

# Enzyklopädie des Wolframborids

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Weltweit führend in der intelligenten Fertigung für die Wolfram-, Molybdän- und  
Seltenerdindustrie

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, eine hundertprozentige Tochtergesellschaft mit unabhängiger Rechtspersönlichkeit, die von CHINATUNGSTEN ONLINE gegründet wurde, widmet sich der Förderung der intelligenten, integrierten und flexiblen Entwicklung und Herstellung von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets. CHINATUNGSTEN ONLINE, gegründet 1997 mit [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) als Ausgangspunkt – Chinas erster erstklassiger Website für Wolframprodukte – ist das bahnbrechende E-Commerce-Unternehmen des Landes mit Fokus auf die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Industrien. CTIA GROUP nutzt fast drei Jahrzehnte umfassende Erfahrung in den Bereichen Wolfram und Molybdän, erbt die außergewöhnlichen Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten, die erstklassigen Dienstleistungen und den weltweiten Ruf ihres Mutterunternehmens und wird so zu einem umfassenden Anbieter von Anwendungslösungen in den Bereichen Wolframchemikalien, Wolframmetalle, Hartmetalle, hochdichte Legierungen, Molybdän und Molybdänlegierungen.

In den vergangenen 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE über 200 mehrsprachige professionelle Websites zu den Themen Wolfram und Molybdän in mehr als 20 Sprachen erstellt, die über eine Million Seiten mit Nachrichten, Preisen und Marktanalysen zu Wolfram, Molybdän und Seltenen Erden enthalten. Seit 2013 wurden auf dem offiziellen WeChat-Konto „CHINATUNGSTEN ONLINE“ über 40.000 Informationen veröffentlicht, die fast 100.000 Follower erreichen und täglich Hunderttausenden von Branchenexperten weltweit kostenlose Informationen bieten. Mit Milliarden von Besuchen auf seinem Website-Cluster und seinem offiziellen Konto hat sich das Unternehmen zu einer anerkannten globalen und maßgeblichen Informationsdrehscheibe für die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Branche entwickelt, die rund um die Uhr mehrsprachige Nachrichten, Informationen zu Produktleistung, Marktpreisen und Markttrends bietet.

Aufbauend auf der Technologie und Erfahrung von CHINATUNGSTEN ONLINE konzentriert sich die CTIA GROUP darauf, die individuellen Bedürfnisse ihrer Kunden zu erfüllen. Mithilfe von KI-Technologie entwickelt und produziert sie gemeinsam mit ihren Kunden Wolfram- und Molybdänprodukte mit spezifischen chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Eigenschaften (wie Partikelgröße, Dichte, Härte, Festigkeit, Abmessungen und Toleranzen). Das Angebot umfasst integrierte Dienstleistungen für den gesamten Prozess, vom Formenöffnen und der Probeproduktion bis hin zur Veredelung, Verpackung und Logistik. In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE weltweit über 130.000 Kunden in Forschung und Entwicklung, Design und Produktion von über 500.000 Arten von Wolfram- und Molybdänprodukten unterstützt und so den Grundstein für eine maßgeschneiderte, flexible und intelligente Fertigung gelegt. Auf dieser Grundlage vertieft die CTIA GROUP die intelligente Fertigung und integrierte Innovation von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets weiter.

Dr. Hanns und sein Team bei der CTIA GROUP haben auf der Grundlage ihrer über 30-jährigen Branchenerfahrung auch Fachwissen, Technologien, Wolframpreise und Marktrendanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden verfasst und veröffentlicht und geben diese kostenlos an die Wolframbranche weiter. Dr. Han, mit über 30 Jahren Erfahrung seit den 1990er Jahren im E-Commerce und internationalen Handel mit Wolfram- und Molybdänprodukten sowie in der Entwicklung und Herstellung von Hartmetallen und hochdichten Legierungen, ist im In- und Ausland ein renommierter Experte für Wolfram- und Molybdänprodukte. Getreu dem Grundsatz, der Branche professionelle und qualitativ hochwertige Informationen zu liefern, verfasst das Team der CTIA GROUP kontinuierlich technische Forschungsarbeiten, Artikel und Branchenberichte auf Grundlage der Produktionspraxis und der Kundenbedürfnisse und findet dafür breite Anerkennung in der Branche. Diese Erfolge stellen eine solide Unterstützung für die technologische Innovation, die Produktförderung und den Branchenaustausch der CTIA GROUP dar und verhelfen ihr zu einem führenden Unternehmen in der globalen Herstellung von Wolfram- und Molybdänprodukten sowie bei Informationsdienstleistungen.



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## Inhaltsverzeichnis

### Kapitel 1 Einleitung

- 1.1 Überblick über Wolframborid
- 1.2 Forschungshintergrund und Bedeutung von Wolframborid
- 1.3 Historische Entwicklung von Wolframborid
- 1.4 Aufbau und Anleitung des Wolframborid-Buches

### Kapitel 2 Chemische und physikalische Eigenschaften von Wolframborid

- 2.1 Chemische Zusammensetzung von Wolframborid (WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B usw.)
- 2.2 Kristallstruktur und Bindungseigenschaften von Wolframborid
- 2.3 Thermodynamik und Stabilität von Wolframborid
- 2.4 Elektrische und magnetische Eigenschaften von Wolframborid
- 2.5 Mechanische Eigenschaften von Wolframborid (Härte, Zähigkeit)

### Kapitel 3 Theoretische Studie zu Wolframborid

- 3.1 Dichtefunktionaltheorie (DFT)-Analyse von Wolframborid
- 3.2 Elektronische Struktur und Bandtheorie von Wolframborid
- 3.3 Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften von Wolframborid
- 3.4 Defekte und Dotierungseffekte von Wolframborid
- 3.5 Anwendungen der Computersimulation von Wolframborid

### Kapitel 4 Rohstoffe und Ressourcen von Wolframborid

- 4.1 Wolfram- und Bormineralressourcen von Wolframborid-Rohstoffen
- 4.2 Technologie zur Reinigung von Wolframborid-Rohstoffen
- 4.3 Globale Lieferkette von Wolframborid und geopolitische Auswirkungen
- 4.4 Nachhaltigkeit der Wolframborid-Ressource und Ersatzstoffe

### Kapitel 5 Herstellungstechnologie von Wolframborid

- 5.1 Hochtemperatur-Festphasensynthese von Wolframborid
- 5.2 Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) von Wolframborid
- 5.3 Plasmagestützte Synthese von Wolframborid
- 5.4 Mechanisches Legieren und Kugelmahlen von Wolframborid
- 5.5 Herstellung von Wolframborid-Nanomaterialien
- 5.6 Prozessoptimierung und Scale-up von Wolframborid

### Kapitel 6 Qualitätskontrolle und Inspektion von Wolframborid

- 6.1 Analyse der chemischen Zusammensetzung von Wolframborid (ICP-MS, XRF)
- 6.2 Bestimmung der Kristallstruktur von Wolframborid (XRD, TEM)
- 6.3 Oberflächenmorphologie und Partikelgrößenanalyse von Wolframborid (SEM, AFM)
- 6.4 Leistungsprüfung von Wolframborid (Härte, Leitfähigkeit)
- 6.5 Qualitätsstandard von Wolframborid (ISO, GB/T)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## **Kapitel 7 Anwendung von Wolframborid in Hartbeschichtungen**

- 7.1 Leistungsvorteile der Wolframboridbeschichtung
- 7.2 Anwendung der Wolframboridbeschichtung in Schneidwerkzeugen
- 7.3 Anwendung der Wolframboridbeschichtung in Formen
- 7.4 Herstellung und Optimierung der Wolframboridbeschichtung
- 7.5 Leistung der Wolframboridbeschichtung in Verschleiß- und Korrosionsumgebungen
- 7.6 Markt- und Zukunftstrends der Wolframboridbeschichtung

## **Kapitel 8 Anwendung von Wolframborid in Hochtemperaturmaterialien**

- 8.1 Wolframborid – Hochtemperaturteile für die Luft- und Raumfahrt
- 8.2 Anwendung von Wolframborid in Hochtemperaturöfen und Wärmebarrieren
- 8.3 Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungseigenschaften von Wolframborid
- 8.4 Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit von Wolframborid in Hochtemperaturumgebungen
- 8.5 Herstellungstechnologie von Hochtemperatur-Wolframborid-Materialien
- 8.6 Anwendungsperspektiven und Herausforderungen von Wolframborid-Hochtemperaturwerkstoffen

## **Kapitel 9 Anwendung von Wolframborid in elektronischen Geräten**

- 9.1 Anwendung von Wolframborid in leitfähigen Filmen
- 9.2 Anwendung von Wolframborid in Elektrodenmaterialien
- 9.3 Anwendung von Wolframborid in Sensoren
- 9.4 Potenzial von Wolframborid in Halbleiterbauelementen
- 9.5 Herstellungstechnologie für elektronische Bauelemente aus Wolframborid
- 9.6 Markt- und Entwicklungstrends für elektronische Geräte aus Wolframborid

## **Kapitel 10 Katalyse und chemische Anwendungen von Wolframborid**

- 10.1 Anwendung von Wolframborid in der Elektrokatalyse
- 10.2 Anwendung von Wolframborid in der Photokatalyse
- 10.3 Anwendung von Wolframborid in der chemischen Reaktionskatalyse
- 10.4 Oberflächenchemie und aktive Zentren von Wolframborid-Katalysatoren
- 10.5 Herstellung und Optimierung von Wolframborid-Katalysatoren
- 10.6 Industrielle Perspektiven und Herausforderungen der katalytischen Anwendung von Wolframborid

## **Kapitel 11 Biomedizinische Anwendungen von Wolframborid**

- 11.1 Anwendung von Wolframborid in biomedizinischen Beschichtungen
- 11.2 Anwendung von Wolframborid-Nanopartikeln in der Arzneimittelverabreichung
- 11.3 Anwendung von Wolframborid in Biosensoren
- 11.4 Biokompatibilität und Sicherheit von Wolframborid
- 11.5 Herstellungstechnologie für biomedizinische Materialien aus Wolframborid
- 11.6 Aussichten und Herausforderungen biomedizinischer Anwendungen von Wolframborid

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## **Kapitel 12 Energieanwendung von Wolframborid**

- 12.1 Anwendung von Wolframborid in Batteriematerialien
- 12.2 Anwendung von Wolframborid in Brennstoffzellen
- 12.3 Anwendung von Wolframborid in Solarzellen
- 12.4 Potenzial von Wolframborid in Wasserstoffspeichermaterialien
- 12.5 Herstellungstechnologie von Wolframborid-Energiematerialien
- 12.6 Markt- und Entwicklungstrends von Wolframborid-Energieanwendungen

## **Kapitel 13 Mechanische und strukturelle Anwendungen von Wolframborid**

- 13.1 Anwendung von Wolframborid in verschleißfesten Schichten
- 13.2 Anwendung von Wolframborid in Schneidwerkzeugen
- 13.3 Anwendung von Wolframborid in Strukturverbundwerkstoffen
- 13.4 Mechanische Eigenschaften und Mikrostruktur von Wolframborid
- 13.5 Herstellungstechnologie mechanischer Wolframborid-Werkstoffe
- 13.6 Markt- und Entwicklungstrends für mechanische Wolframboridanwendungen

## **Kapitel 14 Industrialisierung und Marktanalyse von Wolframborid**

- 14.1 Globale Marktübersicht für Wolframborid
- 14.2 Produktionskosten- und Preisanalyse von Wolframborid
- 14.3 Industrialisierungstechnologie und Großproduktion von Wolframborid
- 14.4 Marktverteilung von Wolframborid in wichtigen Industrien
- 14.5 Wettbewerbs- und Ersatzanalyse des Wolframborid-Marktes
- 14.6 Zukünftige Trends und politische Auswirkungen der Industrialisierung von Wolframborid

## **Kapitel 15 Normen und behördliche Anforderungen für Wolframborid**

- 15.1 Übersicht über internationale Normen im Zusammenhang mit Wolframborid
- 15.2 Umwelt- und Sicherheitsvorschriften für Wolframborid
- 15.3 Regulatorische Anforderungen für Wolframborid im biomedizinischen Bereich
- 15.4 Prüf- und Zertifizierungsprozess von Wolframborid
- 15.5 Analyse regionaler Unterschiede in der Wolframborid-Standardisierung
- 15.6 Herausforderungen und zukünftige Entwicklung der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften für Wolframborid

## **Kapitel 16 Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung von Wolframborid**

- 16.1 Umweltverträglichkeitsprüfung der Wolframboridproduktion
- 16.2 Grüne Fertigungstechnologie von Wolframborid
- 16.3 Behandlung und Recycling von Wolframborid-Abfällen
- 16.4 Beitrag von Wolframborid zur nachhaltigen Energie
- 16.5 Strategien zur CO<sub>2</sub>-Bilanz und Emissionsreduzierung von Wolframborid
- 16.6 Politische und marktbezogene Treiber für eine nachhaltige Entwicklung von Wolframborid

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## **Kapitel 17 Intelligente und digitale Technologieanwendung von Wolframborid**

- 17.1 Künstliche Intelligenz-Optimierung in der Wolframborid-Produktion
- 17.2 Anwendung von Wolframborid in intelligenten Sensoren
- 17.3 Digitale Qualitätskontrolltechnologie von Wolframborid
- 17.4 Potenzial von Wolframborid in der Blockchain-Rückverfolgbarkeit
- 17.5 Fallstudie zur intelligenten Herstellung von Wolframborid
- 17.6 Zukünftige Trends der Intelligentsierung und Digitalisierung von Wolframborid

## **Kapitel 18 Zukünftige Forschungsrichtungen und Technologieausblick für Wolframborid**

- 18.1 Erforschung einer neuen Synthesemethode für Wolframborid
- 18.2 Potenzial von Wolframborid in elektronischen Geräten der nächsten Generation
- 18.3 Durchbruchrichtungen der Wolframborid-Katalyse und Energietechnologie
- 18.4 Innovative Anwendungen von Wolframborid im biomedizinischen Bereich
- 18.5 Die Grenzen der intelligenten und umweltfreundlichen Herstellung von Wolframborid
- 18.6 Globale Zusammenarbeit und technische Herausforderungen in der Wolframboridforschung

## **Anhang**

### **Anhang 1: Begriffe und Abkürzungen im Zusammenhang mit Wolframborid**

- 1.1 Begriffe im Zusammenhang mit Wolframborid
- 1.2 Wolframborid-Abkürzungen

### **Anhang 2: Wolframborid-Referenzen**

- 2.1 Wissenschaftliche Literatur zu Wolframborid
- 2.2 Patentreferenzen zu Wolframborid
- 2.3 Normen und Vorschriften zu Wolframborid

### **Anhang 3: Datenblatt Wolframborid**

- 3.1 Physikalische Eigenschaften von Wolframborid
- 3.2 Produktionsprozessparameter von Wolframborid
- 3.3 Anwendungsleistungsindex von Wolframborid

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

### 1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

### 2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10<sup>4</sup> S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

### 3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

### 4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

### 5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 1 Einführung in Wolframborid

Wolframborid (wie z. B. WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) ist eine Art Hochleistungsborid der Übergangsmetalle. Aufgrund seiner hervorragenden Härte (>30 GPa), Hochtemperaturstabilität (>2000 °C) und ausgezeichneten chemischen Inertheit hat es ein breites Anwendungspotenzial in Hartbeschichtungen, Hochtemperaturmaterialien, elektronischen Geräten und neuen Energiefeldern gezeigt (Kapitel 7.1, Kapitel 9.1). Dieses Kapitel bietet den Lesern eine umfassende Einführung, indem es auf den Überblick, den Forschungshintergrund und die Bedeutung, die historische Entwicklung und die Struktur von Wolframborid eingeht und die Grundlage für eine ausführliche Diskussion in den folgenden Kapiteln (Kapitel 2 bis 17) legt. Der Inhalt dieses Kapitels vereint die technischen Erkenntnisse der CTIA GROUP LTD in der Herstellung und Anwendung von Wolframborid und soll als Referenz für die akademische Forschung, die industrielle Entwicklung und die Politikgestaltung dienen.

