06	2,50E+00
2,00E-02	1,00E+06	1,67E+00
1,00E-02	5,00E+05	8,33E-01
5,00E-03	2,50E+05	4,17E-01
1,00E-03	5,00E+04	8,33E-02
5,00E-04	2,50E+04	4,17E-02

Für den ersten Versuch kann als Stehanode ein Block aus Wolfram-Rhenium mit den groben Abmessungen von  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  zum Einsatz kommen. Da die Materialeigenschaften stark von den Fertigungsmethoden abhängig sind, sind Blöcke, die mittels Schmieden, Sintern und Abscheidung (PVD oder CVD) hergestellt wurden, zu untersuchen.

Nach der Exposition sollen die Proben sowohl makroskopisch, als auch mikroskopisch untersucht werden. Sind die Ergebnisse zufriedenstellend und es sind keine Schädigungen festzustellen, kann die Exposition 10-100 mal wiederholt werden, um das Thermozyklierverhalten zu untersuchen. Diese Proben werden ebenfalls makroskopisch und mikroskopisch auf Zerrüttungs- und Gefügeverhalten untersucht.

**Abbildung 8.2.:** Schematischer Versuchsaufbau in Anlehnung an eine Stehanode [25].

## 8.2. Versuch 2: Verbundcharakterisierung

Der zweite Versuch zielt darauf ab, den im Kapitel 7 erarbeiteten Materialverbund zu charakterisieren.

Zu diesem Zweck sollen Probekörper aus CFC mit den Abmessungen von  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , wie im Kapitel 7 beschrieben mittels CVD oder VPS beschichtet werden. Dabei ist zu beachten,

dass die Faserrichtung senkrecht zur Beschichtung steht. Zudem sind Referenzproben ohne Zwischenschicht vorzusehen. Die Probekörper sollen anschließend für unterschiedliche Zeitspannen unter Schutzgas-Atmosphäre bei 1400-1700 °C erwärmt werden. Die Proben sind nach der Wärmebehandlung makroskopisch und mikroskopisch auf Schädigungen und Gefügeumwandlungen zu untersuchen. Ziel des Mehrschicht-Systems ist die Unterbindung der Entstehung von Carbiden an der Brennbahn-Grenzschicht und das Vorbeugen von Rissen durch thermische Spannungen. Sind keine Schädigungen festzustellen, kann dieser Versuch zyklisch wiederholt werden, um die Temperaturwechselbeständigkeit des Verbundes zu überprüfen.

## 9. Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Röntgentarget-Struktur für den Einsatz in einer Linienfokus-Röntgenröhre zu konzipieren und die Auslegungen dieser Struktur unter vorgegeben Randbedingungen vorzunehmen.

Die größte Herausforderung ist es dabei, Energiedichten von mehr als einem Megawatt pro Quadratmillimeter zu realisieren. Bei den Anodenentwicklungen wurde sich bisher das Auslegeverfahren nach Oosterkamp angewendet. Mit diesem Verfahren ist es undenkbar, solche Energiedichten in Betracht zu ziehen. Durch das in dieser Arbeit erstmals angewandte Auslegeverfahren nach Bartzsch rückt die Realisierung in einen möglichen Bereich. Dennoch muss für die Umsetzung eine neue Generation von Röntgenanoden entwickelt werden. Zu diesem Zweck wurden auf der Konzeptebene verschiedenen Anodenbauformen daraufhin verglichen, welche Bauform das größte Potenzial bietet, die gegebenen Anforderungen zu erfüllen. Nach dem Vergleich der Eigenschaften kristallisierte sich die Drehanoden-Bauform heraus und wurde für die weiteren Schritte für sinnvoll befunden. Eine Besonderheit ist, dass die Brennbahn in dem hier erarbeiteten Konzept nicht auf der Stirnfläche, sondern auf der Mantelfläche der Anodenstruktur vorgesehen wird. Aus der Umpositionierung der Brennbahn ergeben sich eine Vielzahl an Vorteilen, wie eine homogene Geschwindigkeit über der gesamten Brennbahnbreite und eine symmetrische Spannungsverteilung.

Aufbauend auf diesen ersten Konzeptideen wurde auf Systemebene untersucht, welche Mechanismen in diesem System wirken. Es wurde festgestellt, dass es einen Konflikt zwischen der Minimierung der auftretenden Temperatur und der Minimierung der mechanischen Spannungen gibt. Um die Temperatur zu minimieren, wird eine möglichst große Rotationsgeschwindigkeit bei möglichst großem Radius der Anode benötigt. Da der Radius und die Umfangsgeschwindigkeit, die maximal möglich ist, direkt mit dem verwendeten Anodenmaterial zusammenhängen, wurde die Auslegestruktur so gewählt, dass als erstes die Anodenstruktur ausgelegt wird, um die maximalen Randbedingungen festzulegen und im Anschluss die Brennbahn.

Zur Auslegung der Anodenstruktur wurden im ersten Schritt mögliche Materialien auf ihre Festigkeits-/Dichteverhältnisse und Temperaturbeständigkeiten mittels Ashby-Plots verglichen. Daraufhin wurde eine Vorauswahl aus Graphit, CFC, TZM und Wolfram vorgenommen. Auf analytischer Basis und un-

ter Berücksichtigung der vorgegebenen Restriktionen wurden die Anodenstrukturen sowohl mit dem Prinzip der "Scheibe gleicher Dicke" als auch mit dem der "Scheibe gleicher Festigkeit" so dimensioniert und optimiert, dass eine maximale Umfangsgeschwindigkeit erreicht werden kann. Bei der Analyse der Ergebnisse stellte sich heraus, dass eine Scheibe gleicher Dicke aus CFC die höchste Umfangsgeschwindigkeit von  $419 \text{ m/s}$  erreichen kann. Dazu muss erwähnt werden, dass sowohl die Drehfrequenz als auch die Gewichtsrestrestriktion erreicht wurden. Durch Aufweichen dieser Restriktionen könnten noch höhere Geschwindigkeiten erzielt werden. Nach der analytischen Vordimensionierung wurden die Ergebnisse mittels FE-Methode überprüft und das Design weiter ausgearbeitet. Mit den angewandten Methoden lässt sich das Potenzial von CFC-Anodenstrukturen gegenüber TZM-Anodenstrukturen, die den aktuellen Stand der Technik widerspiegeln, klar aufzeigen.

Die Brennbahn der Anode wurde analog zu der Trägerstruktur betrachtet. Zunächst wurden die nötigen Materialeigenschaften definiert. Nachdem mehrere Materialien miteinander verglichen wurden, stellte sich heraus, dass sich Wolfram-Legierungen aufgrund ihrer Temperaturbeständigkeit und Röntgeneffizienz am besten eignen. Diese Untersuchung wird durch aktuelle Drehanoden bestätigt, die auch auf Brennbahnen aus Wolframlegierungen setzen. Zur weiteren Auslegung wurden zwei verschiedene Simulationsmodelle erstellt. Bei den verwendeten Simulationsmodellen ist zu erwähnen, dass der Effekt des Wärmekapazitätslimits mitberücksichtigt wurde und die Simulationen mit den analytischen Berechnungen korrelieren. Mit der Berücksichtigung des Wärmekapazitätslimits sind die zu erwartenden Temperaturen deutlich niedriger als mit der Betrachtung nach Oosterkamp, sodass die generelle Umsetzung realistisch ist. Durch die Simulationsergebnisse des ersten Modells kann die Mindestdicke der Brennbahn auf  $1 \text{ mm}$  festgelegt werden. Ab dieser Dicke herrscht im Bereich der Kontaktfläche, zwischen Brennbahn und der Anodenstruktur ein gleichmäßiger Temperaturanstieg. Durch diesen soll eine Wechselbelastung durch Abkühlung und Aufheizung vermieden werden. Mittels dem zweiten Simulationsmodell, welches auch die Anodenstruktur mitbeinhaltet, wurde eine Spannungsbetrachtung durchgeführt. Der durch diese Simulation berechnete Spannungsverlauf ist aufgrund der zu diesem Zeitpunkt nicht festgelegten Fertigungsverfahren nicht aussagekräftig. Dennoch lässt sich aus diesen Ergebnissen auf eine starke Wechselbelastung schließen. Um klare Aussagen über die Beständigkeit der Brennbahn gegen thermische Schockbelastungen, Spannungen und zyklischen Belastungen treffen zu können, wird empfohlen, Versuche im kleinen Maßstab durchzuführen.