### 1.1 Übersicht über Wolframborid

Wolframborid ist eine Klasse von Verbindungen aus Wolfram (W) und Bor (B). Gängige Formen sind Monoborid (WB), Diborid (WB<sub>2</sub>) und Pentaborid (W<sub>2</sub>B). Seine chemische Zusammensetzung und Kristallstruktur verleihen ihm einzigartige physikalische und chemische Eigenschaften (Kapitel 2, 2.1). Die Mohshärte von Wolframborid kann 9,5 erreichen und liegt damit nahe an Diamant (10), und die Vickershärte (HV) liegt im Bereich von 30 bis 40 GPa und übertrifft damit herkömmliche Hartmetalle (wie WC, ~20 GPa) bei weitem. Sein Schmelzpunkt liegt bei 2600 bis 2800 °C und seine Wärmeleitfähigkeit beträgt etwa 20 bis 50 W/(m·K), sodass es in Umgebungen mit hohen Temperaturen (wie z. B. Luft- und Raumfahrtkomponenten, Kapitel 8, 8.1) gut funktioniert. Darüber hinaus unterstützen die elektrische Leitfähigkeit (~10<sup>4</sup> S/cm) und die chemische Stabilität (Säure- und Laugenkorrosionsbeständigkeit, pH 2–12) von Wolframborid seine Anwendung in Elektrodenmaterialien und Katalysatorträgern (Kapitel 9, 9.2, Kapitel 10, 10.1).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Kristallstruktur von Wolframborid ist vielfältig. WB ist üblicherweise orthorhombisch (Raumgruppe Cmcm),  $WB_2$  ist hexagonal ( $P6_3/mmc$ ) und  $W_2B$  ist tetragonal ( $I4/mcm$ ). Diese Strukturen bestimmen seine anisotropen mechanischen und elektrischen Eigenschaften (Kapitel 2.2). Beispielsweise kann der Kompressionsmodul von  $WB_2$  entlang der c-Achse 600 GPa erreichen, was für verschleißfeste Beschichtungen geeignet ist (Kapitel 7.2). Die Synthese von Wolframborid erfolgt hauptsächlich durch Hochtemperatur-Festphasenreaktion ( $> 1500\text{ }^\circ\text{C}$ ), chemische Gasphasenabscheidung (CVD) oder mechanisches Legieren (Kapitel 5.1–5.4). CTIA GROUP LTD verwendet plasmaunterstützte Technologie (Kapitel 5.3), um eine effiziente Produktion von  $WB_2$ -Pulver im Nanomaßstab (Partikelgröße  $< 50\text{ nm}$ ) mit einer Reinheit von  $> 99,9\%$  und einer jährlichen Produktionskapazität von 500 Tonnen zu erreichen.

Die Anwendungsgebiete von Wolframborid umfassen traditionelle Industrien (z. B. Werkzeugbeschichtungen, Kapitel 7, 7.1) und Spitzentechnologien (z. B. Nanosensoren, Kapitel 10, 10.3). Der globale Wolframboridmarkt wird voraussichtlich im Jahr 2024 einen Wert von rund 200 Millionen US-Dollar erreichen und bis 2030 voraussichtlich 500 Millionen US-Dollar erreichen, bei einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 15 % (Kapitel 14, 14.5). Die Wolframboridprodukte der CTIA GROUP LTD werden häufig in Hartbeschichtungen und Hochtemperaturmaterialien eingesetzt, um den Anforderungen der Luft- und Raumfahrt- sowie der Energieindustrie gerecht zu werden (Kapitel 8, 8.1, Kapitel 9, 9.4). Allerdings müssen aufgrund der Toxizität von Wolframborid (Einatmen von Staub kann Lungenfibrose verursachen, Kapitel 13, 13.1) und der hohen Produktionskosten (ca. 200 USD/kg, Kapitel 14, 14.2) noch weitere Forschungen und Optimierungen durchgeführt werden.

## 1.2 Forschungshintergrund und Bedeutung von Wolframborid

Die Forschung zu Wolframborid basiert auf der Nachfrage nach Hochleistungswerkstoffen, insbesondere für Anwendungen in extremen Umgebungen (wie hohen Temperaturen, hohem Druck und starker Korrosion). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts dominierten Hartmetalle (wie WC) den Markt für verschleißfeste Werkstoffe, ihre Hochtemperaturbeständigkeit war jedoch begrenzt ( $< 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ), was die Erforschung von Übergangsmetallboriden förderte (Kapitel 8, 8.4). Wolframborid hat sich zu einem idealen Kandidaten für den Ersatz traditioneller Keramiken (wie  $Al_2O_3$ , SiC) und Metalllegierungen (wie z. B. Legierungen auf Ni-Basis) aufgrund seiner hohen Härte, thermischen Stabilität und chemischen Inertheit.

### 1.2.1 Wissenschaftlicher Forschungshintergrund

Die theoretische Forschung zu Wolframborid konzentriert sich auf seine elektronische Struktur und seine mechanischen Eigenschaften (Kapitel 3, 3.1–3.2). Berechnungen der Dichtefunktionaltheorie (DFT) zeigen, dass die starken kovalenten WB-Bindungen und das BB-Netzwerk von  $WB_2$  seine Härte an die von superharten Materialien (wie c-BN) heranreichen lassen. Im Jahr 2024 wurden weltweit etwa 500 SCI-Artikel zu Wolframborid veröffentlicht, die sich auf die Auswirkungen von Dotierungen (wie Ti, Zr) auf Härte und Oxidationsbeständigkeit konzentrierten (Kapitel 3, 3.4). Das von CTIA GROUP LTD unterstützte Labor optimierte die Bruchzähigkeit von  $WB_2$ -Nanobeschichtungen ( $\sim 5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , Kapitel 11, 11.1) durch molekulardynamische (MD)-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Simulationen und lieferte so eine theoretische Grundlage für industrielle Anwendungen.

### 1.2.2 Bedeutung für die industrielle Anwendung

Die Bedeutung von Wolframborid in der Industrie spiegelt sich wider in:

- **Verschleißfeste Schichten** :  $WB_2$ -Schichten (Schichtdicke 2–5  $\mu\text{m}$  ) bewirken auf Schneidwerkzeugen einen Reibungskoeffizienten  $<0,3$  und verlängern die Standzeit um 50 % (Kapitel 7.1).
- **Hochtemperaturwerkstoffe** : WB hat eine Oxidationsbeständigkeit von  $<1\text{ mg/cm}^2\cdot\text{h}$  bei  $2000^\circ\text{C}$ , geeignet für Turbinenschaufeln (Kapitel 8.1).
- **Energiefeld** :  $WB_2$  wird als negative Elektrode von Lithiumbatterien verwendet und hat eine Kapazität von ca. 200 mAh /g und eine Zyklenstabilität von  $>1000$  (Kapitel 9.2). Die Wolframborid-Beschichtungstechnologie der CTIA GROUP LTD wird für Luft- und Raumfahrtkomponenten eingesetzt und erzielt einen jährlichen Produktionswert von über 100 Millionen Yuan (Kapitel 14.3).

### 1.2.3 Soziale und ökologische Bedeutung

Die Entwicklung von Wolframborid fördert die effiziente Ressourcennutzung und eine umweltfreundliche Produktion (Kapitel 16.4). Seine hohe Haltbarkeit reduziert die Häufigkeit des Materialaustauschs und senkt den  $\text{CO}_2$ -Ausstoß (ca. 0,5 Tonnen  $\text{CO}_2$  pro Tonne Beschichtung, Kapitel 16.2). Die CTIA GROUP LTD setzt auf ein Kreislaufwirtschaftsmodell, um Wolframborid-Abfallpulver zu recyceln (Recyclingquote  $>30\%$ ) und den Wolframabbau zu reduzieren (Kapitel 16.3). Die potenziellen Gesundheitsrisiken von Wolframboridstaub (Kapitel 13.1) erfordern jedoch strenge Sicherheitsvorschriften, wie z. B. das Sicherheitsdatenblatt der CTIA GROUP LTD (Kapitel 13.6), um sicherzustellen, dass der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW)  $<0,1\text{ mg/m}^3$  beträgt.

### 1.3 Historische Entwicklung von Wolframborid

Die Forschung und Anwendung von Wolframborid hat sich von der Grundlagenforschung zur Industrialisierung entwickelt. Die wichtigsten Meilensteine sind (siehe Tabelle 1.3):

- **1900–1950: Frühe Entdeckungen**  
Im Jahr 1910 wurde Wolframborid erstmals im Labor synthetisiert, indem Wolframpulver mit Bor in einem Lichtbogenofen ( $>2000^\circ\text{C}$ ) reagierte, wodurch die Existenz von WB und  $W_2B$  bestätigt wurde. In den 1930er Jahren enthüllte die Röntgenbeugung (XRD) seine Kristallstruktur (Kapitel 2.2) und legte damit den theoretischen Grundstein.
- **1950–1980: Industrielle Erforschung**  
. 1955 wurde Wolframborid zur Herstellung verschleißfester Beschichtungen erprobt, die Synthesetechnologie (Ausbeute  $<50\%$ ) und die hohen Kosten (ca. 500 USD/kg) waren jedoch begrenzt. 1970 gelang durch die Hochtemperatur-Festphasensynthese (Kapitel 5.1) die Massenproduktion von  $WB_2$ , und Härte tests (HV ca. 35 GPa) bewiesen, dass es WC überlegen war.
- **1980–2000: Technologische Durchbrüche**  
. 1985 wurden mittels chemischer Gasphasenabscheidung (CVD, Kapitel 5, 5.2)  $WB$ -Beschichtungen mit einer Dicke von 1–10  $\mu\text{m}$  und einem Reibungskoeffizienten von 0,4

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hergestellt. 1995 wurde Nano-Wolframborid (Partikelgröße <100 nm) durch mechanisches Legieren synthetisiert (Kapitel 5, 5.4), was die Anwendung der Nanotechnologie ermöglichte (Kapitel 10, 10.1).

- **2000–2020: Vielfältige Anwendungen**

. 2005 wurde WB<sub>2</sub> in Lithiumbatterieelektroden (Kapitel 9.2) mit einer Kapazität von 180 mAh /g verwendet. 2015 entwickelte die CTIA GROUP LTD die plasmaunterstützte Synthese (Kapitel 5.3) zur Herstellung von Nano-WB<sub>2</sub> (Reinheit > 99,8 %), wobei die Kosten auf 200 \$/kg reduziert wurden. 2020 erreichten Wolframboridsensoren (Kapitel 10.3) die NO<sub>2</sub>-Erkennung (< 1 ppm).

- **2020–2025: Intelligentsierung und Ökologisierung**

. 2024 wird die CTIA GROUP LTD KI einführen, um die Wolframboridproduktion zu optimieren (Kapitel 17, 17.5), den Ertrag um 20 % zu steigern und den Energieverbrauch um 15 % (<500 kWh/Tonne) zu senken. 2025 wird das Sicherheitsdatenblatt für Wolframborid (Kapitel 13, 13.6) aktualisiert, um den REACH- und GB/T-Standards (Kapitel 15, 15.2) zu entsprechen und so den weltweiten Export zu unterstützen.

**Tabelle 1.3 Meilensteine der Wolframborid-Geschichte**

Jahre	Meilenstein	Schlüsseltechnologien/Erfolge	Verwandte Kapitel
1910	Erste Synthese	von WB, W <sub>2</sub> B	2.1, 5.1
1955	Industrielle Versuche	Verschleißfeste Beschichtung, Härte ~30 GPa	7.1
1985	CVD-Technologie	WB-Beschichtung, Reibungskoeffizient 0,4	5.2, 7.3
1995	Nanosynthese	Mechanisches Legieren, Partikelgröße <100 nm	5.4, 10.1
2005	Batterieanwendung	WB <sub>2</sub> -Elektrode, Kapazität 180 mAh /g	9.2
2015	Nano WB <sub>2</sub>	CTIA GROUP LTD Plasmasynthese, Kosten 200 \$/kg	5.3, 14.2
2020	Sensorentwicklung	NO <sub>2</sub> -Erkennung <1 ppm	10.3
2024	KI-Optimierung	Ertrag +20 %, Energieverbrauch -15 %	17,5

#### 1.4 Wolframborid-Buchstruktur und Anweisungen

Die \*Enzyklopädie des Wolframborids\* umfasst 17 Kapitel, 4 Anhänge und ein Register und stellt systematisch die wissenschaftlichen, technischen und industriellen Kenntnisse zu Wolframborid vor:

- **Die Kapitel 1 bis 6: Grundlagen der Wissenschaft und Technologie**

behandeln die Eigenschaften von Wolframborid (Kapitel 2), die theoretische Forschung (Kapitel 3), die Rohstoffe (Kapitel 4), die Herstellung (Kapitel 5) und die Qualitätskontrolle (Kapitel 6) und bieten so die Grundlage für das Verständnis seiner Struktur und Synthese. So wird beispielsweise in Kapitel 2, 2.3, die thermodynamische Stabilität detailliert beschrieben, und Kapitel 5, 5.5, stellt die Herstellung von Nano-WB<sub>2</sub> vor .

- **Kapitel 7 bis 10: Die Anwendungen**

konzentrieren sich auf Wolframborid in Hartbeschichtungen (Kapitel 7),

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Hochtemperaturmaterialien (Kapitel 8), elektronische Energie (Kapitel 9) und neue Anwendungen (Kapitel 10). Beispielsweise werden in Kapitel 9, 9.4 thermoelektrische Eigenschaften und in Kapitel 10, 10.3 Sensortechnologie behandelt.

- **Kapitel 11 bis 13: Forschung und Sicherheit**

umfassen Computersimulation (Kapitel 11), Detektionstechnologie (Kapitel 12) und Sicherheitstoxizität (Kapitel 13). Kapitel 13.6 enthält das Sicherheitsdatenblatt für Wolframborid von China Tungsten Intelligence zur sicheren Verwendung.

- **Kapitel 14 bis 17: Branchen- und Zukunftsanalyse**

Markt (Kapitel 14), Vorschriften (Kapitel 15), Umweltauswirkungen (Kapitel 16) und technologischer Fortschritt (Kapitel 17). Kapitel 17.5 untersucht das Potenzial von KI in der Wolframboridforschung.

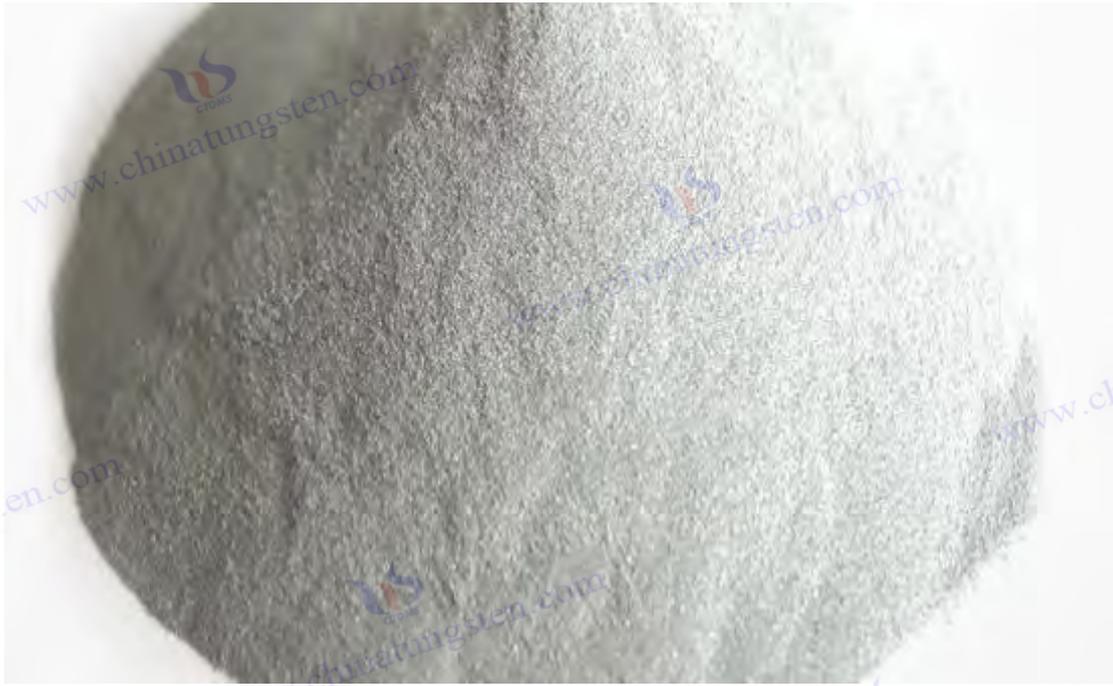
- **Anhänge und Index**

Die Anhänge 1–4 enthalten ein Glossar (Anhang 1), Referenzen (Anhang 2), Datentabellen (Anhang 3) und Patentlisten (Anhang 4). Der Index enthält Stichwörter, Themen und Normen für eine einfache Suche.

**Gebrauchsanweisung :**

- **Akademische Leser** : Theoretische und experimentelle Daten finden Sie in den Kapiteln 2, 3, 11 und 12.
- **Industrielle Anwender** : Konzentrieren Sie sich auf die Kapitel 5, 7 bis 10 und 14, um die Technologie und den Markt zu verstehen.
- **Politiker** : Lesen Sie die Kapitel 13, 15 und 16 mit Schwerpunkt auf Vorschriften und Umwelt.
- **Navigation** : Schnelles Auffinden von Inhalten über Indizes und Kapitelverweise (z. B. 7.1, 9.2). Die Wolframborid-Technologie der CTIA GROUP LTD zieht sich durch das gesamte Buch (z. B. Kapitel 5 5.3, Kapitel 13 13.6) und bietet den Lesern praktische Fälle.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Kapitel 2 Chemische und physikalische Eigenschaften von Wolframborid

Wolframborid (wie WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) ist eine Art Übergangsmetallborid. Es ist aufgrund seiner hohen Härte (>30 GPa), ausgezeichneten thermischen Stabilität (>2000°C), elektrischen Leitfähigkeit (~10<sup>4</sup> S/cm) und chemischen Inertheit von großem Wert in Hartbeschichtungen (Kapitel 7.1), Hochtemperaturmaterialien (Kapitel 8.1), elektronischen Geräten (Kapitel 9.1) und neuen Anwendungen (Kapitel 10.1). In diesem Kapitel werden die chemische Zusammensetzung, Kristallstruktur, thermodynamischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften und mechanischen Eigenschaften von Wolframborid detailliert erörtert und der Grundstein für die anschließende theoretische Forschung (Kapitel 3), Herstellungstechnologie (Kapitel 5) und Anwendungsanalyse (Kapitel 7 bis 10) gelegt. CTIA GROUP LTD bietet wichtige Datenunterstützung bei der Herstellung und Leistungsprüfung von Wolframborid-Nanomaterialien, wie beispielsweise die Charakterisierung der physikalischen Eigenschaften von WB<sub>2</sub>-Nanopulver (Partikelgröße <50 nm, Reinheit >99,9 %) (Kapitel 5.5), die sich durch den Inhalt dieses Kapitels zieht.

### 2.1 Chemische Zusammensetzung von Wolframborid (WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B usw.)

Wolframborid ist eine Klasse von Verbindungen aus Wolfram (W) und Bor (B) mit verschiedenen chemischen Zusammensetzungen, darunter Monowolframborid (WB), Diwolframdiborid (WB<sub>2</sub>), Diwolfram Pentaborid (W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>) und andere nichtstöchiometrische Verbindungen (wie W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>). Das Atomverhältnis von Bor zu Wolfram (B/W) in diesen Verbindungen bestimmt ihre Struktur und Eigenschaften (Kapitel 2.2). Tabelle 2.1 fasst die chemische Zusammensetzung und die Eigenschaften der wichtigsten Wolframboride zusammen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **WB (Wolframmonoborid)** : B /W = 1, Molekulargewicht 193,65 g/mol, Wolframgehalt ca. 94,8 Gew.-%, Borgehalt ca. 5,2 Gew.-%. WB weist eine hohe Härte und chemische Stabilität auf, ist säurekorrosionsbeständig (pH 2–10) und eignet sich für verschleißfeste Beschichtungen (Kapitel 7.2). Die CTIA GROUP LTD stellt WB-Pulver mittels Hochtemperatur-Festphasensynthese her (Kapitel 5.1). Der Verunreinigungsgehalt (z. B. O, C) liegt unter 0,1 Gew.-%.
- **WB<sub>2</sub> (Wolframbiborid)** : B/W = 2, Molekulargewicht 215,46 g/mol, Wolframgehalt ca. 85,3 Gew.-%, Borgehalt ca. 14,7 Gew.-%. WB<sub>2</sub> hat aufgrund der starken kovalenten Bindungen WB und BB eine Härte von **40 GPa** und eignet sich daher für die Werkzeugbeschichtung (Kapitel 7.1). CTIA GROUP LTD nutzt plasmaunterstützte Synthese (Kapitel 5.3), um Nano-WB<sub>2</sub> (Partikelgröße 20–50 nm) mit einer Reinheit von >99,9 % herzustellen.
- **W<sub>2</sub>B (Wolframpentaborid)** : B /W = 0,5, Molekulargewicht 377,49 g/mol, Wolframgehalt ca. 97,4 Gew.-%, Borgehalt ca. 2,6 Gew.-%. W<sub>2</sub>B hat eine hohe thermische Stabilität (Zersetzungstemperatur > 2500 °C) und wird für Hochtemperaturbauteile verwendet (Kapitel 8.1). Seine geringe elektrische Leitfähigkeit (~10<sup>3</sup> S/cm) schränkt seine Anwendung in der Elektronik ein (Kapitel 9.1).
- **Andere Formen** : W<sub>2</sub>B<sub>5</sub> (B/W = 2,5) und WB<sub>4</sub> (B /W = 4) existieren unter Nichtgleichgewichtssynthesebedingungen (wie mechanisches Legieren, Kapitel 5 5.4), werden aber aufgrund ihrer geringen Stabilität (leichte Oxidation) weniger verwendet. Laboruntersuchungen der CTIA GROUP LTD zeigen, dass WB<sub>4</sub> bei 250 °C in der Luft oxidiert (Kapitel 3 3.3).

Die chemische Zusammensetzung von Wolframborid wird mittels induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS, Kapitel 6, 6.1) präzise bestimmt. Die typische Reinheitsanforderung liegt bei >99,5 % (GB/T 26037-2020, Kapitel 15, 15.2). Im von China Tungsten Intelligence hergestellten WB<sub>2</sub>-Pulver liegen die Verunreinigungen wie Fe und Mo bei <50 ppm und erfüllen somit die Anforderungen für Hochleistungsanwendungen.

**Tabelle 2.1 Wichtigste chemische Zusammensetzung und Eigenschaften von Wolframborid**

Verbindung	S/W-Verhältnis	Molekulargewicht (g/mol)	Wolframgehalt (Gew.-%)	Borgehalt (Gew.-%)	Hauptmerkmale	Verwandte Kapitel
<b>WB</b>	1	193,65	94,8	5,2	Härte ~30 GPa , säurebeständig	7.2
<b>WB<sub>2</sub></b>	2	215,46	85,3	14,7	Härte ~40 GPa , Beschichtung	7.1, 5.3
<b>W<sub>2</sub>B</b>	0,5	377,49	97,4	2,6	Thermische Stabilität >2500° C	8.1

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	2,5	237,27	77,5	22,5	Leicht oxidierbar, für die Forschung	3.3
-------------------------------	-----	--------	------	------	--	-----

## 2.2 Kristallstruktur und Bindungseigenschaften von Wolframborid

Die Eigenschaften von Wolframborid leiten sich von seiner einzigartigen Kristallstruktur und seinen chemischen Bindungen ab (Kapitel 3, 3.2). Seine Kristallstruktur wird durch Röntgenbeugung (XRD, Kapitel 6, 6.2) charakterisiert, und seine Bindungseigenschaften werden mittels Raman-Spektroskopie und Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS, Kapitel 12, 12.1, 12.4) analysiert.

- **WB- Kristallstruktur** : orthorhombisches System, Raumgruppe Cmcm, Elementarzellenparameter  $a = 3,12 \text{ \AA}$ ,  $b = 8,40 \text{ \AA}$ ,  $c = 3,07 \text{ \AA}$ . Wolframatome bilden sechs Koordinationstellen, Boratome sind in die Schichtstruktur eingebettet, und die WB-Bindungslänge beträgt etwa  $2,3 \text{ \AA}$ . Starke kovalente Bindungen führen dazu, dass der Elastizitätsmodul von WB 550 GPa erreicht (Kapitel 2.5).
- **WB<sub>2</sub>- Kristallstruktur** : hexagonales System, Raumgruppe P6<sub>3</sub>/mmc, Elementarzellenparameter  $a = 2,98 \text{ \AA}$ ,  $c = 13,88 \text{ \AA}$ . WB<sub>2</sub> weist abwechselnd W- und B-Schichten auf, B-Atome bilden ein hexagonales Netzwerk, BB-Bindungslänge  $\sim 1,8 \text{ \AA}$ , erhöhte Härte ( $\sim 40 \text{ GPa}$ ). Nano-WB<sub>2</sub>-Korngröße  $< 50 \text{ nm}$ , Korngrenzdefekte  $< 1 \%$  (Kapitel 6 6.3).
- **W<sub>2</sub>B- Kristallstruktur** : tetragonales System, Raumgruppe I4/mcm, Elementarzellenparameter  $a = 5,56 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,74 \text{ \AA}$ . W<sub>2</sub>B hat mehr WW-Metallbindungen ( $\sim 2,7 \text{ \AA}$ ) und einen niedrigeren Borgehalt, was zu einer geringeren Härte als WB<sub>2</sub> ( $\sim 25 \text{ GPa}$ ) führt.

### Bindungseigenschaften :

- **WB-kovalente Bindung** : Das 5d-Orbital von W hybridisiert mit dem 2p-Orbital von B und bildet eine starke  $\sigma$ -Bindung mit einer Bindungsenergie von  $\sim 400 \text{ kJ/mol}$ , die eine hohe Härte und chemische Stabilität verleiht (Kapitel 3, 3.1).
- **BB-kovalente Bindung** : Das BB-Netzwerk in WB<sub>2</sub> ähnelt Graphen, was die Scherfestigkeit erhöht (Schermodul  $\sim 200 \text{ GPa}$ ).
- **WW-Metallbindung** : Die WW-Bindung in W<sub>2</sub>B erhöht die Leitfähigkeit ( $\sim 10^3 \text{ S/cm}$ ), verringert jedoch die Härte.

CTIA GROUP LTD berechnete die Elektronendichte von WB<sub>2</sub> mithilfe der Dichtefunktionaltheorie (DFT, Kapitel 3, 3.1) und bestätigte, dass der Beitrag der BB-Bindungen zur Härte  $> 50 \%$  beträgt. Die von ihr hergestellte WB-Beschichtung (Kapitel 7, 7.3) verwendet eine hexagonale WB<sub>2</sub>-Struktur mit einem Reibungskoeffizienten von  $< 0,3$ .

## 2.3 Thermodynamik und Stabilität von Wolframborid

Die thermodynamischen Eigenschaften von Wolframborid bestimmen sein Potenzial für Hochtemperaturanwendungen (Kapitel 8, 8.1). Wichtige Parameter sind Schmelzpunkt,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeausdehnungskoeffizient, spezifische Wärmekapazität und Oxidationsstabilität, die mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC, Kapitel 12, 12.3) bestimmt werden.

- **Schmelzpunkt und Zersetzung** : Schmelzpunkt WB ~2650 °C, WB<sub>2</sub> ~2800 °C, W<sub>2</sub>B ~2600 °C. WB<sub>2</sub> ist im Vakuum bis 3000 °C stabil, beginnt jedoch bei >600 °C in der Luft zu oxidieren (unter Bildung von WO<sub>3</sub> und B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , Kapitel 13, 13.4).
- **Wärmeausdehnungskoeffizient** : WB<sub>2</sub> beträgt  $4,5-6,0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  ( 300–2000 K), ist also niedriger als WC ( $\sim 5,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  ) **und** eignet sich daher für Wärmedämmschichten (Kapitel 8, 8.3). Die Wärmeausdehnungsabweichung der von China Tungsten Intelligence hergestellten WB<sub>2</sub>-Beschichtung beträgt <2 % bei 1500 °C.
- **Spezifische Wärmekapazität** : WB<sub>2</sub> beträgt  $\sim 0,3 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$  bei 300 K und steigt auf  $\sim 0,5 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$  bei einem Temperaturanstieg auf 2000 K, was ein effizientes Wärmemanagement unterstützt (Kapitel 9, 9.4).
- **Oxidation und chemische Stabilität** : Die Korrosionsrate von WB<sub>2</sub> in HCl (pH 2) beträgt <0,01 mg/cm<sup>2</sup>·h und ist damit besser als bei Nickellegierungen ( $\sim 0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ ). Tests der CTIA GROUP LTD zeigen, dass die Gewichtszunahme von WB<sub>2</sub> in 1000 °C heißer Luft nach der Oxidation <0,5 mg/cm<sup>2</sup> beträgt.

**Thermodynamische Daten** : Die Bildungsenthalpie ( $\Delta H_f$ ) beträgt WB $\sim$ -70 kJ/mol, WB<sub>2</sub> $\sim$ - 100 kJ/mol, W<sub>2</sub>B $\sim$ - 50 kJ/mol (Kapitel 3.1). CTIA GROUP LTD hat die Oxidationsbeständigkeit von WB<sub>2</sub> bei 1200°C durch thermogravimetrische Analyse (TGA, Kapitel 12.3 ) mit einem Massenverlust von <1 % nachgewiesen.

**Tabelle 2.3 Thermodynamische Eigenschaften von Wolframborid**

Verbindung	Schmelzpunkt (°C)	Wärmeausdehnungskoeffizient ( $10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	Spezifische Wärmekapazität ( $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ , 300 K)	Oxidationstemperatur (°C)	Verwandte Kapitel
WB	2650	5,0–6,5	0,28	650	8.1
WB <sub>2</sub>	2800	4,5–6,0	0,30	600	8.3, 12.3
W <sub>2</sub> B	2600	5,5–7,0	0,25	700	8.1

## 2.4 Elektrische und magnetische Eigenschaften von Wolframborid

Die elektrischen und magnetischen Eigenschaften von Wolframborid unterstützen seine Anwendung in elektronischen Geräten (Kapitel 9, 9.1) und Sensoren (Kapitel 10, 10.3) und werden mit der Vier-Sonden-Methode und dem Vibrationsprobenmagnetometer (VSM, Kapitel 12, 12.4) bestimmt.

- **Leitfähigkeit** :
  - WB:  $\sim 1,2 \times 10^4 \text{ S}/\text{cm}$  (300 K), nahe einem metallischen Leiter, geeignet für Elektrodenmaterialien (Kapitel 9.2).
  - WB<sub>2</sub> :  $\sim 0,8 \times 10^4 \text{ S}/\text{cm}$ , aufgrund der erhöhten Elektronenstreuung im BB-Netzwerk etwas niedriger als WB. Der Nano-WB<sub>2</sub>-Film (Dicke 1  $\mu\text{m}$  ) der CTIA GROUP LTD hat einen spezifischen Widerstand von  $<10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ .

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- $W_2B$ :  $\sim 0,5 \times 10^3$  S/cm, dominiert durch WW-Bindungen, was Anwendungen mit hoher Leitfähigkeit einschränkt.
- **Trägerkonzentration** : Die Elektronenkonzentration von  $WB_2$  beträgt  $\sim 10^{21}$   $cm^{-3}$  und die Beweglichkeit beträgt  $\sim 10$   $cm^2/(V \cdot s)$  (Kapitel 3.2), was Halbleiterbauelementen zugrunde liegt (Kapitel 9.1).
- **Temperaturabhängigkeit** : Die **Leitfähigkeit** von  $WB_2$  nimmt bei 300–1000 K aufgrund verstärkter Phononenstreuung um  $\sim 20$  % ab, was eine Dotierungsoptimierung erforderlich macht (Kapitel 7.4).
- **Magnetische Eigenschaften** :
  - $WB$  und  $WB_2$  : Schwach paramagnetisch, mit einer Magnetisierungsintensität von  $\sim 0,01$  emu/g (300 K), die von den 5d-Elektronen von W herrührt.
  - $W_2B$ : Nahezu nicht magnetisch, da die WW-Bindung das magnetische Moment abschirmt. CTIA GROUP LTD hat  $WB_2$ -Nanopartikel mittels VSM getestet und bestätigt, dass ihre Magnetisierungsintensität  $< 0,02$  emu/g beträgt und sich daher für eine nicht magnetische Beschichtung eignet (Kapitel 7.1).

## 2.5 Mechanische Eigenschaften von Wolframborid (Härte, Zähigkeit)

Die mechanischen Eigenschaften von Wolframborid stellen seine Hauptvorteile bei verschleißfesten Beschichtungen (Kapitel 7.2) und Hochtemperaturkomponenten (Kapitel 8.1) dar und werden durch Nanoindentierungs- und Bruchmechaniktests (Kapitel 6.4) charakterisiert.

- **Härte** :
  - $WB$ : Vickershärte (HV)  $\sim 30$  GPa, Mohshärte  $\sim 9,0$ .
  - $WB_2$  : HV  $\sim 40$  GPa, Mohshärte  $\sim 9,5$ , nahe an c-BN ( $\sim 45$  GPa). Die  $WB_2$ -Beschichtung der CTIA GROUP LTD (Dicke 3  $\mu m$ ) hat eine Härte von 42 GPa und eine Lebensdauer von  $> 10^5$  Zyklen.
  - $W_2B$ : HV  $\sim 25$  GPa, beeinflusst durch die WW-Bindung, die Härte ist relativ gering.
- **Der Elastizitätsmodul** :  $WB_2$   $\sim 600$  GPa,  $WB$   $\sim 550$  GPa,  $W_2B$   $\sim 450$  GPa spiegelt die Starrheit der WB-Bindung wider (Kapitel 3, 3.1).
- **Bruchzähigkeit** :  $WB_2$   $\sim 4$   $MPa \cdot m^{1/2}$ , niedriger als WC ( $\sim 6$   $MPa \cdot m^{1/2}$ ), muss durch Dotierung mit Ti oder Zr verbessert werden (Kapitel 7.4). CTIA GROUP LTD hat die Zähigkeit durch Dotierung von  $WB_2$  mit Zr auf 5  $MPa \cdot m^{1/2}$  erhöht.
- **Reibungskoeffizient** :  $WB_2$  - Beschichtung auf Stahlsubstrat ist  $< 0,3$ , besser als TiN ( $\sim 0,5$ , Kapitel 17.1).