Nach der Betrachtung der Spannungen innerhalb der Brennbahn wurde untersucht, wie lang die Brennbahn aus thermischer Sicht dem Energieeintrag widerstehen kann. Die Ergebnisse der transienten FE-Simulation, unter der Berücksichtigung der nicht linearen thermischen Materialeigenschaften, zeigen, dass die Brennbahn nach ca.  $1,4 \text{ s}$  die maximal zulässige Temperatur erreicht. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass die geforderte Bestrahlungszeit von mindestens einer Sekunde erreicht werden

kann. Darüber hinaus wurden zwei weitere Betriebsmodi untersucht. Durch die Anpassung der Pulsfrequenz und -dauer des Elektronenstrahls konnte gezeigt werden, dass die Betriebszeit auf Kosten der durchschnittlichen Strahlendosis merklich gesteigert werden kann. In Zukunft ist es noch zu klären, inwieweit eine längere Bestrahlungszeit bei kleiner durchschnittlicher Strahlungsdosis von Vorteil ist.

Die durchgeführten thermischen Simulationen lassen auf eine Temperatur in der Kontaktzone, zwischen Brennbahn und Anodenteller schließen, bei denen es zu beschleunigten Diffusionsvorgängen kommt. Zur Unterbindung des auch schon in der Literatur bekannten Problems der Carbiddbildung und dem damit einhergehenden Versagen der Brennbahn wurde im ersten Schritt der Stand der Technik analysiert. Die herkömmlichen Keramikbeschichtungen, die zum Einsatz bei Chargiergestellen aus CFC in Hochtemperatur-Öfen kommen, sind aufgrund ihrer thermischen Instabilität nicht geeignet, um als Schicht zwischen CFC und Wolfram als Diffusionsbarriere zu agieren. Anders ist es bei dem Verfahren, welches bei Reaktorwänden und Drehanoden für geringere Leistungsdichten Anwendung findet. Dies sieht zwischen Brennbahn und Anodenteller eine Schicht aus mehreren Einzelschichten aus Rhenium und Wolfram vor. Dieses Verfahren birgt auch für die hier angestrebte Verwendung ein hohes Potenzial, dennoch bietet sie keine Dauerlösung aufgrund der fortschreitenden Carbiddbildung.

Zur Verbesserung dieses Verfahrens wurde eine Alternative für die Wolfram-Zwischenschichten erarbeitet. Durch den Vergleich von Bildungsenthalpien verschiedener Carbid-Verbindungen und die Ergebnisse weiterer Untersuchungen lassen darauf schließen, dass Tantal die Wolframschichten ersetzen kann und die Carbiddbildung in der Brennbahn weiter verzögern, wenn nicht sogar verhindern kann. Durch die ähnlichen Materialeigenschaften von Tantal- und Wolframcarbide, würde der Wechsel zu Tantal keine Nachteile mit sich bringen. Wenn die Langlebigkeit der Brennbahn durch die Reduzierung der Diffusionsgeschwindigkeit erhöht werden kann, würde dies eine Verbesserung darstellen. Auf Basis der Ergebnisse wird empfohlen, Tantal als Zwischenschicht-Material in Betracht zu ziehen und Versuche mit diesem Verbund durchzuführen.

Abschließend werden die erarbeiteten Ergebnisse und Konzepte zu einem Gesamt-Konzept zusammengefasst. Die Grundstruktur der Drehanode bildet eine Scheibe mit einem Durchmesser von 660 mm und einer Dicke von 30 mm aus einem quasi-isotropen CFC-Laminat mit einer Verstärkung im Bereich der Wellen Durchführung. Zur Erhöhung der Lebensdauer durch Verhinderung/Verzögerung der Carbiddbildung in der Brennbahn und der Reduzierung von thermischen Spannungen, wird mittels CVD- oder VPS-Verfahren ein Mehrschicht-Verbund aus Rhenium und Tantal abgeschieden. Abschließend wird auf dem Mehrschicht-Verbund eine ca. 1 mm dicke Schicht aus einer Wolfram-Rhenium Legierung als Brennbahn aufgebracht. Dieses Design ermöglicht bei einer Drehfrequenz der Drehanode eine Bestrahlungsdauer von mindestens einer Sekunde und erfüllt alle vorher definierten Anforderungen.

Obwohl mehrere Ideen und Konzepte in dieser Arbeit ausgearbeitet wurden, ist es bis zur fertigen Anode noch ein weiter Weg. Ein besonderes Augenmerk sollte für weitere Arbeiten auf den Materialversuchen liegen. Um eine generelle Umsetzung des Vorhabens weiter abzusichern, wurden zwei mögliche Vorversuche konzipiert. Diese zielen darauf, mit einem möglichst geringen Ressourceneinsatz, die Eignung der Brennbahn und der Zwischenschicht zu bestätigen. Darüber hinaus muss das Design der Trägerstruktur weiter ausgefeilt sowie Fertigungs- und Fügekonzepte für Trägerstruktur und Brennbahn erarbeitet und validiert werden. Weitere Aspekte, die in dieser Arbeit nicht behandelt wurden, bilden der Antriebsstrang und das Kühlkonzept der Anode. Aufgrund der thermischen Lasten und der Ultrahoch-Vakuum-Umgebung bilden diese Teilprojekte, Arbeitspakete mit einem nicht zu unterschätzenden Umfang.

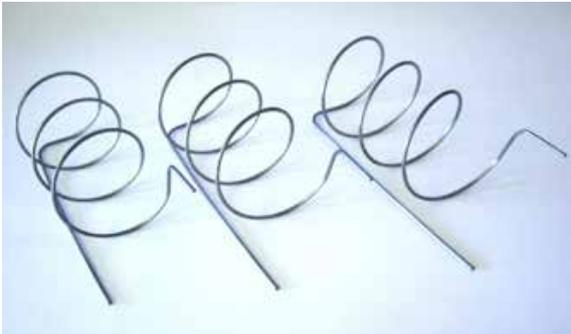
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit dieser Arbeit ein vielversprechender Beitrag zur Entwicklung der Linienfokus-Röntgenröhreanode erbracht wurde. Mittels der erzeugten Ergebnisse kann von einer möglichen Umsetzung mit allen geforderten Randbedingungen ausgegangen werden und die erarbeiteten Konzepte bzw. Designvorschläge bilden eine aussichtsvolle Basis für zukünftige Arbeiten. Gerade im Hinblick auf das erstmals angewandte Auslegeverfahren nach Bartzsch kann diese Arbeit einen Grundstein der zukünftigen Anodenentwicklung darstellen.

## **A. Datenblätter**

In diesem Teil des Anhangs erfolgt eine Übersicht einiger Datenblätter der in dieser Arbeit behandelten Materialien.

## Datenblatt

# Wolfram (W)



### Wichtige Eigenschaften und Anwendungen

- | Sehr hoher Schmelzpunkt und niedriger Dampfdruck
- | Sehr hohe Dichte
- | Sehr hohe Warmfestigkeit
- | Gute Korrosionsbeständigkeit in Säuren und flüssigen Metallen
- | Geringe thermische Ausdehnung
- | Sehr gute Strahlungsabschirmung
- | Ab 500 °C Oxidation an Luft
- | Sehr spröde

Verwendet werden Rein-Wolfram, W-Legierungen und W-Verbundwerkstoffe für Lampenleuchtstoffröhren, Filamente, Röntgenröhrenanoden, elektrische Schaltkontakte, Heizleiter, Abschirmungen, Erodier Elektroden, Schweißelektroden, Reibrührschweißwerkzeuge, Thermolemente, Werkzeughalter, Massenausgleichsgewichte, Abschirmelemente für Gamma- bzw. Röntgenstrahlung u.a.

### Wolfram-Schwermetall (WSM)

WSM ist ein Verbundwerkstoff aus Wolfram mit Nickel-Eisen, bzw. mit Nickel-Kupfer. Wolfram-Schwermetall hat eine sehr hohe Dichte, lässt sich jedoch wesentlich besser bearbeiten als Rein-Wolfram. Typische Anwendungen: Ausgleichsgewichte, Strahlenabschirmungen, Formeinsätze (s.a. Datenblatt WSM).

### Wolfram-Kupfer (WCu)

WCu ist ein Verbundwerkstoff aus Wolfram und unterschiedlichen Anteilen von Kupfer. Dieser Werkstofftyp ermöglicht eine Kombination von hoher Verschleiß- und Abbrandfestigkeit mit guter elektrischer Leitfähigkeit.

Typische Anwendungen: Elektrische Kontakte, Erodier Elektroden, Widerstandsschweißelektroden (s.a. Datenblatt WCu).