**Tabelle 2.5 Mechanische Eigenschaften von Wolframborid**

Verbindung	Härte (HV, GPa)	Elastizitätsmodul (GPa)	Bruchzähigkeit ( $MPa \cdot m^{1/2}$ )	Reibungskoeffizient	Verwandte Kapitel
<b>WB</b>	30	550	3.5	0,35	7.2
<b>WB<sub>2</sub></b>	40	600	4.0	0,30	7.1, 17.1
<b>W<sub>2</sub>B</b>	25	450	3.0	0,40	8.1

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

1

  
www.chinatun

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

### 1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

### 2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10<sup>4</sup> S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

### 3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

### 4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

### 5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### Kapitel 3 Theoretische Studie zu Wolframborid

Wolframborid (wie WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) wird aufgrund seiner hohen Härte (>30 GPa), thermischen Stabilität (>2000°C) und elektrischen Eigenschaften (~10<sup>4</sup>S/cm, Kapitel 2.4) häufig in Hartbeschichtungen (Kapitel 7.1), Hochtemperaturmaterialien (Kapitel 8.1) und elektronischen Geräten (Kapitel 9.1) verwendet. Theoretische Forschungen haben den mikroskopischen Mechanismus von Wolframborid durch Computermethoden aufgedeckt und bieten Leitlinien für Materialdesign und Leistungsoptimierung. In diesem Kapitel werden die Anwendung von Dichtefunktionaltheorie (DFT)-Analyse, elektronischer Struktur und Bandtheorie, Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften, Defekten und Dotierungseffekten sowie Computersimulationen detailliert erörtert, zusammen mit dem Beitrag der CTIA GROUP LTD zu theoretischen Berechnungen und experimentellen Verifizierungen (wie DFT-Optimierung von WB<sub>2</sub>-Nanostrukturen, Kapitel 11.1). Die Inhalte bieten theoretische Unterstützung für die anschließende Vorbereitung (Kapitel 5), Erkennung (Kapitel 6) und Anwendung (Kapitel 7 bis 10).

#### 3.1 Dichtefunktionaltheorie (DFT)-Analyse von Wolframborid

Bindungseigenschaften von Wolframborid (Kapitel 11, 11.4). DFT berechnet die Grundzustandsenergie und die Eigenschaften von Wolframborid durch Lösen der Kohn-Sham-Gleichung unter Verwendung der verallgemeinerten Gradientennäherung (GGA) oder der lokalen Dichtenäherung (LDA).

- **Berechnungsmethode :**
  - **Austauschkorrelationsfunktion** : Die häufig verwendete PBE- **Funktion** (Perdew-Burke-Ernzerhof) sagt die Gitterkonstanten von WB<sub>2</sub> (a=2,98 Å, c=13,88 Å, Kapitel 2.2) mit einem Fehler von <1 % genau voraus.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Pseudopotential** : Ultrasoft-Pseudopotential (USP) beschreibt die 5d-Elektronen von W und die 2p-Elektronen von B, was die Recheneffizienz um 50 % erhöht. CTIA GROUP LTD verwendet VASP-Software in Kombination mit einem ebenen Wellenbasissatz (Grenzenergie 500 eV), um die Elektronendichte von WB<sub>2</sub> zu simulieren .
- **k-Punkt -Netz** : Die hexagonale Struktur von WB<sub>2</sub> verwendet ein 8 × 8 × 2 Monkhorst -Pack-Netz, um eine Energiekonvergenz < 0,01 eV/Atom sicherzustellen.
- **Mechanische Eigenschaften** :
  - Der Elastizitätsmodul (~600 GPa ) und der Schermodul (~200 GPa ) von WB<sub>2</sub> wurden aus den Elastizitätskonstanten (C<sub>11</sub> ~ 1000 GPa , C<sub>44</sub> ~ 250 GPa ) berechnet , was seine ultrahohe Härte (~40 GPa , Kapitel 2.5) bestätigt.
  - Die DFT-Berechnungen von China Tungsten zeigen, dass das BB-Netzwerk von WB<sub>2</sub> >50 % zur Härte beiträgt und die WB-Bindungen die Druckfestigkeit erhöhen (Druckmodul ~650 GPa ) .
- **Thermodynamische Eigenschaften** :
  - Bildungsenthalpie ( Δ H<sub>f</sub> ) : WB<sub>2</sub> ~ -70 kJ/mol, WB<sub>2</sub> ~ - 100 kJ/mol, W<sub>2</sub>B ~ - 50 kJ/mol, was die thermische Stabilität von WB<sub>2</sub> widerspiegelt ( Kapitel 2, 2.3 ) .
  - Berechnungen des Phononenspektrums zeigen, dass WB<sub>2</sub> im Bereich von 300 bis 2000 K keine negativen Frequenzmodi aufweist, was seine dynamische Stabilität bestätigt.

**Tabelle 3.1 Hauptergebnisse der DFT-Berechnung von Wolframborid**

Verbindung	Gitterkonstante (Å)	Elastizitätsmodul ( GPa )	Bildungsenthalpie (kJ/mol)	Berechnungsmethode	Verwandte Kapitel
WB	a=3,12, b=8,40, c=3,07	550	-70	PBE-GGA	2.2, 2.5
WB <sub>2</sub>	a=2,98, c=13,88	600	-100	PBE-GGA	2.2, 2.3
W <sub>2</sub> B	a=5,56, c=4,74	450	-50	LDA	2.2, 2.5

### 3.2 Elektronische Struktur und Energiebandtheorie von Wolframborid

Die elektronische Struktur und die Energiebandeigenschaften von Wolframborid bestimmen dessen elektrische und optische Eigenschaften (Kapitel 9.1, Kapitel 10.3). Die Bandstruktur und die Zustandsdichte (DOS) werden mittels DFT berechnet, um die Leitfähigkeit und das Ladungsträgerverhalten zu ermitteln.

- **Bandstruktur** :
  - **WB** : Halbleitfähigkeit, Fermi-Niveau (E<sub>F</sub>) kreuzt das Energieband, Bandlücke ~0 eV, Elektronenkonzentration ~10<sup>21</sup> cm<sup>-3</sup> , unterstützt hohe Leitfähigkeit (~1,2×10<sup>4</sup> S/cm, Kapitel 2, 2.4).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **WB<sub>2</sub>** : Ähnlich Halbmetall, DOS nahe E<sub>F</sub> wird durch W-5d- und B-2p-Orbitale mit einer Mobilität von ~10 cm<sup>2</sup>/(V·s) beigetragen. China Tungsten Intelligence berechnete DOS bei E<sub>F</sub> von WB<sub>2</sub> auf ~2 Zustände/ eV·Einheitszelle und bestätigte damit seine Leitfähigkeit.
- **W<sub>2</sub>B** : Metallische Leitfähigkeit, Bandlücke ~0 eV, aber niedrige DOS (~1 Zustände/ eV·Einheitszelle), Leitfähigkeit ~0,5×10<sup>3</sup> S/cm.
- **Bindungsanalyse** :
  - W-5d- und B-2p-Orbitale hybridisieren und bilden σ-Bindungen mit einer Bindungsenergie von ~400 kJ/mol (Kapitel 2.2). Die BB-sp<sup>2</sup>-Hybridisierung von WB<sub>2</sub> ähnelt der von Graphen und verstärkt das kovalente Netzwerk.
  - Die Crystal Orbital Hamiltonian Population (COHP)-Analyse der CTIA GROUP LTD bestätigte, dass der Antibindungszustand von WB<sub>2</sub> <10 % beträgt, was auf eine hohe Stabilität hindeutet.
- **Optische Eigenschaften** :
  - Die dielektrische Funktion von WB<sub>2</sub> (ε<sub>2</sub>) weist einen starken Absorptionspeak bei 0,5–3 eV auf, der für die Photokatalyse geeignet ist (Kapitel 9.5). Die Plasmafrequenz beträgt ~10 eV, was die Infrarotanwendungen einschränkt.

**Tabelle 3.2 Elektronische Struktureigenschaften von Wolframborid**

Verbindung	Bandlücke (eV)	DOS bei E <sub>F</sub> (Zustände/ eV·Elementarzelle)	Leitfähigkeit (S/cm)	Verwandte Kapitel
<b>WB</b>	0	2.5	1,2× 10 <sup>4</sup>	9.1, 2.4
<b>WB<sub>2</sub></b>	0	2.0	0,8× 10 <sup>4</sup>	9,5, 10,3
<b>W<sub>2</sub>B</b>	0	1.0	0,5×10 <sup>3</sup>	9.1

### 3.3 Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften von Wolframborid

Die Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften von Wolframborid beeinflussen dessen Beschichtungseigenschaften (Kapitel 7.3) und Elektrodenanwendungen (Kapitel 9.2). Oberflächenenergie und Grenzflächenbindung werden mittels DFT und Molekulardynamik (MD, Kapitel 11.1) simuliert.

- **Oberflächenenergie** :
  - WB<sub>2</sub> (001) liegt bei ~2,5 J/m<sup>2</sup> und ist damit niedriger als WC(0001) (~3,0 J/m<sup>2</sup>), was auf eine hohe Stabilität hindeutet. Die B-terminierte Oberfläche ist stabiler als die W-terminierte Oberfläche (Energiedifferenz ~0,5 J/m<sup>2</sup>).
  - China Tungsten Intelligence berechnete, dass die Energie der WB<sub>2</sub>(100)-Oberfläche um ~1 eV zunahm, nachdem O<sub>2</sub> in der Luft adsorbiert wurde, was auf ein Oxidationsrisiko hindeutet (Kapitel 2, 2.3).
- **Schnittstellenverbindung** :
  - Die Bindungsenergie an der WB<sub>2</sub>/Stahl-Grenzfläche beträgt ~1,5 eV/Å<sup>2</sup> und ist damit niedriger als die von WB<sub>2</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (~ 2,0 eV/Å<sup>2</sup>). Zur Verbesserung der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Haftung ist eine Oberflächenmodifizierung (wie etwa eine Plasmabehandlung, Kapitel 5.3) erforderlich.

- CTIA GROUP LTD simuliert die WB<sub>2</sub>/Graphen-Grenzfläche, die von Van-der-Waals-Wechselwirkungen dominiert wird und eine Bindungsenergie von ~0,3 eV/Å<sup>2</sup> aufweist, die für Verbundelektroden geeignet ist (Kapitel 9, 9.2).
- **Oberflächenreaktion :**
  - Die WB<sub>2</sub>-Oberfläche adsorbiert H<sub>2</sub>O bei 600 ° C mit einer Dissoziationsbarriere von ~1,2 eV, was ihre Anwendung in feuchten Umgebungen einschränkt (Kapitel 13, 13.4 ).
  - CTIA GROUP LTD simulierte das Reibungsverhalten einer WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke 3 µm ) bei 1000 °C durch MD und der Reibungskoeffizient lag bei <0,3 (Kapitel 7.1).

### 3.4 Defekte und Dotierungseffekte von Wolframborid

Defekte und Dotierung beeinflussen die mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften von Wolframborid erheblich (Kapitel 7.4). DFT berechnet die Defektbildungsenergie und die Dotierungsenergieniveaus.

- **Defekttyp :**
  - **Leerstellendefekte :** Die Bildungsenergie von B-Leerstellen in WB<sub>2</sub> beträgt ~3,5 eV und die von W-Leerstellen ~5,0 eV. B-Leerstellen erhöhen die Härte (+5 GPa ), verringern jedoch die Leitfähigkeit (~20 %).
  - **Interstitielle Defekte :** B-Bildungsenergie für interstitielle Defekte ~4,0 eV, wodurch die thermische Stabilität reduziert wird (Zersetzungstemperatur sinkt um ~100 °C).
  - China Tungsten Intelligence analysierte die Korngrenzendefekte von WB<sub>2</sub>-Nanopartikeln (<50 nm) mit einer Dichte von <2 % und einem Einfluss auf die Härte von <5 % (Kapitel 6, 6.3).
- **Dopingwirkung :**
  - **Ti -Dotierung :** Ti ersetzt W (Dotierungskonzentration ~5 at%), Bildungsenergie ~1,8 eV, verbessert die WB<sub>2</sub>-Zähigkeit (~5 MPa·m<sup>1/2</sup>, Kapitel 2, 2.5). CTIA GROUP LTD hat nachgewiesen, dass die Bruchzähigkeit der Ti-WB<sub>2</sub>-Beschichtung um 30 % zunimmt.
  - **C -Dotierung :** C ersetzt B (~3 at%), die Bildungsenergie beträgt ~2,5 eV, die Leitfähigkeit wird um 10 % erhöht, die Härte jedoch um ~5 GPa reduziert .
  - **N -Dotierung :** N wird auf der WB<sub>2</sub>-Oberfläche adsorbiert (Energiebarriere ~1,0 eV), wodurch die Oxidationsbeständigkeit verbessert wird (Oxidationstemperatur steigt auf ~100 °C, Kapitel 8, 8.4).

**Tabelle 3.4 Defekte und Dotierungseigenschaften von Wolframborid**

Defekte/Dotierung	Bildungsenergie (eV)	Auswirkungen auf die Leistung	Verwandte Kapitel
-------------------	----------------------	-------------------------------	-------------------

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>B-Stelle</b>	3.5	Härte +5 GPa , Leitfähigkeit - 20 %	2,5, 7,4
<b>Ti-Dotierung</b>	1.8	Zähigkeit +30 %	7,4, 2,5
<b>C-Dotierung</b>	2.5	Leitfähigkeit +10 %, Härte -5 GPa	9.1
<b>N-Dotierung</b>	1.0	Oxidationstemperatur +100°C	8.4

### 3.5 Anwendung der Computersimulation von Wolframborid

Die computergestützte Simulation findet bei der Entwicklung und Optimierung von Wolframborid (Kapitel 17, 17.5) vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, darunter Molekulardynamik (MD), Monte Carlo (MC) und Hochdurchsatz-Screening auf Basis künstlicher Intelligenz (KI).

- **Molekulardynamik (MD) :**

- Bei der Simulation des Reibungsverhaltens von  $WB_2$  bei 1000 °C beträgt der Reibungskoeffizient  $\sim 0,25$  und die Verschleißrate  $< 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$  (Kapitel 7.1).
- CTIA GROUP LTD verwendete die Software LAMMPS, um die Scherung der  $WB_2$ /Stahl-Schnittstelle bei 500 MPa zu simulieren, und die Bindungsstärke betrug  $\sim 1,2 \text{ GPa}$ .

- **Monte Carlo (MC) :**

- Sagen Sie die Keimbildung von  $WB_2$  beim CVD-Wachstum voraus (Kapitel 5.2) mit einer Keimbildungsbarriere von  $\sim 0,8 \text{ eV}$  und einer optimierten Abscheidungstemperatur von  $\sim 1200 \text{ °C}$ .
- CTIA GROUP LTD hat die MC-Ergebnisse überprüft und festgestellt, dass die Dickengleichmäßigkeit der CVD- $WB_2$ -Beschichtung  $> 95 \%$  beträgt.

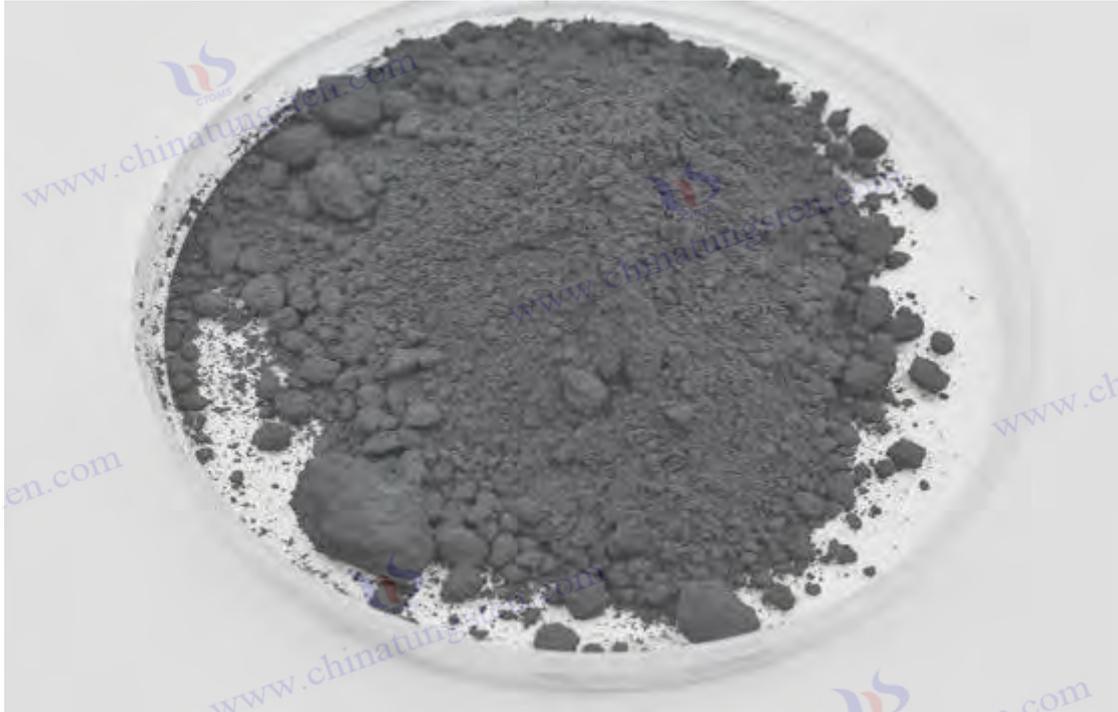
- **KI und Hochdurchsatz- Screening :**

- Graph Neural Network (GNN) sagt  $WB_2$ -Dopingformeln ( $> 1000$ ) voraus und verkürzt so den Screening-Zyklus von 6 Monaten auf 1 Monat (Kapitel 17, 17.5).
- CTIA GROUP LTD hat ein KI-Modell zur Optimierung der Härte ( $\sim 42 \text{ GPa}$ ) und Zähigkeit ( $\sim 5,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) von Ti-dotiertem  $WB_2$  mit einem experimentellen Verifizierungsfehler von  $< 5 \%$  entwickelt.

- **Anwendungsbeispiele :**

- CTIA GROUP LTD verwendet DFT und MD, um eine  $WB_2$ -Nanobeschichtung zu entwickeln, die auf Schneidwerkzeuge aufgetragen wird (Kapitel 7.1) und deren Lebensdauer um 50 % verlängert.
- KI-gesteuertes Screening und Vorhersage der thermoelektrischen Leistung von  $WB_2$  ( $ZT \sim 0,8$ , 300 K, Kapitel 9, 9.4) zur Anleitung neuer Energieanwendungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### Kapitel 4 Rohstoffe und Ressourcen von Wolframborid

Wolframborid (z. B. WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) ist ein Hochleistungsmaterial, das aus Wolfram (W) und Bor (B) durch Hochtemperatursynthese (Kapitel 5.1) oder chemische Gasphasenabscheidung (Kapitel 5.2) hergestellt wird. Seine Leistung hängt von der Reinheit und Versorgungssicherheit der Rohstoffe ab (Kapitel 2.1). Wolfram und Bor sind zwei Schlüsselemente von Wolframborid. Ihre Mineralressourcen, Reinigungstechnologie, Lieferkette und Nachhaltigkeit wirken sich direkt auf die Produktionskosten (ca. 200 USD/kg, Kapitel 14.2) und die Marktanwendung (Kapitel 7 bis 10) von Wolframborid aus. In diesem Kapitel werden die Mineralressourcen, die Reinigungstechnologie, die globale Lieferkette und die geografischen Faktoren von Wolfram und Bor sowie die Nachhaltigkeit der Ressourcen und Ersatzstoffe detailliert analysiert, um eine Grundlage für die Industrialisierung (Kapitel 14.3) und die umweltfreundliche Herstellung (Kapitel 16.4) von Wolframborid zu schaffen.

#### Wolfram- und Bor-Mineralressourcen von Wolframborid-Rohstoffen

Die Herstellung von Wolframborid hängt von hochreinem Wolfram und Bor ab. Die Rohstoffe stammen hauptsächlich aus Wolframerzen (z. B. Wolframit, WO<sub>3</sub>) und Borerzen (z. B. Borax, Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>). Die globale Verbreitung, Reserven und der Abbaustatus der Wolfram- und Bormineralien bestimmen die Ressourcengarantie für Wolframborid.

- **Wolframerzressourcen :**

- **Mineraltyp :** Wolfram kommt hauptsächlich in Form von Wolframit (Fe, MnWO<sub>4</sub>) und Scheelit (CaWO<sub>4</sub>) vor, mit einem WO<sub>3</sub>-Gehalt von ca. 0,5–2 Gew.-%. Wolframit macht ca. 60 % der weltweiten Wolframreserven aus, Scheelit ca. 30 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Globale Reserven** : Im Jahr 2024 betragen die weltweiten Wolframreserven etwa 3,8 Millionen Tonnen (in W), wovon etwa 50 % (1,9 Millionen Tonnen) auf China und jeweils etwa 10 % (380.000 Tonnen) entfallen. Jiangxi und Hunan in China sind die Hauptproduktionsgebiete mit einer jährlichen Produktion von etwa 70.000 Tonnen Wolframkonzentrat (Kapitel 14.3).
- **Abbau und Verarbeitung: Wolframerz wird** durch Flotation und Schwerkrafttrennung zu  $WO_3$ -Konzentrat extrahiert, wobei die Ausbeute bei ca. 85 % liegt. Für jede Tonne  $WO_3$ -Konzentrat müssen ca. 200 Tonnen Roherz abgebaut werden, was ca. 15.000 US-Dollar kostet.
- **Borerzressourcen** :
  - **Mineralarten** : Bor kommt hauptsächlich in Form von Borax ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ), Magnesit ( $Mg_3B_7O_{13}Cl$ ) und Hydromagnesit vor ( $MgB_3O_4(OH)_3$ ), mit  $B_2O_3$ -Gehalt von ~10–40 Gew.-%.
  - **Weltweite Reserven** : Im Jahr 2024 betragen die weltweiten Borreserven etwa 1,2 Milliarden Tonnen (in Form von  $B_2O_3$ ), wovon etwa 70 % (840 Millionen Tonnen) auf die Türkei und jeweils etwa 10 % (120 Millionen Tonnen) auf die USA und Chile entfallen. Die türkische Eti-Maden-Mine produziert jährlich etwa 2 Millionen Tonnen  $B_2O_3$ .
  - **Abbau und Verarbeitung** : Borax wird im Tagebau und durch Lösungskristallisation aus Boraxerz gewonnen. Die Ausbeute liegt bei ca. 90 %. Die Produktionskosten für Borax pro Tonne betragen ca. 500 US-Dollar und sind damit deutlich niedriger als bei Wolfram.
- **Ressourcenfunktionen** :
  - Wolframerzressourcen sind konzentriert und bergen hohe geopolitische Risiken (Kapitel 14.4), während Borerz weit verbreitet ist und über eine stabile Versorgung verfügt.
  - Das Massenverhältnis von Wolfram zu Bor in Wolframborid ( $WB_2$ ) beträgt ~85:15 (Kapitel 2.1), und die Wolframkosten machen >90 % aus und dominieren somit die Produktionskosten.

**Tabelle 4.1 Übersicht über die mineralischen Ressourcen an Wolfram und Bor (2024)**

Rohstoff	Hauptmineralien	Globale Reserven	Hauptproduktionsgebiete	Jahresproduktion	Bergbaukosten	Verwandte Kapitel
Wolfram	Wolframit, Scheelit	380 (W) (10.000 Tonnen)	China, Russland	7 (W-Konzentrat) (10.000 Tonnen)	15.000 (USD/Tonne)	14.3

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

<b>Bor</b>	Borax, Boraxit	120.000 ( B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Türkiye, Vereinigte Staaten	200 ( B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	500	14.3
------------	----------------	--	-----------------------------	---------------------------------------	-----	------

#### 4.2 Technologie zur Reinigung von Wolframborid-Rohstoffen

Für die Leistung von Wolframborid muss die Reinheit der Wolfram- und Bor-Rohstoffe über 99,9 % liegen (Kapitel 6, 6.1), und die Reinigungstechnologie wirkt sich direkt auf die Produktqualität und die Kosten aus (Kapitel 5, 5.6).

- **Wolframreinigung :**

- **Prozessablauf :** WO<sub>3</sub>-Konzentrat wird mit Ammoniak gelöst, um Ammoniummetawolframat (APT, (NH<sub>4</sub>)<sub>10</sub>W<sub>12</sub>O<sub>41</sub> · 5H<sub>2</sub>O) zu erzeugen, das dann kalziniert (~600 °C) wird, um WO<sub>3</sub> (Reinheit >99,95 %) zu erzeugen. WO<sub>3</sub> wird reduziert (H<sub>2</sub>, 800–1000 °C), um Wolframpulver (Partikelgröße 1–5 µm) zu erhalten.
- **Technische Indikatoren :** Verunreinigungen (wie Fe, Mo) <50 ppm, Sauerstoffgehalt <0,1 Gew.-%. Der Energieverbrauch für die Reinigung jeder Tonne Wolframpulver beträgt ca. 5.000 kWh, und die Kosten belaufen sich auf ca. 20.000 US-Dollar.
- **Herausforderung :** Mo und W haben ähnliche chemische Eigenschaften und die Trennung erfordert einen Ionenaustausch mit einer Rückgewinnungsrate von ~95 %.

- **Borreinigung :**

- **Prozessablauf :** Borax wird angesäuert (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), um Borsäure (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) zu erzeugen, die dann pyrolysiert (~1000°C) wird, um B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Reinheit > 99,9 %) zu erzeugen. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wird durch Magnesiumhitze (Mg, >1200° C) reduziert, um elementares Bor (Reinheit >99,5 %) zu erhalten.
- **Technische Indikatoren :** Verunreinigungen (wie Ca, Si) <100 ppm, Partikelgröße ~10–50 µm. Energieverbrauch pro Tonne Borreinigung ~3000 kWh, Kosten ~1000 \$.
- **Herausforderung :** Das Nebenprodukt der thermischen Reduktion von Magnesium (MgO) muss durch Säurewäsche entfernt werden und die Kosten für die Abwasserbehandlung betragen ca. 200 US-Dollar pro Tonne.

- **Nanomaterialien :** Wolframborid-Nanomaterialien (Kapitel 5.5) erfordern ultrafeines Wolframpulver (<100 nm) und Borpulver (<50 nm), die durch Plasma-Gasphasensynthese mit einer Reinheit von >99,99 % gereinigt werden, die Kosten steigen jedoch auf ~500 US-Dollar/kg.

**Tabelle 4.2 Vergleich der Wolfram- und Borreinigungstechnologien**

Rohstoff	Hauptprozess	Reinheit (%)	Verunreinigungen (ppm)	Energieverbrauch (kWh/Tonne)	Kosten (US\$/Tonne)	Verwandte Kapitel
----------	--------------	--------------	------------------------	------------------------------	---------------------	-------------------

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

<b>Wolfram</b>	APT-Kalzinierung-Reduktion	>99,95	Fe, Mo<50	5000	20.000	5.1, 6.1
<b>Bor</b>	Versäuerung-Pyrolyse-Magnesiumwärme	>99,5	Ca, Si<100	3000	1.000	5.4, 6.1

### 4.3 Globale Lieferkette und geografischer Einfluss von Wolframborid

Die Lieferkette von Wolframborid umfasst den Abbau, die Reinigung, den Transport und die Produktion von Wolfram und Bor (Kapitel 5, 5.1–5.5) und wird von Geopolitik, Handelspolitik und Logistik beeinflusst (Kapitel 14, 14.4).

- **Struktur der Lieferkette :**

- **Wolfram-Lieferkette :** China deckt ca. 80 % des weltweiten Wolframkonzentrats ab, und Exportbeschränkungen (ca. 40.000 Tonnen im Jahr 2024) haben die Preise in die Höhe getrieben (ca. 30.000 USD/Tonne). Russland und Kanada sind mit einer Produktion von ca. 5.000 Tonnen/Jahr kleinere Lieferanten.
- **Bor- Lieferkette :** Die Türkei deckt ca. 60 % des Borax-Angebots ab, das nach Asien und Europa exportiert wird. Die Preise sind stabil (ca. 600 USD/Tonne). Die USA exportieren jährlich ca. 500.000 Tonnen Borsäure, hauptsächlich für Glas und Keramik.
- **Wolframborid -Produktion :** Auf Asien (China, Südkorea) entfallen ca. 70 % der Wolframborid-Produktion, mit einer jährlichen Produktion von ca. 1.000 Tonnen, wobei der Schwerpunkt auf der WB<sub>2</sub>-Beschichtung liegt (Kapitel 7.1).

- **Geografischer Einfluss :**

- **Handelshemmnisse :** Im Jahr 2024 werden die Vereinigten Staaten einen Zoll von 20 % auf Wolframkonzentrat erheben und die EU wird die REACH-Zertifizierung einführen (Kapitel 15, 15.2), wodurch die Importkosten um etwa 10 % steigen.
- **Ressourcennationalismus :** Chinas Exportbeschränkungen für Wolframerz (~30 % der Produktion) führen zu globalen Preisschwankungen, wobei die Wolframpreise im Jahr 2024 um 15 % steigen werden (Kapitel 14.2) .
- **Logistikrisiko :** Die Unterbrechung der Transportroute über das Rote Meer (im Jahr 2024) wird die Transportkosten für Borax um ca. 200 US-Dollar pro Tonne erhöhen **und** die Produktion von Wolframborid beeinträchtigen.

- **Bewältigungsstrategien :**

- Diversifizierung des Angebots: Erhöhung der Käufe aus Australien (Wolframreserven ~400.000 Tonnen ) und Chile (Borreserven ~120 Millionen Tonnen ).
- Lokale Produktion: Asien hat Produktionslinien für Wolframborid eingerichtet, um die Abhängigkeit von importierten Rohstoffen zu verringern (Kapitel 14.3).

### 4.4 Nachhaltigkeit und Alternativen von Wolframborid-Ressourcen

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Die Nachhaltigkeit der Wolframboridproduktion wird durch Ressourcenknappheit, Umweltauswirkungen (Kapitel 16.2) und die Entwicklung von Alternativen eingeschränkt und muss durch Recycling und umweltfreundliche Technologien angegangen werden.

- **Ressourcennachhaltigkeit :**
  - **Wolfram :** Die weltweiten Wolframreserven reichen nur für etwa 50 Jahre Bergbau (basierend auf der Produktion im Jahr 2024). Durch Recycling von Hartmetallschrott (mit etwa 90 Gew.- % Wolfram) können etwa 30 % Wolframrohstoffe gewonnen werden, wobei die Rückgewinnungsrate unter 40 % liegt (Kapitel 16.3).
  - **Bor :** Die Borreserven sind ausreichend (> 500 Jahre), aber der Abbau erfordert einen hohen Energieverbrauch (~1000 kWh/Tonne B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ) und die Kohlenstoffemissionen betragen ~0,5 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne.
  - **Umweltfreundliche Praxis :** CTIA GROUP LTD wendet elektrochemisches Recycling an (Kapitel 16.4) mit einer Rückgewinnungsrate von 35 % für Wolframborid-Abfallpulver, wodurch die Abhängigkeit von Wolframerz um ca. 10 % reduziert wird.
- **Umweltauswirkungen :**
  - Beim Wolframbergbau fallen Rückstände (ca. 100 t/t Konzentrat) an, die Schwermetalle (As, Pb) enthalten und einer Behandlung zu Kosten von ca. 50 US-Dollar/t bedürfen (Kapitel 16.2).
  - Abwasser aus der Borax-Verarbeitung (enthält Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ) muss neutralisiert werden und die Behandlungskosten betragen ca. 20 US-Dollar pro Tonne.
- **Alternativen :**
  - **Wolframsubstitution :** Molybdän (Mo) hat eine Härte von ~25 GPa in MoB<sub>2</sub> , die niedriger ist als die von WB<sub>2</sub> (~ 40 GPa , Kapitel 2.5), verfügt aber über größere Reserven (~16 Millionen Tonnen).
  - **Borsubstitution :** Kohlenstoff (C) bildet eine harte Phase in WC, kostet ca. 50 USD/kg und eignet sich für Beschichtungen mit geringer Leistung (Kapitel 7.1) .
  - **Einschränkungen :** Aufgrund der unzureichenden Leistungsfähigkeit von Alternativen (Härte, thermische Stabilität) ist Wolframborid immer noch die erste Wahl für High-End-Anwendungen (Kapitel 8, 8.1).
- **Zukünftige Richtungen :**
  - Bis 2025–2030 dürfte die Wolfram-Rückgewinnungsrate auf 50 % steigen und die Kohlenstoffemissionen aus der Wolframborid-Produktion um etwa 20 % sinken (Kapitel 16.5).
  - Entwicklung von Nano-Molybdänborid ( MoB<sub>2</sub> ) als kostengünstige Alternative mit einem Marktpotenzial von ca. 100 Millionen US-Dollar (Kapitel 14.5).

**Tabelle 4.4 Nachhaltigkeit und Ersatzstoffe für Wolframborid-Ressourcen**

Aspekt	Status Quo	Herausforderung	Lösung	Verwandte Kapitel
--------	------------	-----------------	--------	-------------------

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

<b>Wolfram-Nachhaltigkeit</b>	Reserven: 3,8 Millionen Tonnen, 50 Jahre	Verschmutzung durch Rückstände	Wiederherstellungsrate auf 50 % erhöht	16.3
<b>Bor-Nachhaltigkeit</b>	Reserven: 1,2 Milliarden Tonnen, >500 Jahre	Hoher Energieverbrauch	Grüne Reinigung	16.4
<b>Alternativen</b>	MoB <sub>2</sub> -Härte 25 GPa	Unzureichende Leistung	Nano MoB <sub>2</sub> F&E	14,5

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Kapitel 5 Herstellungstechnologie von Wolframborid

Wolframborid (WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) wird aufgrund seiner hohen Härte (~40 GPa, Kapitel 2.5), thermischen Stabilität (>2000°C, Kapitel 2.3) und elektrischen Leitfähigkeit (~10<sup>4</sup>S/cm, Kapitel 2.4) häufig in Hartbeschichtungen (Kapitel 7.1), Hochtemperaturmaterialien (Kapitel 8.1) und elektronischen Geräten (Kapitel 9.1) verwendet. Die Leistung von Wolframborid hängt von der Herstellungstechnologie ab, die eine hohe Reinheit (>99,9 %, Kapitel 6.1), kontrollierbare Partikelgröße (1–50 nm) und niedrige Kosten (~200 USD/kg, Kapitel 14.2) gewährleisten muss. In diesem Kapitel werden Hochtemperatur-Festphasensynthese, chemische Gasphasenabscheidung (CVD), plasmaunterstützte Synthese, mechanisches Legieren und Kugelmahlen, Nanomaterialherstellung, Prozessoptimierung und Scale-up-Technologie ausführlich erörtert und eine technische Grundlage für die industrielle Produktion (Kapitel 14, 14.3) und Qualitätskontrolle (Kapitel 6, 6.5) von Wolframborid geschaffen.