### Physikalische Eigenschaften

Elementsymbol	W
Ordnungszahl	74
Atommasse	183.85
Wertigkeit	2, 3, 4, 5 und 6
Dichte (20 °C)	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Kristallstruktur	kubisch raumzentriert
Schmelzpunkt	3422 °C
Siedepunkt	5900 °C
Dampfdruck	1 · 10 <sup>-8</sup> hPa (~2100 °C)
	1 · 10 <sup>-5</sup> hPa (~2600 °C)
Spezifischer elektrischer Widerstand	0.055 · 10 <sup>-6</sup> Ω · m (20 °C)
	0.326 · 10 <sup>-6</sup> Ω · m (1000 °C)
	0.486 · 10 <sup>-6</sup> Ω · m (1500 °C)
	0.671 · 10 <sup>-6</sup> Ω · m (2000 °C)
Linearer Ausdehnungskoeffizient	4.5 · 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> (20 °C)
	4.6 · 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> (1000 °C)
Wärmeleitfähigkeit	167 W/m · K <sup>-1</sup> (20 °C)
	111 W/m · K <sup>-1</sup> (1000 °C)

### Mechanische Eigenschaften

Härte	350 HV (min.)
E-Modul	407 GPa (20 °C)
G-Modul	166 GPa (20 °C)
Zugfestigkeit R <sub>m</sub>	900-4000 MPa (typ.)
Dehngrenze R <sub>p0.2</sub>	k.A.
Dehnung A	k.A.

### Wichtige Varianten und Legierungen

W 99.95 % (pulvermetallurgisch)  
 WRe3, WRe5, WRe25, WRe26  
 W-Elektroden, dotiert:  
 WT (ThO<sub>2</sub>), WL (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), WC (CeO<sub>2</sub>), WZ (ZrO<sub>2</sub>), WY (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),  
 WMX (Mischung Seltene Erden)  
 Wolfram-Verbundwerkstoffe:  
 Wolfram-Schwermetall WSM (WNiFe, WNiCu)  
 Wolfram-Kupfer WCu (typ. 10-50 % Cu)  
 Wolfram-Silber WAg (typ. 15-70 % Ag)

### Werkstoffnormen

ASTM B760 (Wolfram-Platten, Bleche, Folien)  
 ASTM F288 (Wolfram-Draht für elektronische Geräte und Lampen)  
 ASTM F73 (Wolfram-Rhenium-Draht für elektronische Geräte und Lampen)  
 ASTM E696 (Wolfram-Rhenium-Draht für Thermolemente)  
 ASTM F269 (Bestimmung des Durchhangs von Wolfram-Draht)  
 ASTM B702 (Wolfram-Kupfer – Kontaktwerkstoffe)  
 ASTM B631 (Wolfram-Silber – elektrische Kontaktmaterialien)  
 ASTM B777 (Wolfram-Schwermetalle)  
 DIN EN ISO 6848 Lichtbogenschweißen – Wolframelektroden

### Lieferprogramm

Bleche, Platten, Drähte, Stäbe, Gewebe, Sputtertargets, Elektroden, elektrische Kontakte, Filamente, Tiegel, Heizelemente, Hitzeabschirmungen, Normbauteile (Schrauben, Muttern u.a.), sonstige Bauteile und Komponenten nach Kundenzeichnung.

## Datenblatt

# Rhenium (Re)



### Wichtige Eigenschaften und Anwendungen

- | Sehr hohe Dichte
- | Sehr beständig in nicht-oxidierenden Säuren
- | Sehr hoher Schmelzpunkt und sehr gute Hitzebeständigkeit
- | Keine Karbidbildung in Kontakt mit Graphit
- | Gut verform- und schweißbar
- | Duktil, auch nach der Rekristallisation

Anwendung findet Rhenium und seine Legierungen für Glühfäden und Heizfilamente in der Analytik (Massenspektrometer), für Thermolemente, Raketen- und Triebwerkskomponenten, Reib-Rührschweißwerkzeuge, Supraleiter oder Katalysatoren in der petrochemischen Industrie. Als Legierungsbestandteil in Nickel-Superlegierungen verbessert Rhenium z.B. die Kriech- und Ermüdungseigenschaften. Der hohe Preis und die Seltenheit begrenzen jedoch die Verwendung.

### Wolfram-Rhenium (WRe)

Bei diesen Legierungstypen überträgt Rhenium seine guten mechanischen Eigenschaften auf das spröde Wolfram und erhöht die Rekristallisationstemperatur. Eine wichtige Anwendung von Wolfram-Rhenium sind die Thermolegierungen WRe5/WRe26 (Typ C) und WRe3/WRe25 (Typ D) zur Messung von Temperaturen bis zu 2300 °C.

### Lieferprogramm

Bleche, Platten, Drähte, Stäbe, Rohre, Sputtertargets, Filamente, Tiegel, Heizelemente, sonstige Bauteile und Komponenten nach Kundenzeichnung.

### Physikalische Eigenschaften

Elementsymbol	Re
Ordnungszahl	75
Atommasse	186.2
Wertigkeit	1, 2, 3, 4, 5, 6, meist 7
Dichte (20 °C)	21.04 g/cm <sup>3</sup>
Kristallstruktur	hexagonal dichteste Packung
Schmelzpunkt	3186 °C
Siedepunkt	5600 °C
Dampfdruck	1 · 10 <sup>-7</sup> hPa (~2000 °C)
	1 · 10 <sup>-5</sup> hPa (~2300 °C)
Spezifischer elektrischer Widerstand	0.19 · 10 <sup>-6</sup> Ω · m (20 °C)
	0.75 · 10 <sup>-6</sup> Ω · m (1000 °C)
	1.05 · 10 <sup>-6</sup> Ω · m (2000 °C)
Linearer Ausdehnungskoeffizient	6.7 · 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> (20 °C)
	7.5 · 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> (2000 °C)
Wärmeleitfähigkeit	48 W/m · K <sup>-1</sup> (20 °C)

### Mechanische Eigenschaften

Härte	150-250 HV (min.)
E-Modul	470 GPa (20 °C)
G-Modul	215 GPa (20 °C)
Zugfestigkeit R <sub>m</sub>	500-1000 MPa (typ.)
Dehngrenze R <sub>p0.2</sub>	300-800 MPa (typ.)
Dehnung A	10-20 %

### Wichtige Varianten und Legierungen

Re 99.95 % (Standard-Qualität, meist pulvermetallurgisch)  
 Re 99.99+ % (zonenraffiniert, meist pulvermetallurgisch)  
 WRe3, WRe5, WRe25, WRe26 (Wolfram-Rhenium)  
 MoRe41, MoRe44.5, MoRe47.5 (Molybdän-Rhenium)

### Werkstoffnormen

ASTM F73 (W-Re-Draht für elektronische Geräte und Lampen)  
 ASTM E696 (W-Re-Draht für Thermolemente)

## Wolfram-Rhenium (WRe)

Legierungen von Wolfram-Rhenium (WRe) werden in unterschiedlichen Zusammensetzungen verwendet. Das Legierungselement Rhenium überträgt hierbei eine Reihe von interessanten Eigenschaften auf Wolfram. So sind z.B. die Rekristallisationstemperatur und der elektrische Widerstand höher. Ein großer Vorteil ist auch die höhere Duktilität, insbesondere nach Erhitzung bzw. Rekristallisation.

### Wichtige Eigenschaften und Anwendungen:

- bessere Umformeigenschaften als Rein-W
- sehr hohe Warmfestigkeit
- höhere Rekristallisationstemperatur als Wolfram

### Wichtige WRe-Legierungen:

- WRe3
- WRe5 / WRe26 (Thermoelement Typ C)
- WRe3 / WRe25 (Thermoelement Typ D)

### Typische Anwendungen von Wolfram-Rhenium:

Hochtemperatur-Thermoelemente, Glühdrähte, Filamente, Raketenbauteile, Anoden von Röntgenröhren, Rührreibschweiß-Werkzeuge

### ASTM-Normen:

ASTM F73 (Wolfram-Rhenium-Draht für elektronische Geräte und Lampen)  
ASTM E696 (Wolfram-Rhenium-Draht für Thermoelemente)

### Lieferprogramm:

Drähte, Stäbe, Bleche, Platten, [Filamente](#), Fertigteile

## Datenblatt

# Tantal (Ta, TaW2.5, TaW10)



### Wichtige Eigenschaften und Anwendungen

- | Hervorragende Korrosionsbeständigkeit in Säuren und vielen Metallschmelzen
- | Sehr hoher Schmelzpunkt (wird nur von W und Re übertroffen)
- | Sehr duktil und gut schweißbar
- | Sehr gute Biokompatibilität
- | Neigt zur Wasserstoffversprödung und Karbidbildung
- | An Luft nur bis ca. 300 °C beständig

Verwendung findet Tantal als Reinstoff, bzw. als Legierung im chemischen Anlagenbau für Behälter, Rührer, Rohre und Wärmetauscher, in der Medizintechnik für Implantate und chirurgische Instrumente sowie in Hochtemperaturanlagen für Heizleiter, Hitzeabschirmbleche und andere Komponenten.