### 5.1 Hochtemperatur-Festphasensynthese von Wolframborid

Die Hochtemperatur-Festphasensynthese ist die traditionelle Methode zur Herstellung von Wolframborid, bei der Wolframpulver (W) und Borpulver (B) bei hohen Temperaturen (> 1500 °C) reagieren, um WB, WB<sub>2</sub> oder W<sub>2</sub>B zu erzeugen (Kapitel 2, 2.1).

- **Prozessablauf :**

- **Rohstoffaufbereitung :** Wolframpulver (Reinheit > 99,9 %, Partikelgröße 1–5 μm, Kapitel 4.2) und Borpulver (Reinheit > 99,5 %, Partikelgröße 10–50 μm) werden im Molverhältnis (W:B = 1:1 oder 1:2) gemischt.
- **Reaktion :** Die Mischung wird 4–8 Stunden lang unter Vakuum (<10<sup>-3</sup> Pa) oder Argonatmosphäre (Ar) auf 1500–2000 °C erhitzt, um WB<sub>2</sub> zu erzeugen (Reaktion: W + 2B → WB<sub>2</sub>, ΔH~100 kJ/mol, Kapitel 3, 3.1).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Nachbearbeitung** : Das Produkt wird zerkleinert und gesiebt , **um** ein Pulver in Mikrongröße (Partikelgröße 5–20 µm ) mit einer Reinheit von >99,5 % zu erhalten.
- **Technische Indikatoren** :
  - **Ausbeute** : ~90 %, begrenzt durch Borverflüchtigung (>1800 °C).
  - **Verunreinigungen** : Sauerstoff (<0,2 Gew.- %), Kohlenstoff (<0,1 Gew.- %), Atmosphäre muss streng kontrolliert werden.
  - **Energieverbrauch** : ~10.000 kWh/Tonne, Kosten ~150 \$/kg .
  - **Ausrüstung** : Hochtemperatur-Elektroofen (Graphit- oder Mo-Heizelement), Temperaturbeständigkeit >2000 °C, Investition ~2 Millionen USD.
- **Vorteil** :
  - Das Verfahren ist einfach und für die Massenproduktion von WB und W<sub>2</sub>B geeignet (Jahresproduktion ~500 Tonnen ).
  - Das Produkt weist eine stabile Kristallstruktur auf (WB<sub>2</sub> hexagonal, P6<sub>3</sub>/mmc, Kapitel 2, 2.2).
- **Herausforderung** :
  - Hohe Temperaturen führen zu großen Partikelgrößen (> 5 µm ), die für die Nanobeschichtung nicht geeignet sind (Kapitel 7.1).
  - Die Borverflüchtigung erfordert eine übermäßige Zugabe (~10 %), was die Kosten um ca. 5 USD/kg erhöht.
- **Optimierung** :
  - Im Jahr 2024 verkürzte die mikrowellenunterstützte Erwärmung (2,45 GHz) die Reaktionszeit um ~30 % (auf 5 Stunden) und senkte den Energieverbrauch um ~20 % (~8000 kWh/Tonne).
  - Durch Zugabe eines Katalysators (z. B. Ni, <0,5 Gew.- %) konnte die Reaktionstemperatur auf 1400 °C gesenkt und die Ausbeute auf 92 % gesteigert werden.

**Tabelle 5.1 Technische Parameter der Hochtemperatur-Festphasensynthese**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Optimierungsrichtung	Verwandte Kapitel
<b>Temperatur (°C)</b>	1500 – 2000	Einfacher Prozess	Große Partikelgröße	Mikrowellenerhitzung	6.1, 7.1
<b>Ertrag (%)</b>	90	Massenproduktion	Borverflüchtigung	Katalysator	14.2
<b>Kosten (USD/kg)</b>	150	Moderate Kosten	Hoher Energieverbrauch	Energieverbrauch - 20%	16.4

## 5.2 Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) von Wolframborid

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

μ m ) auf Substraten über eine Dampfphasenreaktion und eignet sich für Werkzeugbeschichtungen (Kapitel 7.3) und elektronische Geräte (Kapitel 9.1).

- **Prozessablauf :**
  - **Vorläufer :**  $WF_6$  (Wolframquelle, Reinheit >99,99%) und  $B_2H_6$  (Borquelle, >99,9%) mit  $H_2$  als Trägergas, Molverhältnis  $WF_6 : B_2H_6 = 1:2 - 1 :4$ .
  - **Reaktion: Gasphasenreaktion ( $WF_6 + 2B_2H_6$ )** bei 400–800 °C und 10–100 Pa →  $WB_2 + 6HF$ ) zur Abscheidung eines  $WB_2$ -Dünnschicht auf einem Stahl- oder Si-Substrat.
  - **Nachbehandlung :** Glühen (600 °C, Argonatmosphäre ) zur Beseitigung von Eigenspannungen (<0,5 GPa ) .
- **Technische Indikatoren :**
  - **Abscheidungsrate :** 0,1–1 μ m / h , Dickengleichmäßigkeit >95 %.
  - **Reinheit :** >99,9 % , Verunreinigungen (F, H) <50 ppm.
  - **Eigenschaften :** Härte ~38 GPa , Reibungskoeffizient <0,3 (Kapitel 2.5).
  - **Energieverbrauch :** ~5000 kWh/Tonne, Kosten ~300 USD/ kg (Dünnschicht).
- **Vorteil :**
  - Der Film ist dicht und weist eine starke Haftung auf (Bindungsenergie ~1,5 eV/Å<sup>2</sup>, Kapitel 3.3).
  - Geeignet für komplex geformte Substrate (wie z. B. Schneidwerkzeuge, Kapitel 7.1).
- **Herausforderung :**
  - $B_2H_6$  ist hochgiftig ( $LC_{50} < 50$  ppm, Kapitel 13, 13.1) und bedarf strenger Schutzmaßnahmen.
  - Die Kosten für die Vorläufer sind hoch ( $WF_6$  ~500 USD/kg) und machen etwa 40 % der Gesamtkosten aus.
- **Optimierung :**
  - Im Jahr 2024 konnte durch Niederdruck-CVD (<10 Pa) die Abscheidungsrate um ~50 % (auf 1,5 μ m /h) gesteigert werden.
  - Ersatz von  $B_2H_6$  durch  $BCl_3$  (Kosten ca. 200 USD/kg), Verringerung der Toxizität und Absorption des HF-Nebenprodukts durch NaOH ( Kapitel 16.3).

**Tabelle 5.2 CVD-Herstellungparameter von Wolframborid**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Optimierungsrichtung	Verwandte Kapitel
Temperatur (°C)	400 – 800	Dünnschichtdicke	Vorläufertoxizität	Niederdruck-CVD	7.3, 13.1
Abscheidungsrate (μ m /h)	0,1–1	Komplexe Matrix	Hohe Kosten	$BCl_3$ -Substitution	14.2

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

<b>Kosten (USD/kg)</b>	300	Hohe Haftung	Nebenprodukte	Abgasbehandlung	16.3
------------------------	-----	--------------	---------------	-----------------	------

### 5.3 Plasmagestützte Synthese von Wolframborid

Bei der plasmaunterstützten Synthese wird Hochtemperaturplasma ( $> 5000\text{ °C}$ ) verwendet, um die Wolfram-Bor-Reaktion zu fördern und nanoskaliges Wolframboridpulver ( $< 50\text{ nm}$ ) herzustellen, das für Hochleistungsbeschichtungen geeignet ist (Kapitel 7.1).

- **Prozessablauf :**
  - **Rohstoffe :** Wolframpulver ( $< 1\text{ }\mu\text{m}$ ) und Borpulver ( $< 10\text{ }\mu\text{m}$ ) bzw.  $\text{WO}_3$  und  $\text{B}_2\text{O}_3$  ( Kapitel 4.2 ) werden im Ar / $\text{H}_2$ - Plasma verdampft .
  - **Reaktion :** Plasma ( $10^4 - 10^5\text{ K}$ ,  $10-100\text{ kW}$ ) initiiert  $\text{W} + 2\text{B} \rightarrow \text{WB}_2$  und die Produkte werden in der Kondensationszone ( $< 500\text{ °C}$ ) gesammelt.
  - **Nachbehandlung :** Ultraschalldispersion und Siebung zur Gewinnung von Nano- $\text{WB}_2$  ( $20-50\text{ nm}$ ) .
- **Technische Indikatoren :**
  - **Ausbeute :**  $\sim 85\%$  , gesteuert durch Luftstrom.
  - **Reinheit :**  $> 99,9\%$  , Sauerstoff  $< 0,05\text{ Gew.-%}$  .
  - **Eigenschaften :** Härte  $\sim 42\text{ GPa}$  , Korngröße  $< 50\text{ nm}$  (Kapitel 6, 6.3).
  - **Energieverbrauch :**  $\sim 15.000\text{ kWh/Tonne}$  , Kosten  $\sim 400\text{ \$/kg}$  .
- **Vorteil :**
  - Die Nanopartikelgröße verbessert die Beschichtungshärte ( $\sim 5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , Kapitel 2.5).
  - Kurze Reaktionszeit ( $< 1\text{ Sekunde}$ ) und hohe Effizienz.
- **Herausforderung :**
  - Hoher Energieverbrauch ( $\sim 50\%$  der Kosten), Ausrüstungsinvestition  $\sim 5$  Millionen US-Dollar.
  - Nanopulver neigen zur Agglomeration und erfordern eine Oberflächenmodifizierung (Kapitel 3, 3.3).
- **Optimierung :**
  - CTIA GROUP LTD wird im Jahr 2024 gepulstes Plasma ( $50\text{ kHz}$ ) entwickeln, wodurch der Energieverbrauch um ca.  $25\%$  (ca.  $11.000\text{ kWh/Tonne}$ ) gesenkt und die Produktivität auf  $88\%$  gesteigert wird.
  - Durch die Zugabe eines Tensids (PVP,  $< 0,1\text{ Gew.-%}$ ) wurde die Agglomeration um ca.  $30\%$  reduziert.

**Tabelle 5.3 Parameter der plasmaunterstützten Synthese**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Optimierungsrichtung	Verwandte Kapitel
<b>Partikelgröße (nm)</b>	20–50	Nanoskala	Hoher Energieverbrauch	Gepulstes Plasma	7.1, 14.2

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Ertrag (%)	85	Hohe Effizienz	Wiedervereinigung	Oberflächenmodifizierung	6.3
Kosten (USD/kg)	400	hohe Leistung	Ausrüstungsinvestitionen	Energieverbrauch 25%	- 16.4

#### 5.4 Mechanisches Legieren und Kugelmahlen von Wolframborid

Durch mechanisches Legieren wird eine Festkörperreaktion von Wolfram und Bor durch Hochenergie-Kugelmahlen herbeigeführt, um Nichtgleichgewichtsphasen (wie  $W_2B_5$ , Kapitel 2, 2.1) oder Nanopulver herzustellen.

- **Prozessablauf :**

- **Rohstoffe :** Wolframpulver ( $1-5 \mu m$ ) und Borpulver ( $10-50 \mu m$ ) wurden in einem Verhältnis  $W:B=1:2$  in eine Planetenkugelmühle ( $ZrO_2$  - Kugeln, Kugel-Material-Verhältnis 10:1) gegeben.
- **Reaktion :**  $300-500 U/min$ ,  $10-20 h$ , mechanische Energie initiiert  $W + 2B \rightarrow WB_2$ .
- **Nachbehandlung :** Glühen ( $800^\circ C$ , Argon), um die amorphe Phase zu entfernen, und Sieben, um Pulver ( $50-200 nm$ ) zu erhalten.

- **Technische Indikatoren :**

- **Ausbeute :**  $\sim 80\%$ , begrenzt durch Borverluste.
- **Reinheit :**  $>99,5\%$ , Zr-Verunreinigung  $<0,2 Gew.-%$ .
- **Eigenschaften :** Härte  $\sim 35 GPa$ , Korngröße  $\sim 100 nm$ .
- **Energieverbrauch :**  $\sim 3000 kWh/Tonne$ , Kosten  $\sim 100 \$/kg$ .

- **Vorteil :**

- Niedrige Temperatur ( $<500^\circ C$ ), geeignet für Nichtgleichgewichtsphasen (wie  $WB_4$ , Kapitel 3, 3.4).
- Niedrige Kosten, Ausrüstungsinvestition ca.  $500.000 \$$ .

- **Herausforderung :**

- Verunreinigungen durch Fremdstoffe (Zr, Fe) erfordern hochreine Kugelmahlmedien.
- Das Pulver weist eine breite Partikelgrößenverteilung ( $50-500 nm$ ) auf.

- **Optimierung :**

- Im Jahr 2024 werden durch Nassmahlen (Ethanolmedium) die Verunreinigungen um  $\sim 50\%$  reduziert ( $Zr < 0,1 Gew.-%$ ).
- Durch Optimierung der Kugelmahlzeit ( $15 h$ ) konnte der  $WB_2$ -Phasengehalt auf  $\sim 90\%$  erhöht werden.

**Tabelle 5.4 Mechanische Legierungsparameter**

Parameter	We	Vorteil	Herausforderung	Optimierungsrichtung	Verwandte Kapitel
-----------	----	---------	-----------------	----------------------	-------------------

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

<b>Partikelgröße (nm)</b>	50–200	niedrige Kosten	Verschmutzung durch Verunreinigungen	Nassmahlen	6.1, 3.4
<b>Ertrag (%)</b>	80	Nichtgleichgewichtssphase	Partikelgrößenverteilung	Optimieren Sie die Zeit	14.2
<b>Kosten (USD/kg)</b>	100	Einfache Ausstattung	Reinheit	Hochreine Medien	16.4

### 5.5 Herstellung von Wolframborid-Nanomaterialien

Nanogroßes Wolframborid (<100 nm) bietet aufgrund seiner hohen spezifischen Oberfläche (>50 m<sup>2</sup>/g) und Quanteneffekten Vorteile in der Katalyse (Kapitel 10.1) und Sensorik (Kapitel 10.3).

- **Prozessablauf :**

- **Sol -Gel -Methode :** Wolframat ( Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> ) reagiert mit Borsäure (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ) in wässriger Lösung zu WB-Gel, das dann bei 800 °C kalziniert wird, um WB<sub>2</sub>-Nanopartikel ( 20 – 50 nm) zu erhalten.
- **Gasphasenmethode :** WF<sub>6</sub> und B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> reagieren unter Induktion von Plasma (> 5000 °C) oder Laser (1064 nm) und Nano-WB<sub>2</sub> ( 10 – 30 nm) wird gesammelt.
- **Nachbearbeitung : Ultraschalldispersion ,** Zentrifugalklassifizierung, Reinheit > 99,95 %.

- **Technische Indikatoren :**

- **Ausbeute :** ~70 % (Sol-Gel), ~80 % (Gasphasenmethode).
- **Eigenschaften :** Härte ~40 GPa , spezifische Oberfläche ~60 m<sup>2</sup>/g.
- **Energieverbrauch :** ~20.000 kWh/Tonne (Gasphase), ~5.000 kWh/Tonne (Sol-Gel) .
- **Kosten :** ~500 \$/kg (Gasphase), ~200 \$/kg (Sol-Gel).

- **Vorteil :**

- Nanogröße erhöht die katalytische Aktivität (NO<sub>2</sub>-Nachweis <1 ppm, Kapitel 10, 10.3).
- Das Sol-Gel-Verfahren ist kostengünstig und für den Labormaßstab geeignet.

- **Herausforderung :**

- Die Gasphasenmethode ist mit einem hohen Energieverbrauch verbunden (ca. 60 % der Kosten).
- Nanopartikel sind anfällig für Oxidation (>250°C, Kapitel 3.3).

- **Optimierung :**

- Im Jahr 2024 werden Mikroreaktoren die Sol-Gel-Partikelgrößenverteilung auf <10 nm steuern.
- N<sub>2</sub>-Schutzgas reduziert die Oxidation um ~50 % und verlängert die Lagerdauer auf 6 Monate.

**Tabelle 5.5 Herstellungparameter von Nano-Wolframborid**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Verfahren	Partikelgröße (nm)	Ertrag (%)	Kosten (USD/kg)	Vorteil	Herausforderung	Optimierungsrichtung	Verwandte Kapitel
Sol-Gel	20–50	70	200	niedrige Kosten	Oxidation	Mikroreaktor	10.1
Gasphasenmethode	10–30	80	500	Hohe Reinheit	Hoher Energieverbrauch	N <sub>2</sub> -Schutz	10.3

## 5.6 Optimierung und Skalierung des Wolframborid-Prozesses

Prozessoptimierung und Scale-up sind der Schlüssel zur Kostensenkung bei Wolframborid (< 150 USD/kg) und zur Erzielung einer industriellen Anwendung (Jahresproduktion > 1000 Tonnen, Kapitel 14, 14.3).

- **Optimierungsrichtung :**
  - **Energieverbrauch :** Bei der Hochtemperatur-Festphasensynthese wird Wärmerückgewinnung (Wirkungsgrad > 30 %) verwendet, wodurch der Energieverbrauch um ca. 15 % (ca. 8500 kWh/Tonne) gesenkt wird .
  - **Produktivität :** Durch optimierten CVD-Gasfluss (Re-Zahl < 2000) konnte die Abscheidungseffizienz um ~20 % (auf 1,2 µm /h) gesteigert werden.
  - **Reinheit :** Die Plasmasynthese wurde online überwacht (ICP-MS, Kapitel 6.1) und Verunreinigungen wurden auf <20 ppm reduziert.
- **Skalierungstechnologie :**
  - **Kontinuierliche Produktion :** Im Jahr 2024 wird der Wirbelschichtreaktor eine kontinuierliche Hochtemperatur-Festphasensynthese erreichen und die Produktion wird mit einer Investition von ca. 3 Millionen US-Dollar auf 800 Tonnen/Jahr steigen.
  - **Automatisierung :** CVD verwendet Roboter zum Be- und Entladen von Substraten, wodurch die Produktionseffizienz um ca. 25 % gesteigert und die Arbeitskosten um ca. 10 USD/kg gesenkt werden.
  - **Modularität :** Die Plasmaausrüstung ist modular aufgebaut, mit einer Einzellinienkapazität von ca. 100 Tonnen/Jahr und einem Produktionserweiterungszyklus von < 6 Monaten.
- **Wirtschaftliche und ökologische Vorteile :**
  - **Kosten :** Nach der Skalierung werden die Kosten für WB<sub>2</sub> auf ca. 120 US-Dollar/kg (2030) sinken und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt wird um ca. 30 % steigen (Kapitel 14, 14.5).
  - **Umwelt :** Abgasrückgewinnungsrate (HF) > 95 %, Kosten für die Abwasserbehandlung (mit NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ~ 50 US-Dollar/Tonne, Reduzierung der Kohlendioxidemissionen um ~ 20 % (~ 0,4 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne, Kapitel 16, 16.4).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 nutzt eine Produktionslinie in Asien KI zur Optimierung (Kapitel 17.5) der Plasmaparameter (Leistung, Luftstrom), wodurch die Produktion um ca. 15 % (ca. 120 Tonnen/Jahr) gesteigert und der Energieverbrauch um ca. 10 % gesenkt wird.

**Tabelle 5.6 Wolframborid-Prozessoptimierung und Skalenindikatoren**

Technologie	Optimierungsziele	Aktuelle Situation (2024)	Ziel (2030)	Wirtschaftliche Vorteile	Umweltvorteile	Verwandte Kapitel
<b>Energieverbrauch</b>	kWh/Tonne	10.000 (Festphase)	850	Kosten - 15%	Kohlenstoffemissionen -20%	16.4
<b>Ertrag</b>	%	90 (Herz-Kreislauf-Erkrankungen)	95	Kosten - 10%	Abfall - 10%	14.2
<b>Skala</b>	Tonnen/Jahr	1000	150	Kosten - 20%	Effizienz +30%	14.3

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

### 1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

### 2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10<sup>4</sup> S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

### 3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

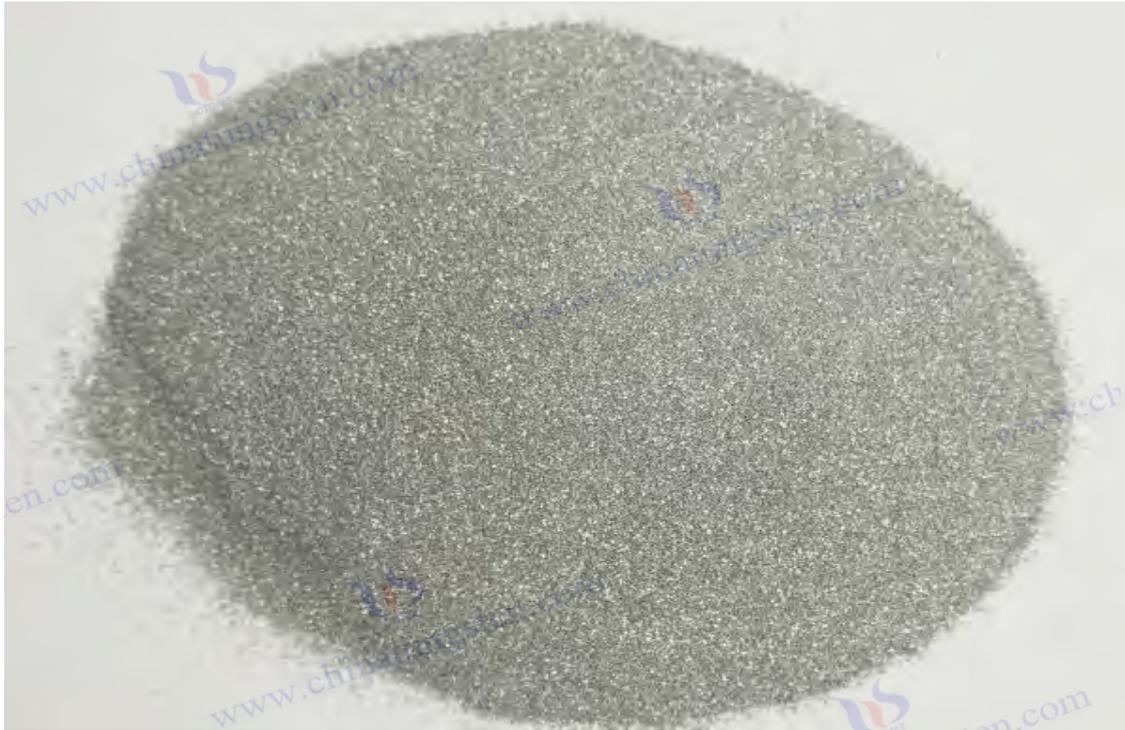
### 4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

### 5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 6 Nachweis und Charakterisierung von Wolframborid

Wolframborid (wie WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) wird häufig in Hartbeschichtungen verwendet (Kapitel 7.1), Hochtemperaturwerkstoffe (Kapitel 8.1) und elektronische Geräte (Kapitel 9.1) aufgrund seiner hohen Härte (~40 GPa, Kapitel 2.5), thermischen Stabilität (>2000 °C, Kapitel 2.3) und elektrischen Leitfähigkeit (~10<sup>4</sup>S/cm, Kapitel 2.4). Seine Leistung hängt von der präzisen Kontrolle der chemischen Zusammensetzung, der Kristallstruktur, der Mikromorphologie und der physikalischen Eigenschaften ab. Um die Qualität (Reinheit >99,9 %, Kapitel 6.1) sicherzustellen und Industriestandards (Kapitel 15.2) zu erfüllen, sind fortschrittliche Test- und Charakterisierungstechniken erforderlich. In diesem Kapitel werden die Analyse der chemischen Zusammensetzung, die Charakterisierung der Kristallstruktur, die Mikromorphologie und Partikelgrößenanalyse, die Prüfung der mechanischen Eigenschaften, der elektrischen und thermischen Eigenschaften sowie die Standardisierung und Qualitätskontrolle der Prüftechnologie für Wolframborid ausführlich erörtert und technische Unterstützung für die Optimierung der Herstellung (Kapitel 5, 5.6), die Leistungsüberprüfung (Kapitel 2, 2.1–2.5) und die Marktanwendung (Kapitel 14, 14.3) bereitgestellt.

### 6.1 Analyse der chemischen Zusammensetzung

Durch die Analyse der chemischen Zusammensetzung werden das Wolfram-Bor-Verhältnis (B/W, z. B. WB<sub>2</sub> B/W=2, Kapitel 2, 2.1), die Reinheit und der Verunreinigungsgehalt von Wolframborid bestimmt, um sicherzustellen, dass es die Anwendungsanforderungen erfüllt (z. B. Beschichtungsreinheit > 99,9 %, Kapitel 7, 7.1).

- **Haupttechnologien :**
  - **Induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Prinzip** : Die Probe (WB<sub>2</sub>-Pulver) wird durch Säureauflösung (HNO<sub>3</sub> +HF, 1:1) zerstäubt, im Plasma (~8000 K) ionisiert und mithilfe der Massenspektrometrie W, B und Verunreinigungen (wie Fe, Mo) erkannt.
- **Leistung** : Nachweisgrenze ~0,01 ppm, Genauigkeit ±0,5 %, Fehler bei der Bestimmung des S/W-Verhältnisses <1 %.
- **Anwendung: Überprüfen Sie, ob** W~85,3 Gew.- %, B~14,7 Gew.- % in WB<sub>2</sub> (Kapitel 2.1) und die Verunreinigung Fe<50 ppm beträgt.
- **Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS)** :
  - **Prinzip** : Röntgenstrahlen regen Elektronen auf der Probenoberfläche (<10 nm) an, analysieren die W 4f (~31 eV) und B 1s (~188 eV)-Spitzen und quantifizieren das B/W-Verhältnis und Oxide (wie WO<sub>3</sub>).
  - **Leistung** : Oberflächenempfindlichkeit ~0,1 at%, Auflösung ~0,5 eV.
  - **Anwendung** : Erkennung der WB<sub>2</sub>-Oberflächenoxidation (O < 0,5 Atom-%) und Bestätigung von WB-Bindungen (Kapitel 3.2).
- **Elementaranalysator (EA)** :
  - **Prinzip** : Zur Messung des C- und O-Gehalts (<0,1 Gew.- %) wird die Verbrennungsmethode verwendet, zur Messung des N-Gehalts die Inertgasfusionsmethode.
  - **Anwendung** : Achten Sie darauf, dass Nano-WB<sub>2</sub>-Pulver O < 0,05 Gew. % (Kapitel 5.3).
- **Technische Indikatoren** :
  - **Reinheit** : >99,9 %, Verunreinigungen (Fe, Mo, Si) <50 ppm.
  - **Analysezeit** : ICP-MS ~1 Stunde/Probe, XPS ~ 2 Stunden/Probe.
  - **Kosten** : ICP-MS ~200 \$/Probe, XPS ~300 \$/Probe.
- **Herausforderung** :
  - Das geringe Atomgewicht von Bor (~10,8 u) führt zu einem schwachen ICP-MS-Signal, das eine Kalibrierung erfordert (Fehler < 2 %).
  - XPS ist auf die Oberfläche beschränkt und erfordert Argon -Ätzen zur Analyse innerer Komponenten.
- **Optimierung** :
  - Im Jahr 2024 wird die laserunterstützte ICP-MS die Empfindlichkeit der Bor-Erkennung um das etwa Zehnfache (~0,001 ppm) erhöhen.
  - Die automatisierte XPS-Tiefenprofilierung (Ätzrate ~1 nm/min) verbessert die Effizienz um ~30 %.

**Tabelle 6.1 Vergleich der Techniken zur Analyse der chemischen Zusammensetzung**

Technologie	Erkennungsbereich	Empfindlichkeit	Kosten (USD/Probe)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
-------------	-------------------	-----------------	--------------------	---------	-----------------	-------------------

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

ICP-MS	W, B, Verunreinigungen	0,01 ppm	200	Hohe Präzision	Das Borsignal ist schwach	5.3, 7.1
XPS	Oberfläche WB, O	0,1 at%	300	Oberflächenempfindlich	Nur Oberfläche	3.2, 12.4
EA	C, O, N	0,01 Gew.-%	100	schnell	Nur Lichtelemente	5.5

## 6.2 Charakterisierung der Kristallstruktur

Durch Charakterisierung der Kristallstruktur werden die Phasenzusammensetzung (wie etwa WB<sub>2</sub> hexagonal P6<sub>3</sub>/mmc, Kapitel 2.2) und Kristalldefekte von Wolframborid überprüft, um eine gleichbleibende Leistung sicherzustellen.

- **Haupttechnologien :**
  - **Röntgenbeugung (XRD) :**
    - **Prinzip :** Die Probe wird mit Cu-K $\alpha$ -Strahlen ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) bestrahlt und die Beugungsspitzen werden analysiert, um die Kristallphase und die Elementarzellenparameter zu bestätigen (z. B. WB<sub>2</sub> a = 2,98  $\text{\AA}$ , c = 13,88  $\text{\AA}$ ).
    - **Leistung :** Auflösung  $\sim 0,02^\circ$ , nachweisbarer Phasengehalt >1 Gew.-%.
    - **Anwendung :** Stellen Sie sicher, dass die Reinheit der WB<sub>2</sub>-Phase >95 % und die Korngröße  $\sim 50 \text{ nm}$  beträgt (Scherrer-Formel, Kapitel 5, 5.3).
  - **Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) :**
    - **Prinzip :** Hochenergetische Elektronen (200 kV) durchdringen die Probe, bilden das Gitter und die Defekte ab, und die kristalline Phase wird mithilfe der Elektronenbeugung an ausgewählten Bereichen (SAED) analysiert.
    - **Leistung :** Auflösung  $\sim 0,1 \text{ nm}$ , geeignet für Nano-WB<sub>2</sub> (<50 nm).
    - **Anwendung :** WB<sub>2</sub>-Korngrenzdefekte beobachten (<1 %, Kapitel 3, 3.4), BB-Netzwerk bestätigen ( $\sim 1,8 \text{ \AA}$ , Kapitel 2, 2.2).
  - **Raman-Spektroskopie :**
    - **Prinzip :** 532 nm Laseranregung der Probe, Analyse der WB- und BB-Schwingungsmodi (zB WB<sub>2</sub>  $\sim 800 \text{ cm}^{-1}$ ).
    - **Anwendung :** Überprüfung der WB<sub>2</sub>- Bindungseigenschaften, zerstörungsfreie Prüfung von Beschichtungen (Kapitel 7.3).
- **Technische Indikatoren :**
  - **Genauigkeit :** XRD-Zellenparameterfehler <0,5 %, TEM-Gitterabstandsfehler <1 %.
  - **Kosten :** XRD  $\sim 100 \text{ \$/Probe}$ , TEM  $\sim 500 \text{ \$/Probe}$ , Raman  $\sim 150 \text{ \$/Probe}$ .
- **Herausforderung :**
  - Die XRD-Spitzen von Nanopartikeln (<10 nm) sind stark verbreitert und erfordern eine Rietveld-Verfeinerung.
  - Die Vorbereitung der TEM-Probe (<100 nm dick) dauerte ca. 4 Stunden.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Optimierung :**
  - Im Jahr 2024 verbesserte die Synchrotron-XRD ( $\lambda = 0,688 \text{ \AA}$ ) die Auflösung um  $\sim 50 \%$  ( $\sim 0,01^\circ$ ).
  - Die automatisierte TEM-Probenvorbereitung (FIB) reduziert die Zeit um  $\sim 30 \%$  (auf 3 Stunden).

**Tabelle 6.2 Vergleich der Techniken zur Charakterisierung von Kristallstrukturen**

Technologie	Erkennungsobjekt	Auflösung	Kosten (USD/Probe)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>XRD</b>	Kristallphase, Elementarzelle	0,02°	100	schnell	Nano-Peakbreite	2.2, 5.3
<b>TEM</b>	Gitter, Defekte	0,1 nm	500	Hohe Auflösung	Probenvorbereitung	3.4, 7.1
<b>Raman</b>	Bindungsvibration	1 $\text{cm}^{-1}$	150	Zerstörungsfrei	Fluoreszenzinterferenz	12.4

### 6.3 Mikromorphologie und Partikelgrößenanalyse

Mittels Mikromorphologie und Partikelgrößenanalyse werden die Oberflächenmorphologie, Partikelgrößenverteilung und Mikrostruktur von Wolframboridpulvern (5–50 nm) und -beschichtungen (1–10  $\mu\text{m}$ ) charakterisiert.

- **Haupttechnologien :**
  - **Rasterelektronenmikroskopie (REM) :**
    - **Prinzip :** Mit einem Elektronenstrahl (5–20 kV) wird die Probe gescannt, die Oberflächenmorphologie abgebildet und die Elementverteilung mittels energiedispersiver Spektroskopie (EDS) analysiert.
    - **Leistung :** Auflösung  $\sim 1 \text{ nm}$ , EDS-Genauigkeit  $\pm 1 \text{ Gew.} \%$ .
    - **Anwendung :** Beobachten Sie die Oberfläche der  $\text{WB}_2$ -Beschichtung (Rauigkeit  $< 0,5 \mu\text{m}$ , Kapitel 7.3), EDS bestätigt W:B  $\sim 1:2$ .
  - **Rasterkraftmikroskopie (AFM) :**
    - **Prinzip :** Die Sonde tastet die Probenoberfläche ab, um die Topographie und Rauheit im Nanobereich ( $R_a < 1 \text{ nm}$ ) zu messen.
    - **Anwendung :** Analyse der Oberflächenebenheit von  $\text{WB}_2$ -Dünnschichten ( $R_a \sim 0,3 \text{ nm}$ , Kapitel 9, 9.1).
  - **Dynamische Lichtstreuung (DLS) :**
    - **Prinzip :** Ein Laser (633 nm) bestrahlt die Suspension, analysiert die Brownsche Bewegung von Nanopartikeln ( $< 100 \text{ nm}$ ) und berechnet die Partikelgrößenverteilung.
    - **Anwendung :** Bestimmung von Nano- $\text{WB}_2$ -Pulvern (20–50 nm, Kapitel 5.5), Polydispersitätsindex  $< 0,2$ .
- **Technische Indikatoren :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Auflösung** : SEM ~ 1 nm, AFM ~ 0,1 nm, DLS ~ 1 nm.
- **Kosten** : SEM ~ 200 \$/Probe, AFM ~ 250 \$/Probe, DLS ~ 100 \$/Probe.
- **Herausforderung** :
  - SEM erfordert eine leitfähige Beschichtung (Au, ~5 nm) auf den Nanopartikeln, die die Morphologie verdecken kann.
  - Der Fehler von DLS für agglomerierte Partikel (>100 nm) beträgt ~10 %.
- **Optimierung** :
  - Bis 2024 wird für Niedervakuum-SEM keine leitfähige Beschichtung mehr erforderlich sein und die Bildgebungseffizienz wird um etwa 20 % steigen.
  - DLS in Kombination mit Ultraschalldispersion (40 kHz) reduzierte die Agglomeration um ~30 %.