### Tantal-Wolfram TaW2.5

Diese Legierung hat gegenüber reinem Tantal eine höhere Festigkeit, insbesondere eine höhere Warmfestigkeit bei nahezu gleicher Korrosionsfestigkeit.

### Tantal-Wolfram TaW10

TaW10 hat gegenüber Rein-Ta und TaW2.5 eine stark erhöhte Festigkeit bis zu sehr hohen Temperaturen. Aufgrund der schwierigen Be- und Verarbeitung sind viele Halbzeugformen nur eingeschränkt herstellbar.

### Physikalische Eigenschaften

Elementsymbol	Ta
Ordnungszahl	73
Atommasse	180.95
Wertigkeit	2, 3, 4, 5
Dichte (20 °C)	16.65 g/cm <sup>3</sup>
Kristallstruktur	kubisch raumzentriert
Schmelzpunkt	2996 °C
Siedepunkt	5425 °C
Dampfdruck	1 · 10 <sup>-8</sup> hPa (~2000 °C)
	1 · 10 <sup>-5</sup> hPa (~2400 °C)
Spezifischer elektrischer Widerstand	0.135 · 10 <sup>-6</sup> Ω · m (20 °C)
	0.55 · 10 <sup>-6</sup> Ω · m (1000 °C)
	0.90 · 10 <sup>-6</sup> Ω · m (2000 °C)
Linearer Ausdehnungskoeffizient	6.5 · 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> (20 °C)
	8 · 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> (1500 °C)
Wärmeleitfähigkeit	54 W/m · K <sup>-1</sup> (20 °C)
	83 W/m · K <sup>-1</sup> (2000 °C)

### Mechanische Eigenschaften

Härte	90-210 HV (min.)
E-Modul	186 GPa (20 °C)
Zugfestigkeit R <sub>m</sub>	170-300 MPa (typ.)
Dehngrenze R <sub>p0.2</sub>	100-200 MPa (typ.)
Dehnung A	10-30 % (typ.)

### Wichtige Varianten und Legierungen

Ta R05200 vakuumerschmolzen
Ta R05400 pulvermetallurgisch
Ta97.5W2.5 (R05252 vakuumerschmolzen)
Ta90W10 (R05255 vakuumerschmolzen)
Ta60Nb40 (R05240 vakuumerschmolzen)
Ta 99.95 % (3N5-Qualität)
Ta 99.99 % (4N-Qualität)
Ta 99.995 % (4N5-Qualität)
Ta 99.999 % (5N-Qualität)

### Werkstoffnormen

ASTM B364 (Ta und Ta-Legierungen: Ingots, Rohbarren)
ASTM B365 (Ta und Ta-Legierungen: Stäbe, Drähte)
ASTM B708 (Ta und Ta-Legierungen: Platten, Bleche, Bänder)
ASTM B521 (Ta und Ta-Legierung: Rohre, geschweißt und nahtlos)
ASTM F560 (Rein-Tantal: für medizinische Anwendungen)
VdTUV-Werkstoffblatt 382

### Lieferprogramm

Folien, Bänder, Bleche, Platten, Drähte, Stäbe, Rohre, Sputtertargets, Verdampferschiffchen, Tiegel, Filamente, Heizer, Hochtemperaturkomponenten, Normbauteile (Schrauben, Muttern etc.), Bauteile nach Kundenzeichnung.



## SIGRAFINE®

### Werkstoffe für mechanische Anwendungen

#### Materialdaten SIGRAFINE® gesenkgepresster Kohlegraphit

Typische Eigenschaften	Einheiten	EK20	EK2200 <sup>1)</sup>	EK2201 <sup>1)</sup>	EK2209	EK3205	EK24	EK2240 <sup>1)</sup>	EK2241 <sup>1)2)</sup>	EK2243 <sup>1)</sup>	EK3245
Imprägnierung			Kunstharz	Kunstharz		Antimon		Kunstharz	Kunstharz	Kunstharz	Antimon
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	1,70	1,82	1,82	1,77	2,30	1,70	1,80	1,80	1,78	2,20
Biegefestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	55	75	75	65	85	60	70	70	60	80
Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	155	200	200	190	260	180	200	200	190	250
E-Modul	N/mm <sup>2</sup>	22000	23000	23000	25000	30000	18000	19000	19000	18000	22000
Rockwell-Härte B	HR <sub>5/100</sub>	105	110	110	110	120	105	110	110	110	120
Thermische Leitfähigkeit	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	12	13	14	15	18	14	15	15	16	20
Thermischer Ausdehnungs- koeffizient (20–200 °C)	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	3,0	4,0	3,8	3,6	4,0	4,1	5,0	4,8	4,6	4,9
Offene Porosität	Vol. %	11,0	2,5	2,5	2,5	2,5	8,0	2,5	2,5	2,5	2,5
Temperaturbeständigkeit in ox. Atmosphäre	°C	350	200	260	350	350	350	200	260	180	350
Temperaturbeständigkeit in red. Atmosphäre	°C	1200	200	260	400	550	1200	200	260	180	550
Rund Durchmesser max.	mm	580	580	580	580	370	450	450	450	450	370
Rund Höhe max.	mm	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Quader X max.	mm	610	330	330	330	330	610	330	330	330	330
Quader Y max.	mm	325	140	140	140	140	325	140	140	140	140
Quader Z max.	mm	130	60	60	60	60	130	60	60	60	60
Anwendungsspez. Werkstoffbezeichnung		●●	●●	●●	●●	●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●

#### Materialdaten SIGRAFINE® Kohlenstoff- und Graphitrieße

Typische Eigenschaften	Einheiten	EG31	EG32	V2116	EG33	V1032	KG19	V1062
Schüttdichte	g/cm <sup>3</sup>		0,37				0,5	
Rütteldichte	g/cm <sup>3</sup>		0,63				0,90	
Wahre Dichte	g/cm <sup>3</sup>	1,98			2,07	2,16		2,00
Aschewert	%	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0			
Mittlere Korngröße d <sub>50</sub>	µm	16	28	57	17	10	19	16
Verpackungseinheit	kg	25	25			25	25	25
<b>Korngrößenverteilung</b>								
< 103 µm	%	100	99		99	100	100	100
< 61 µm	%	100	87		94	100	95	96
< 30 µm	%	76	53		76	90	67	71
< 7,5 µm	%	29	12		37	41	26	30
< 2,2 µm	%	13	1,5		17	14	8	10
< 1,1 µm	%	6	0,2		8	5	3	4
Anwendungsspez. Werkstoffbezeichnung		●	●	●	●	●	●	●

<sup>1)</sup> Für diese Werkstoffe liegen Atteste zur Verwendung im Trinkwasser und/oder im Kontakt mit Lebensmitteln vor.

<sup>2)</sup> Für diese Werkstoffe liegen Atteste für die Anwendung in Sauerstoffatmosphären vor.

● Nasslauf ● Trockenlauf ● Mischreibung ● Hochbelastet ● Füllmaterial für Compounds

### Materialdaten SIGRAFINE® PTS Kohlegraphit (Großserie)

Typische Eigenschaften	Einheiten	EK2230 <sup>1)</sup>	EK2239	EK3235	EK25	EK2250	EK3255
Imprägnierung		Kunstharz		Antimon		Kunstharz	Antimon
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	1,85	1,80	2,47	1,69	1,80	2,15
Biegefestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	60	55	65	45	50	75
Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	160	150	210	125	160	220
E-Modul	N/mm <sup>2</sup>	22000	20000	30000	16000	17000	21000
Rockwell-Härte B	HR <sub>5/100</sub>	110	105	105	100	110	120
Thermische Leitfähigkeit	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	14	15	20	9	10	12
Thermischer Ausdehnungs- koeffizient (20–200 °C)	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	6,5	4,5	5,1	4,5	5,1	5,2
Offene Porosität	Vol. %	2,5	2,5	2,5	7,0	2,5	2,5
Temperaturbeständigkeit in ox. Atmosphäre	°C	200	350	350	350	200	350
Temperaturbeständigkeit in red. Atmosphäre	°C	200	400	550	950	200	550
Rund Durchmesser max.	mm	90	90	90	90	90	90
Rund Höhe max.	mm	45	45	45	45	45	45
Quader X max.	mm	110	110	110			
Quader Y max.	mm	115	115	115			
Quader Z max.	mm	25	25	25			
Anwendungsspez. Werkstoffeignung		●	●	●	●●	●●	●●

### Materialdaten SIGRAFINE® Graphit und kunstharzgebundener Graphit

Typische Eigenschaften	Einheiten	EK40 <sup>2)</sup>	EK200 <sup>1)</sup>	EK201 <sup>1)2)</sup>	EK203 <sup>1)</sup>	EK204	EK305 <sup>2)</sup>	V1626	EK60
Imprägnierung			Kunstharz	Kunstharz	Kunstharz	Salz	Antimon	Salz	
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	1,70	1,82	1,82	1,80	1,78	2,55	1,85	1,73
Biegefestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	35	50	50	40	40	80	58	80
Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	100	200	200	160	140	290	150	120
E-Modul	N/mm <sup>2</sup>	10000	13000	13000	13000	13000	21000	13000	22000
Rockwell-Härte B	HR <sub>5/100</sub>	95	115	115	115	105	115	90	80
Thermische Leitfähigkeit	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	25	26	26	26	27	33	73	6
Thermischer Ausdehnungs- koeffizient (20–200 °C)	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	4,5	6,8	6,2	5,6	4,6	6,0	4,0	11,0
Offene Porosität	Vol. %	14,0	2,5	2,5	2,5	12,0	2,5	10,0	Keine
Temperaturbeständigkeit in ox. Atmosphäre	°C	500	200	260	180	600	500	600	180 <sup>3)</sup>
Temperaturbeständigkeit in red. Atmosphäre	°C	2600	200	260	180	1200	550	1200	180 <sup>3)</sup>
Rund Durchmesser max.	mm	220	220	220	220	220	220		
Rund Höhe max.	mm	260	260	260	260	260	260		
Quader X max.	mm	310	310	310	310	310	310	330	385
Quader Y max.	mm	130	130	130	130	130	130	240	235
Quader Z max.	mm	73	73	73	73	73	73	6,5	8,8
Anwendungsspez. Werkstoffeignung		●	●	●	●	●	●●●	●	●

<sup>1)</sup> Für diese Werkstoffe liegen Atteste zur Verwendung im Trinkwasser und/oder im Kontakt mit Lebensmitteln vor.

<sup>2)</sup> Für diese Werkstoffe liegen Atteste für die Anwendung in Sauerstoffatmosphären vor.

<sup>3)</sup> Kurzzeitig maximale Anwendungstemperatur. Die physikalischen Daten können sich bei Dauerbelastung ändern.

● Nasslauf ● Trockenlauf ● Mischreibung ● Hochbelastet ● Trennschieber



Graphite Materials & Systems | SGL CARBON GmbH  
 Sales Europa/Naher Osten/Afrika | mechanical-europe@sglcarbon.com  
 Sales Amerika | mechanical-americas@sglcarbon.com  
 Sales Asien/Pazifik | mechanical-asia@sglcarbon.com  
 www.fine-grain-graphites.com | www.sglcarbon.com

TDS DIE\_MA\_DE.00  
 05 2018/1 E Printed in Germany  
 ®eingetragene Marken der SGL Carbon SE

Die Angaben in dieser Druckschrift entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse und sollen über unsere Produkte und deren Anwendungsmöglichkeiten informieren. Sie haben somit nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften für einen konkreten Einsatzzweck zuzusichern. Etwaige bestehende gewerbliche Schutzrechte sind zu berücksichtigen. Eine einwandfreie Qualität gewährleisten wir im Rahmen unserer „Allgemeinen Verkaufsbedingungen“.



## SIGRABOND® Premium

**Material:** Carbon fiber-reinforced carbon (C/C)

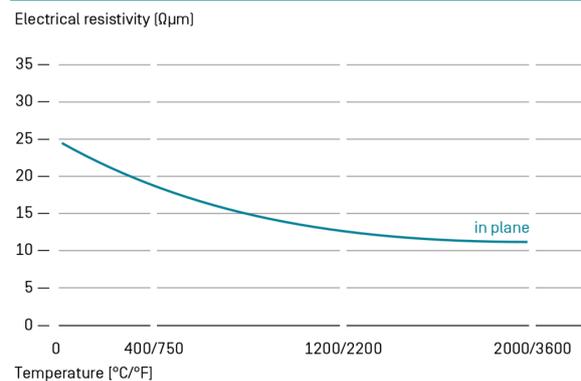
**Application:** High-temperature applications

### Material data of SIGRABOND® Premium

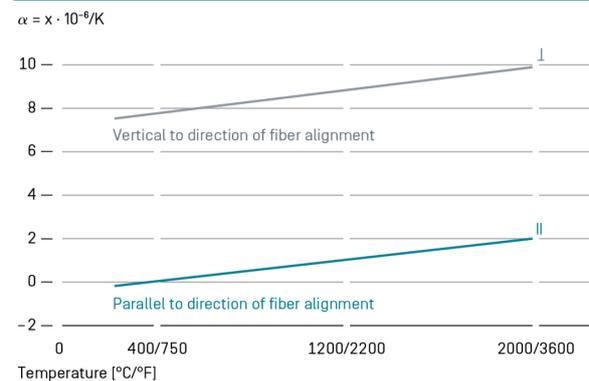
Typical properties	Units	Premium
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.6
Flexural strength	MPa	230
Flexural modulus	GPa	75
Tensile strength	MPa	400
Interlaminar shear strength	MPa	11
Ash content	ppm	1000
Ash content (purified grade)	ppm	< 10
Max. application temperature	°C [°F]	2000 (3600) in vacuum or inert gas

Values without tolerance represent typical average values. For any engineering/design purposes please always contact our technical sales team.

### Specific electrical resistivity of SIGRABOND Premium



### Coefficient of thermal expansion of SIGRABOND Premium



Graphite Materials & Systems | SGL CARBON GmbH  
 Sales Europe/Middle East/Africa | [cfrc-europe@sglcarbon.com](mailto:cfrc-europe@sglcarbon.com)  
 Sales Americas | [cfrc-americas@sglcarbon.com](mailto:cfrc-americas@sglcarbon.com)  
 Sales Asia/Pacific | [cfrc-asia@sglcarbon.com](mailto:cfrc-asia@sglcarbon.com)  
[www.cfrc-and-felts.com](http://www.cfrc-and-felts.com) | [www.sglcarbon.com](http://www.sglcarbon.com)

TDS CFRC-P.00  
 09 2018/1.0 E Printed in Germany  
 \*registered trademarks of SGL Carbon SE

This information is based on our present state of knowledge and is intended to provide general notes on our products and their uses. It should therefore not be construed as guaranteeing specific properties of the products described or their suitability for a particular application. Any existing industrial property rights must be observed. The quality of our products is guaranteed under our "General Conditions of Sale".

Quellen Datenblätter:

- Datenblatt Wolfram [70]
- Datenblatt Rhenium [70]
- Datenblatt Wolfram-Rhenium [70]
- Datenblatt Tantal [70]
- Datenblatt Graphit [71]
- Datenblatt CFC [72]

## **B. APDL-Skript**

In diesem Teil des Anhangs befindet sich das APDL-Skript, das genutzt wurde, um den Elektronenstrahl und dessen Auswirkung auf das Brennbahnmaterial mittels der FE-Methode zu simulieren.

! Commands inserted into this file will be executed just prior to the ANSYS SOLVE command.

! These commands may supersede command settings set by Workbench.

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N, s, V, A)

! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit system.

! See Solving Units in the help system for more information.

ESTIF, 1.0E-10

CSYS,0

CMSEL,ALL

\*GET,EMAX,ELEM,,NUM,MAX

\*GET,EMIN,ELEM,,NUM,MIN

ALLSEL

!Energieverteilung Elektronenstrahl

Q1=2.04e+5

Q2=2.38e+5

Q3=2.00e+5

Q4=1.49e+5

Q5=1.00e+5

Q6=6.08e+4

Q7=3.26e+4

Q8=1.51e+4

Q9=5.45e+3

dt=-0.00001

WTIME=0

CTIME=0

Etime=0

r0=0.005

d=0.003

PI=3.141

VEL=ARG6

!!!!!!!Target & Brennbahn parameter!!!!!!

a=ARG8! Breite

b=0.00005 !Laenge

c=-ARG7 !Tiefe

n\_strikes\_per\_sec = ARG5

frad=5 !frad\*r0 wird als Bereich für den Wärmeeintrag ausgewählt

!time\_weld=0.5

time\_inc=ARG1

time\_steps=ARG2

time\_inc\_cool = ARG3

time\_steps\_cool = ARG4

CTIME=0

cooldownend\_time\_inc = 0.1

colldownend\_time\_steps = ARG9

Etime=0

NROPT,FULL

\*do,il,1,n\_strikes\_per\_sec

\*DO,i,1,time\_steps,1

WTIME=(i\*time\_inc)

TIME,WTIME+(il-1)\*time\_steps\*time\_inc+(il-1)\*time\_steps\_cool\*time\_inc\_cool

HCENTER=VEL\*WTIME

X\_heat=VEL\*WTIME

Y\_heat=0

Z\_heat=0

nsel,s,loc,x,-frad\*r0+X\_heat,frad\*r0+X\_heat

nsel,s,loc,y,-frad\*r0+Y\_heat,frad\*r0+Y\_heat

nsel,s,loc,z,-frad\*r0+Z\_heat,frad\*r0+Z\_heat

esln,s,1

allsel,below,elem

\*GET,EAKT,ELEM,,NUM,MIN

\*get,ELAZ,ELEM,,COUNT

\*Do,jj,1,ELAZ,1

X=CENTRX(EAKT)

Y=CENTRY(EAKT)

Z=CENTRZ(EAKT)

CSI=X+(VEL\*WTIME)

da= ABS(Y)

db=ABS(X-VEL\*WTIME)

\*IF,da,GT,a/2,THEN

Q=0

\*ELSEIF,db,GT,b/2,THEN

Q=0

\*ELSEIF,Z,LT,c,THEN

Q=0

\*ELSEIF,Z,LE,0,AND,Z,GE,dt,THEN

Q=Q1/(a\*b\*ABS(dt))

\*ELSEIF,Z,LE,dt,AND,Z,GE,2\*dt,THEN

Q=Q2/(a\*b\*ABS(dt))

\*ELSEIF,Z,LE,2\*dt,AND,Z,GE,3\*dt,THEN

Q=Q3/(a\*b\*ABS(dt))

\*ELSEIF,Z,LE,3\*dt,AND,Z,GE,4\*dt,THEN

Q=Q4/(a\*b\*ABS(dt))

\*ELSEIF,Z,LE,4\*dt,AND,Z,GE,5\*dt,THEN

Q=Q5/(a\*b\*ABS(dt))

\*ELSEIF,Z,LE,5\*dt,AND,Z,GE,6\*dt,THEN

Q=Q6/(a\*b\*ABS(dt))

\*ELSEIF,Z,LE,6\*dt,AND,Z,GE,7\*dt,THEN

Q=Q7/(a\*b\*ABS(dt))

```
*ELSEIF,Z,LE,7*dt,AND,Z,GE,8*dt,THEN
Q=Q8/(a*b*ABS(dt))

*ELSEIF,Z,LE,dt*8,AND,Z,GE,9*dt,THEN
Q=Q9/(a*b*ABS(dt))

*Else
Q=0

*ENDIF

      BFE,EAKT,HGEN,,Q
      *get,EAKT,elem,EAKT,NXTH
*ENDDO

allsel
SOLVE
BFE,all,HGEN,,0
*ENDDO
*abbr,solve,nplo

*DO,ic,1,time_steps_cool,1

      CTIME=(ic*time_inc_cool)
      TIME,WTIME+(il-1)*time_steps*time_inc+(il-1)*time_steps_cool*time_inc_cool+CTIME

      SOLVE

*ENDDO

*ENDDO
CMSEL,ALL
BFEDELE,ALL,ALL
ALLSEL
TIME,time_inc+n_strikes_per_sec*time_steps*time_inc+time_inc_cool+n_strikes_per_sec*time_steps_cool*time_inc_cool
+Etime
```

## Literaturverzeichnis

- [1] KREBSFORSCHUNGSZENTRUM, KREBSINFORMATIONSDIENST, DEUTSCHES: „Krebsstatistiken: So häufig ist Krebs in Deutschland“, in: *Krebsinformationsdienst* (6.12.2021) (siehe S. 1)
- [2] KRIEGER, H.: *Strahlungsquellen für Technik und Medizin*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013 (siehe S. 1, 5–8, 10, 12, 13, 23)
- [3] SCHLEGEL, W. u. a., Hrsg.: *Medizinische Physik: Grundlagen - Bildgebung - Therapie - Technik*, Lehrbuch, Berlin: Springer Spektrum, 2018 (siehe S. 2, 3, 6, 7, 10, 11, 53)
- [4] GERABEK, W. E. u. a., Hrsg.: *Enzyklopädie Medizingeschichte*, Berlin: de Gruyter, 2005 (siehe S. 3)
- [5] SLATKIN, D. N. u. a.: „Microbeam radiation therapy“, in: *Medical physics* 19 (6) (1992), S. 1395–1400 (siehe S. 3)
- [6] BARTZSCH, S. und OELFKE, U.: „Line focus x-ray tubes-a new concept to produce high brilliance x-rays“, in: *Physics in Medicine and Biology* 62 (22) (2017), S. 8600–8615 (siehe S. 3, 4, 11, 14, 15)
- [7] *esrf, Microbeam Radiation Therapy (MRT)*, 9.02.2021 (siehe S. 4)
- [8] REGNARD, P. u. a.: „Irradiation of intracerebral 9L gliosarcoma by a single array of microplanar x-ray beams from a synchrotron: balance between curing and sparing“, in: *Physics in Medicine and Biology* 53 (4) (2008), S. 861–878 (siehe S. 4)
- [9] BARTZSCH, S. u. a.: „A preclinical microbeam facility with a conventional x-ray tube“, in: *Medical physics* 43 (12) (2016), S. 6301 (siehe S. 4, 5)
- [10] WINTER, J. u. a.: „Clinical microbeam radiation therapy with a compact source: specifications of the line-focus X-ray tube“, in: *Physics and imaging in radiation oncology* 14 (2020), S. 74–81 (siehe S. 4, 11, 17)
- [11] WINTER, J. u. a.: „Heat management of a compact x-ray source for microbeam radiotherapy and FLASH treatments“, in: *Medical physics* 49 (5) (2022), S. 3375–3388 (siehe S. 4, 16–18)

- [12] RUSSO, P., Hrsg.: *Handbook of X-ray Imaging: Physics and Technology*, First edition, Series in Medical Physics and Biomedical Engineering, Boca Raton, FL: Taylor and Francis, 2018 (siehe S. 6)
- [13] BEHLING, R.: *Modern diagnostic X-ray sources: Technology, manufacturing, reliability*, Second edition, Boca Raton: CRC Press, 2021 (siehe S. 7, 9, 11, 23)
- [14] ACERDE SAS: *ACERDE, Thick Tungsten and Rhenium coating by Chemical Vapor Deposition for fusion applications*, 14.06.2022 (siehe S. 7, 53, 65, 76)
- [15] BEHLING, R.: *Modern diagnostic X-ray sources: Technology, manufacturing, reliability*, Boca Raton, London und New York: CRC Press, 2016 (siehe S. 7, 8, 13, 29, 31, 53)
- [16] SCHARDT, P. u. a.: „New x-ray tube performance in computed tomography by introducing the rotating envelope tube technology“, in: *Medical physics* 31 (9) (2004), S. 2699–2706 (siehe S. 7)
- [17] PLANSEE: *Plansee, Werkstoffübersicht: Molybdän*, 17.01.2022 (siehe S. 8, 35, 53, 63, 66)
- [18] G. HUOT, V. FELLMANN und H. POIREL: *Chemical vapor deposition of tungsten coatings on X-ray rotating light anodes made of carbon-based materials*, 17.01.2022 (siehe S. 8, 29, 53, 66, 73, 74, 76, 77)
- [19] HARTL, W., PETER, D. und REIBER, K.: „A metal/ceramic diagnostic X-ray tube“, in: *Philips Technical Review* 41 (4) (), S. 126–134 (siehe S. 8, 11)
- [20] MOHD AZHAR HARIMON: „High temperature fracture toughness and fatigue behavior of Ti-Zr-Mo and W-Re alloys for X-ray tube application“, in: 2017 (siehe S. 8, 53, 67, 68)
- [21] *Acerde, Lightweight target - Acerde*, 17.01.2022 (siehe S. 9)
- [22] PLANSEE: *Plansee, Components for generating X-rays*, 23.03.2022 (siehe S. 9, 10)
- [23] W. HART, D. PETER und K. REIBER: *A metal/ceramic diagnostic X-ray tube*, 1983 (siehe S. 11)
- [24] BARTZSCH, S. u. a.: „Technical advances in x-ray microbeam radiation therapy“, in: *Physics in Medicine and Biology* 65 (2) (2020), 02TR01 (siehe S. 11)
- [25] DIMROTH, A.: *Auslegung einer Lager- und Antriebseinheit für ein neuartiges Röntgentarget zur Strahlentherapie*, 2022 (siehe S. 17, 19, 23, 86)
- [26] HARDING GEOFFREY: „Röntgenstrahler mit einem Flüssigmetall-Target“, Pat. EP0957506A1 (siehe S. 20)
- [27] W. SCHALLER: *Spannungsanalyse und Spannungsbewertung in Verbunden mit Gradientenwerkstoffen*, 2000 (siehe S. 26, 27)

- [28] MUNZ, D. und FETT, T.: *Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe: Versagensablauf, Werkstoffauswahl, Dimensionierung*, Bd. 8, Werkstoff-Forschung und -Technik, Berlin und Heidelberg: Springer, 1989 (siehe S. 27, 56)
- [29] FELIX RÖTSCHER: *Die Maschinenelemente*, 2. Aufl., 1929 (siehe S. 27, 36, 38)
- [30] BIEZENO, C. B. und GRAMMEL, R.: *Technische Dynamik: Zweiter Band Dampfturbinen und Brennkraftmaschinen*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1953 (siehe S. 28, 38)
- [31] HORNBOGEN, E.: *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*, SpringerLink Bücher, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012 (siehe S. 29)
- [32] TOYO-TANSO: *Toyo-tanso, Produktkatalog: toyo-tanso\_g-catalog\_de\_0625\_low* (siehe S. 35, 42, 45, 66)
- [33] GRANTA EDUPACK 2021R2: *Materialdatenbank: Stufe3* (siehe S. 35, 51, 53, 67, 79)
- [34] GRAPHITE-GRAPHITE FELT-CARBON COMPOSITE-MANUFACTURER-CFCCARBON LTD: *3D carbon carbon / C/C composite materials-CFCCARBON*, 2006 (siehe S. 35)
- [35] PROF. DR.-ING. DIETER BOHN: *Machbarkeitsstudie und Konzept einer stationären Schwungradanlage zur dezentralen, verbraucherorientierten Energiespeicherung*, Aachen, 1996 (siehe S. 37)
- [36] TORAYCMA: *toraycma, T300 Standard Moudulus Carbon Fiber Datenblatt*, 2018 (siehe S. 42)
- [37] SCHÜRMAN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: Mit 39 Tabellen*, 2., bearb. und erw. Aufl., VDI-/Buch], Berlin und Heidelberg: Springer, 2007 (siehe S. 42)
- [38] JAWAID, M., THARIQ, M. und SABA, N., Hrsg.: *Failure analysis in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*, Woodhead Publishing series in composites science and engineering, Duxford: Woodhead Publishing, 2019 (siehe S. 45)
- [39] *Max Stress Criterion / Helius Composite / Autodesk Knowledge Network*, 20.04.2022 (siehe S. 45)
- [40] ACROSS USA, I. N., Hrsg.: *CHARACTERISTICS DATA / SPECIFICATIONS -CFC* (siehe S. 45)
- [41] CERAMATERIALS, Hrsg.: *WOVEN CARBON-CARBON COMPOSITE GRADE PROPERTIES* (siehe S. 45)
- [42] NEFTEC, Hrsg.: *Besoke C/C Composite* (siehe S. 45)
- [43] HANS DIETER NAGEL: *Strahlenphysikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik*, 2003 (siehe S. 50)
- [44] BERND-UWE RUNGE: *Röntgenstrahlung (eintägig, Durchführung für den Studiengang Biological Sciences)*, 2017 (siehe S. 50)

- [45] PLANSEE: *Plansee, Werkstoffübersicht: Wolfram*, 17.01.2022 (siehe S. 53, 57–59)
- [46] ZUREK, A. K. und GRAY, G. T.: „DYNAMIC STRENGTH AND STRAIN RATE EFFECTS ON FRACTURE BEHAVIOR OF TUNGSTEN AND TUNGSTEN ALLOYS“, in: *Le Journal de Physique IV 01 (C3)* (1991), S. C3–631–C3–637 (siehe S. 53, 68)
- [47] WOLFRAM INDUSTRIE: *Wolfram und Wolframlegierungen - Wolfram Industrie*, 18.09.2017 (siehe S. 53)
- [48] HELMHOLTZ ZENTRUM MÜNCHEN GMBH, GERMAN RESEARCH CENTER FOR ENVIRONMENTAL HEALTH, INSTITUTE OF RADIATION MEDICINE, NEUHERBERG, GERMANY: *Depth Dose Curve 600keV*, 2022 (siehe S. 55, 60)
- [49] TANABE, T. u. a.: „Temperature dependence of thermal conductivity in W and W–Re alloys from 300 to 1000 K“, in: *Materials Letters 57 (19)* (2003), S. 2950–2953 (siehe S. 57)
- [50] ANTUSCH, S. u. a.: „Mechanical and microstructural investigations of tungsten and doped tungsten materials produced via powder injection molding“, in: *Nuclear Materials and Energy 3-4* (2015), S. 22–31 (siehe S. 57)
- [51] SONDERMETALLE, WHS: *whs-sondermetalle, Datenblatt\_W-Wolfram* (siehe S. 58)
- [52] KF. RYAN: *Yield properties of tungsten and tungsten heavy alloys*, 1993 (siehe S. 58)
- [53] MÜLLER, K.-P.: *Praktische Oberflächentechnik: Vorbehandeln - Beschichten - Beschichtungsfehler - Umweltschutz*, 4., überarbeitete Auflage, JOT-Fachbuch, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2003 (siehe S. 65)
- [54] *FINAL Advanced Materials - Graphit\_Datenblatt*, 17.01.2022 (siehe S. 66)
- [55] MEYER, R.: *Gmelin Handbook of Inorganic and Organometallic Chemistry*, 8. Aufl., Springer Nature, 1969 (siehe S. 66)
- [56] PLANSEE: *Plansee, Werkstoffübersicht: Tantal*, 17.01.2022 (siehe S. 67)
- [57] HABAINY, J. u. a.: „Fatigue behavior of rolled and forged tungsten at 25°, 280° and 480 °C“, in: *Journal of Nuclear Materials 465* (2015), S. 438–447 (siehe S. 67, 68)
- [58] MEHMET CEMAL ATAY: „POLITECNICO DI MILANO Master of Science in Material Engineering and Nanotechnology School of Industrial and Information Engineering REFRACTORY METAL COATINGS ONTO CARBON MATERIALS FOR PLASMA FACING COMPONENTS“, in: (2020) (siehe S. 73)
- [59] HIRAI, T. u. a.: „Failure modes of vacuum plasma spray tungsten coating created on carbon fibre composites under thermal loads“, in: *Journal of Nuclear Materials 392 (1)* (2009), S. 40–44 (siehe S. 73, 76–78)

- [60] GRAPHITPRODUKTE: *Hochtemperatur / Graphitprodukte*, 6.05.2022 (siehe S. 75)
- [61] CARBON, CGT: *cgt-carbon, Materialdatenblatt: CFC Material*, 6.05.2022 (siehe S. 75)
- [62] *Materials Project*, 1.06.2022 (siehe S. 75)
- [63] DU, Y. u. a.: „Assessment of the Potential Diffusion Barriers between Tungsten and Silicon Carbide for Nuclear Fusion Application“, in: *Coatings* 12 (5) (2022), S. 639 (siehe S. 75)
- [64] TAMURA, S. u. a.: „High-temperature properties of joint interface of VPS-tungsten coated CFC“, in: *Journal of Nuclear Materials* 329-333 (2004), S. 711–716 (siehe S. 77)
- [65] HUA, Y. F., LI, Z. und ZHANG, X.: „Inter-diffusion analysis of joint interface of tungsten-Rhenium couple“, in: (2010) (siehe S. 77)
- [66] ACERDE: *Acerde, Poster\_Acerde-PFMC\_EN* (siehe S. 77)
- [67] BÜRCEL, R.: *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik: Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen und -beschichtungen ; mit 70 Tabellen*, 3., überarb. und erw. Aufl., Studium und Praxis, Wiesbaden: Vieweg, 2006 (siehe S. 77, 79)
- [68] SONDERMETALLE, WHS: *whs-sondermetalle, Materialdatenblatt: Re-Rhenium* (siehe S. 78)
- [69] KWAK, N. u. a.: „Tantalum and molybdenum barriers to prevent carbon diffusion in spark plasma sintered tungsten“, in: *Scripta Materialia* 196 (2021), S. 113759 (siehe S. 81, 82)
- [70] SONDERMETALLE, WHS: *Whs-Sondermetalle.de*, 19.06.2022 (siehe S. ix)
- [71] *SGL-Datenblatt-SIGRAFINE-Materialien-fuer-mechanische-Anwendungen-DE*, 2018 (siehe S. ix)
- [72] SGL-CARBON: *SGL-Datasheet-SIGRABOND-Performance-EN*, 2021 (siehe S. ix)

## Tabellenverzeichnis

2.1	Auflistung der gängigsten Materialien zur Herstellung von Röntgen-Anoden [2][22] . . .	10
2.2	Eindringtiefer $d$ der Elektronen in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung [6].	15
3.1	Auflistung aller vorgegebenen Anforderungen. . . . .	18
3.2	Bewertung verschiedener Anodenkonzepten anhand von 8 Kategorien (grün: bestes Konzept, gelb: zweitbestes Konzept, rot: schlechtestes Konzept). . . . .	22
5.1	Materialkennwerte der vorausgewählten Werkstoffe zur Auslegung einer Röntgentarget-Struktur [32][33][17][34]. . . . .	35
5.2	Ergebnisse der Auslegung nach dem Ansatz Scheibe konstanter Dicke für ausgewählte Materialien. . . . .	38
5.3	Ergebnisse der Auslegung nach dem Ansatz "Scheibe gleicher Festigkeit" für ausgewählte Materialien. . . . .	41
5.4	Ergebnisse der Auslegung nach dem Ansatz Scheibe konstanter Dicke bei schrittweiser Erhöhung der Massenrestrestriktion(CFC-Substrat). . . . .	41
5.5	Liste der Material-Parameter einer UD-Lage mit einem 50% Faservolumen-Anteil. . .	42
5.6	Ermittelte Material-Parameter für ein 0/90 CFC-Gewebe mit 50% Faservolumen-Anteil.	43
6.1	Materialeigenschaften für Wolfram und Wolfram-Rhenium Legierungen [18]. . . . .	53
6.2	Material: Wolfram. Elastizitäts-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur [45][51]. .	58
6.3	Material: Wolfram. Plastisches Dehnungsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur [52]. . . . .	58
6.4	Material: Wolfram. Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur [45]. . . .	59
6.5	Material: Wolfram. Thermischer Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperatur [45]. . . . .	59
6.6	Material: Wolfram. Spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur [45]. . . . .	59
6.7	APDL-Input-Parameter der Brennflecksimulation . . . . .	62
7.1	Materialeigenschaften von Wolfram (W), Wolframcarbid (WC) und CFC [18]. . . . .	74

7.2	Material Eigenschaften von Siliziumcarbid (SiC) und Aluminiumoxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) [18]. . . . .	76
7.3	Material Eigenschaften von Rhenium [68] . . . . .	78
7.4	Material Eigenschaften von Wolfram, Tantal, Titan Zirkonium und deren Carbide [33].	79
7.5	Zusammensetzung der unterschiedlichen Phasen 1-11 der Abbildung 7.6 [69]. . . . .	82
8.1	Anpassung der Gesamtleistung in Abhängigkeit der Brennfleckgröße [25]. . . . .	86

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Entstehung von Bremsstrahlung durch die Interaktion der geladenen Teilchen und dem elektrischem Feld des Atomkerns [3]. . . . .	2
1.2	Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung durch die Ionisierung der Anodenatome[3]. . . . .	2
2.1	Schematischer Aufbau einer Stehanoden-Röntgenröhre[2]. . . . .	6
2.2	Schematischer Aufbau einer Drehanoden-Röntgenröhre [2]. . . . .	7
2.3	Schematischer Aufbau einer Drehkolben-Röntgenröhre [2]. . . . .	8
2.4	Verbundanode der Firma Plansee [22]. . . . .	9
2.5	Schematische Darstellung des Energiespektrums verschiedener Anodenmaterialien [3].	10
2.6	Rissbild einer Anode aufgrund thermischer Spannungen [2]. . . . .	10
2.7	Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs auf der Brennbahnoberfläche [2]. .	12
2.8	Schematischer Temperaturverlauf innerhalb der Anodenstruktur als Funktion über die Betriebsdauer (Anlehnung an [2]) . . . . .	13
2.9	Ergebnisse einer Simulation auf Basis der Oosterkamp-Formel [15] . . . . .	13
2.10	Vergleich der berechneten Temperaturdifferenzen nach Oosterkamo und Bartzsch. . .	16
3.1	Abbildung der Brennfleckgeometrie und Definition eines einheitlichen Koordinatensystems [11]. . . . .	18
3.2	Funktionskizze einer Band-Anode. . . . .	19
3.3	Funktionsweise einer Trommelanode[25]. . . . .	19
3.4	Funktionskizze einer Flüssigmetall-Anode [26]. . . . .	20
3.5	Konzeptvorstellung Brennbahnposition. . . . .	23
3.6	Schematische System-Zusammenfassung. . . . .	24

4.1	Kräfte am Element einer rotierenden Scheibe[30]. . . . .	28
4.2	Schematische Darstellung der Abkühlung während einer Umdrehung. . . . .	29
5.1	Ashby-Plot 1, Trägerstruktur-Materialvorauswahl . . . . .	32
5.2	Ashby-Plot 2, Trägerstruktur-Materialvorauswahl . . . . .	33
5.3	Ashby-Plot 3, Trägerstruktur-Materialvorauswahl . . . . .	34
5.4	Ashby-Plot 4, Trägerstruktur-Materialvorauswahl . . . . .	35
5.5	Vergleich der Scheiben-Geometrien nach der Auslegung der Scheibe gleicher Festigkeit für die Werkstoffe CFC und Graphit. . . . .	40
5.6	Verhältnis zwischen Umfangsgeschwindigkeit und Masse einer Scheibe gleicher Festigkeit. . . . .	41
5.7	Abbildung der richtungsabhängigen Materialeigenschaften durch Polardiagramme. . . . .	43
5.8	Geometrisches-Modell der FE-Simulation. . . . .	44
5.9	Spannungsanalyse einer Scheibe aus CFC während eines Betriebs mit 200 Hz. . . . .	46
5.10	Betrachtung der entstehenden Normalspannungen aufgrund einseitiger Versteifung. . . . .	48
5.11	Spannungsanalyse einer Scheibe aus CFC mit zusätzlicher Verstärkung während eines Betriebs mit 200 Hz. . . . .	49
5.12	Mögliches Verformungsbild aufgrund fehlerhafter Fertigung. . . . .	49
6.1	Ashby-Plot 5, Brennbahn-Materialvorauswahl . . . . .	51
6.2	Ashby-Plot 6, Brennbahn-Materialvorauswahl . . . . .	52
6.3	Energieabsorption über Elektroneneindringtiefe innerhalb einer Brennbahn aus Wolfram. . . . .	55
6.4	Ermittelte Temperaturdifferenz nach dem Wärmekapazitätslimit in Abhängigkeit der Elektroneneindringtiefe. . . . .	55
6.5	Ergebnisse einer Monte-Carlo Simulation zur Untersuchung der Energieabsorption in Wolfram. . . . .	60
6.6	Abbildung des Elektronenstrahls mit einer Auflösung von neun Finiten-Elementen. . . . .	61
6.7	Veranschaulichung der inkrementellen Bewegung der Wärmequelle. . . . .	61
6.8	Schematische Aufbau des Simulationsmodells zur Auslegung einer optimalen Brennbahndicke. . . . .	63
6.9	Ergebnisse der Simulation zur Auslegung der optimalen Brennbahndicke. . . . .	64
6.10	Ergebnisse der Simulation zur Auslegung der optimalen Brennbahndicke. Betrachtung des linearen Temperaturverlaufs in einer Tiefe von $1100 \mu m$ . . . . .	64
6.11	Geometrisches Modell zur Analyse der Spannungs- und Temperaturverläufe innerhalb der Brennbahn. . . . .	66

6.12	Dampfdrücke für hoch schmelzende Metalle. . . . .	67
6.13	Verlauf der Hauptnormalspannung in x-Richtung innerhalb eines Brennbahnteilstückes. . . . .	68
6.14	Verlauf der Hauptnormalspannung in y-Richtung innerhalb eines Brennbahnteilstückes. . . . .	69
6.15	Verlauf der Hauptnormalspannung in z-Richtung innerhalb eines Brennbahnteilstückes. . . . .	69
6.16	Ergebnisse der FE-Simulation zur Betrachtung des Temperaturverlaufs innerhalb eines Brennbahn-Teilstückes. . . . .	70
6.17	Temperaturverlauf im Bereich der Kontaktzone zwischen Brennbahn und Trägerstruktur. . . . .	71
6.18	Vergleich zweier Elektronenstrahl-Betriebsmodi. . . . .	72
7.1	Simulation der Phasenbildung im Kontaktbereich von Wolfram und Siliciumcarbid. . . . .	76
7.2	Verfahren des Multischicht-Systems[59]. . . . .	78
7.3	Ellingham-Richardson-Diagramm einiger Karbidreaktionen [67]. . . . .	79
7.4	Simulation der Phasenbildung im Kontaktbereich zwischen Wolfram und Tantalcarbid. . . . .	80
7.5	DICTRA-Diffusionssimulation [69]. . . . .	81
7.6	SEM-Analyse und EPMA von gesinterten Wolfram-Proben . . . . .	81
7.7	Binäres Phasendiagramm Rhenium-Tantal. . . . .	82
7.8	Binäres Phasendiagramm Wolfram-Tantal. . . . .	83
8.1	Schematischer Ablauf des Versuchsplans. . . . .	84
8.2	Schematischer Versuchsaufbau in Anlehnung an eine Stehanode [25]. . . . .	86