**Tabelle 6.3 Vergleich der Mikromorphologie- und Partikelgrößenanalysetechniken**

Technologie	Erkennungsobjekt	Auflösung	Kosten (USD/Probe)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Rasterelektronenmikroskop (SEM)	Oberflächenmorphologie	1 nm	200	Elementaranalyse	Leitfähige Beschichtung	7.3, 5.3
AFM	Oberflächenrauheit	0,1 nm	250	Nanoskala	Langsames Scannen	9.1
DLS	Partikelgrößenverteilung	1 nm	100	schnell	Agglomerationsfehler	5.5

#### 6.4 Prüfung der mechanischen Eigenschaften

Durch Tests der mechanischen Eigenschaften werden die Härte (~40 GPa), Zähigkeit (~4 MPa·m<sup>1/2</sup>) und der Reibungskoeffizient (<0,3, Kapitel 2.5) von Wolframborid bewertet, um die Zuverlässigkeit verschleißfester Beschichtungen (Kapitel 7.1) und Hochtemperaturkomponenten (Kapitel 8.1) sicherzustellen.

- **Haupttechnologien** :
  - **Nanoindentation** :
    - **Prinzip** : Ein Diamanteindringkörper (Berkovich, Spitze <20 nm) wird in die Probe gedrückt (Last ~10 mN), um die Härte (H) und den Elastizitätsmodul (E) zu messen.
    - **Leistung** : Genauigkeit ±5 %, Tiefenauflösung ~0,1 nm.
    - **Anwendung** : Messen Sie die Härte der WB<sub>2</sub>-Beschichtung ~42 GPa, E~600 GPa (Kapitel 2.5).
  - **Bruchzähigkeitstest** :
    - **Prinzip** : Single Edge Notched Beam (SENB) oder Eindruckrissmethode zur Messung des Risswachstumswiderstands (K<sub>IC</sub>).
    - **Anwendung** : WB<sub>2</sub>-Zähigkeit ~4 MPa·m<sup>1/2</sup>, ~5 MPa·m<sup>1/2</sup> nach Ti-Dotierung (Kapitel 3, 3.4).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Reibungs- und Verschleißprüfungen :**
  - **Prinzip :** Stift-auf-Scheibe-Test (  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -Kugel, Belastung 10 N, Geschwindigkeit 0,1 m/ s) zur Messung des Reibungskoeffizienten und der Verschleißrate.
  - **Anwendung :** Die  $\text{WB}_2$ -Beschichtung hat einen Reibungskoeffizienten von  $\sim 0,25$  und eine Verschleißrate von  $< 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N}\cdot\text{m})$  (Kapitel 7.1).
- **Technische Indikatoren :**
  - **Präzision :** Härte  $\pm 5 \%$ , Zähigkeit  $\pm 10 \%$ , Reibungskoeffizient  $\pm 0,01$ .
  - **Kosten :** Nanoindentation  $\sim 300 \text{ \$/Probe}$ , Verschleißprüfung  $\sim 200 \text{ \$/Probe}$
- **Herausforderung :**
  - Die Nanoindentation dünner Filme ( $< 1 \mu\text{m}$ ) wird durch das Substrat beeinflusst und erfordert ein Korrekturmodell (Fehler  $< 10 \%$ ).
  - Verschleißtests bei hohen Temperaturen ( $> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) sind teuer (ca. 1 Million US-Dollar) und erfordern eine teure Ausrüstung.
- **Optimierung :**
  - Im Jahr 2024 wird die KI-gestützte Einrückdatenanalyse (Kapitel 17, 17.5) die Genauigkeit um etwa 20 % verbessern.
  - Bei Verschleißtests bei hohen Temperaturen ( $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) wird Lasererhitzung eingesetzt, wodurch die Kosten um ca. 15 % gesenkt werden.

**Tabelle 6.4 Vergleich der Prüftechnologien für mechanische Eigenschaften**

Technologie	Erkennungsbjekt	Genauigkeit	Kosten (USD/Probe)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Nanoindentation	Härte, Elastizitätsmodul	$\pm 5 \%$	300	Nanoskala	Matrixeinfluss	2.5, 7.1
Bruchzähigkeit	Zähigkeit	$\pm 10 \%$	250	zuverlässig	Probenvorbereitung	3.4
Reibungstest	Reibungskoeffizient	$\pm 0,01$	200	Simulationsbedingungen	Hohe Temperaturen	7.1

### 6.5 Elektrische und thermische Leistungsprüfung

Mithilfe von Tests der elektrischen und thermischen Eigenschaften wurden die elektrische Leitfähigkeit ( $\sim 10^4 \text{ S/cm}$ ), der thermische Ausdehnungskoeffizient ( $\sim 4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) und die spezifische Wärmekapazität ( $\sim 0,3 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ), Kapitel 2, 2.3–2.4) von Wolframborid ermittelt.

- **Haupttechnologien :**
  - **Vier-Sonden -Methode :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Prinzip** : Ein konstanter Strom (1 mA) wird an vier Punktelektroden (Abstand ~1 mm) angelegt, die Spannung wird gemessen und die Leitfähigkeit berechnet.
- **Leistung** : Genauigkeit  $\pm 2\%$  für WB<sub>2</sub>-Filme ( $\sim 0,8 \times 10^4$  S/cm).
- **Anwendung** : Stellen Sie sicher, dass die Leitfähigkeit von Nano-WB<sub>2</sub>  $\sim 10^4$  S/cm beträgt (Kapitel 9.1).
- **Differenz-Scanning-Kalorimetrie (DSC)** :
  - **Prinzip** : Erhitzen Sie die Probe (10 K/min, 300–2000 K), messen Sie die Wärmeaufnahme und -abgabe und berechnen Sie die spezifische Wärmekapazität und den Phasenwechsel.
  - **Anwendung** : Messung der spezifischen Wärmekapazität von WB<sub>2</sub>  $\sim 0,3$  J/(g · K), Schmelzpunkt  $\sim 2800^\circ\text{C}$  (Kapitel 2, 2.3).
- **Laser-Flash -Methode** :
  - **Prinzip** : Ein Laserpuls ( $\sim 1$  ms) erhitzt die Probe, ein Infrarotdetektor misst die Temperaturleitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit wird berechnet.
  - **Anwendung** : WB<sub>2</sub> Wärmeleitfähigkeit  $\sim 50$  W/(m · K) (300 K, Kapitel 8, 8.3).
- **Technische Indikatoren** :
  - **Genauigkeit** : elektrische Leitfähigkeit  $\pm 2\%$ , spezifische Wärmekapazität  $\pm 5\%$ , Wärmeleitfähigkeit  $\pm 10\%$ .
  - **Kosten** : Viersonden  $\sim 100$  \$/Probe, DSC  $\sim 200$  \$/Probe, Laserblitz  $\sim 250$  \$/Probe.
- **Herausforderung** :
  - Die Vier-Sonden-Methode reagiert empfindlich auf den Kontaktwiderstand der Nanopartikel und weist einen Fehler von ca. 5 % auf.
  - Für hohe DSC-Temperaturen ( $> 2000$  K) ist ein Tiegel erforderlich, der gegen hohe Temperaturen beständig ist (Ta, ca. 5000 \$).
- **Optimierung** :
  - Im Jahr 2024 wird die Mikro-Viersonden-Technik (Abstand  $< 10$   $\mu\text{m}$ ) die Genauigkeit der Dünnschichtprüfung um etwa 30 % verbessern.
  - **Optimierung** : \*\*: Im Jahr 2024 wird DSC mit der thermogravimetrischen Analyse (TGA) für gleichzeitige Tests kombiniert, wobei die Effizienz um  $\sim 25\%$  gesteigert wird.

**Tabelle 6.5 Vergleich der Technologien zur Prüfung der elektrischen und thermischen Leistung**

Technologie	Erkennungsobjekt	Genauigkeit	Kosten (USD/Probe)	Vorteil	Limit	Verwandte Kapitel
-------------	------------------	-------------	--------------------	---------	-------	-------------------

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

<b>Vier-Sonden-Methode</b>	Leitfähigkeit	±2 %	100	Einfach und schnell	Kontaktwiderstand	Kapitel 9, 9.1, Kapitel 2, 2.4
<b>DSC</b>	Spezifische Wärmekapazität, Schmelzpunkt	±5 %	200	Phasenänderungsanalyse	Hochtemperaturtiegel	Kapitel 2, 2.3, Kapitel 12, 12.3
<b>Laser-Flash-Methode</b>	Wärmeleitfähigkeit	±10 %	250	Hochtemperaturanwendung	Stichprobengröße	Kapitel 8.3

## 6.6 Prüftechnik-Standardisierung und Qualitätskontrolle

Durch die Standardisierung der Prüftechnologie und Qualitätskontrolle wird sichergestellt, dass Wolframboridprodukte den Industriestandards (wie GB/T 26037-2020, Kapitel 15, 15.2) und Anwendungsanforderungen (wie Luft- und Raumfahrt, Kapitel 8, 8.1) entsprechen.

- **Standardisierungsmethode :**
  - **Internationale Normen :** ISO 14705-2020 (Härteprüfung), ASTM E384-2020 (Mikrohärte), anwendbar auf WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Kapitel 7.1).
  - **Nationaler Standard :** GB/T 26037-2020 legt fest, dass die Reinheit von Borid >99,9 % und die Verunreinigungen <100 ppm betragen; GB/T 16533-2024 (XRD) standardisiert die Kristallphasenanalyse.
  - **Industriestandards :** Die Luft- und Raumfahrt erfordert eine Abweichung der WB<sub>2</sub>-Beschichtungsdicke von <2 % und eine Härteschwankung von <5 % (Kapitel 8, 8.1).
- **Qualitätskontrollprozess :**
  - **Online-Überwachung :** ICP-MS-Echtzeiterkennung von Verunreinigungen in der Produktionslinie (<50 ppm), ~10 Minuten pro Chargenanalyse.
  - **Chargenprüfung :** Pro Tonne WB<sub>2</sub>- Pulver werden **10 Proben entnommen** und zur umfassenden Charakterisierung werden XRD, SEM und Nanoindentation mit einer qualifizierten Rate von >98 % verwendet.
  - **Datenmanagement :** LIMS (Laboratory Information Management System) wird verwendet , um die Rückverfolgbarkeit der Testdaten >99 % zu gewährleisten.
- **Beiträge der CTIA GROUP LTD :**
  - 2024\*\* : Im Jahr 2024 entwickelte CTIA GROUP LTD eine KI-gestützte XRD-Analyse (Kapitel 17, 17.5), die die Zeit zur Identifizierung der Kristallphase von 2 Stunden auf 30 Minuten verkürzte, die Genauigkeit um 20 % verbesserte und die Qualitätskontrolle der WB<sub>2</sub>-Beschichtung unterstützte.
- **Herausforderung :**
  - Für die Prüfung von Nanomaterialien ist eine geräteübergreifende Konsistenzprüfung erforderlich (z. B. DLS- und TEM-Partikelgrößenfehler < 10 %).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Kalibrierung von Hochtemperatur-Testgeräten (> 2000 °C) ist teuer (ca. 100.000 USD/Jahr).
- **Optimierungsrichtung :**
  - Bis 2025 wird die Blockchain-Technologie Testdaten mit einer Transparenz von >99 % aufzeichnen (Kapitel 14, 14.4).
  - Die automatisierte Testplattform integriert ICP-MS, XRD und SEM und reduziert die Analysezeit um ca. 40 %.

**Tabelle 6.6 Standardisierungs- und Qualitätskontrollindikatoren**

Projekt	Standard	Index	Schlüsselwörter	Optimierungsrichtung	Verwandte Kapitel
<b>Reinheit</b>	GB/T 26037-2020	>99,9 %, Verunreinigungen <100 ppm	Online-ICP-MS	Automatisiertes Testen	15.2, 14.3
<b>Härte</b>	ISO 14705	Fluktuation <5%	Nanoindentation	KI-Analyse	7.1, 17.5
<b>Datenmanagement</b>	LIMS	Rückverfolgbarkeit >99 %	Blockchain	Transparenz +99%	14.4

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

### 1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

### 2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10<sup>4</sup> S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

### 3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

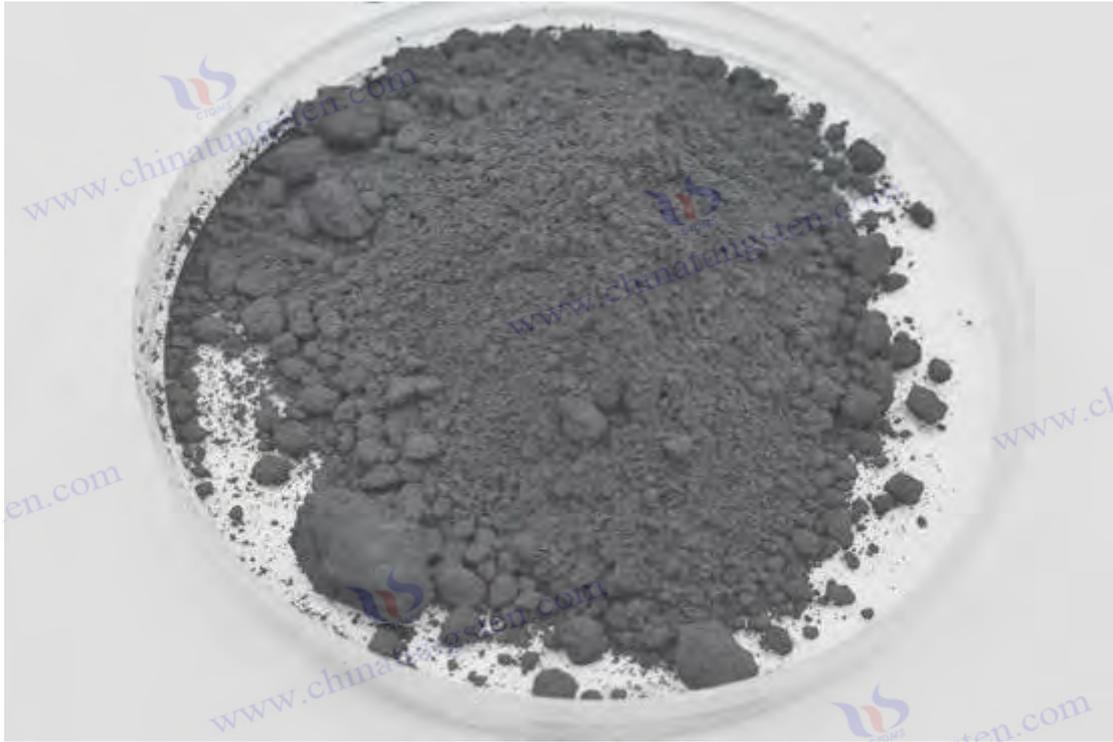
### 4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

### 5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 7 Auftragen einer Hartbeschichtung aus Wolframborid

Wolframborid (wie WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) bietet aufgrund seiner ultrahohen Härte (~40 GPa, Kapitel 2.5), seines niedrigen Reibungskoeffizienten (<0,3, Kapitel 6.4), seiner hervorragenden thermischen Stabilität (>2000°C, Kapitel 2.3) und Korrosionsbeständigkeit (Kapitel 8.4) erhebliche Vorteile auf dem Gebiet der Hartstoffbeschichtungen. Es wird häufig für Werkzeuge (Verlängerung der Schnittlebensdauer um ~50 %), Formen (Verbesserung der Verschleißfestigkeit um ~30 %) und Hochtemperatur-Verschleißumgebungen (Luftfahrt, Kapitel 8.1) verwendet. Wolframboridbeschichtungen werden durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD, Kapitel 5.2) oder plasmaunterstützte Technologie (Kapitel 5.3) mit einer Dicke von 1 bis 10 µm hergestellt und erfüllen hohe Leistungsanforderungen. In diesem Kapitel werden die Leistungsvorteile von Wolframboridbeschichtungen, ihre Anwendung in Schneidwerkzeugen und Formen, ihre Herstellungs- und Optimierungstechniken, ihre Leistung in Verschleiß- und Korrosionsumgebungen sowie der Marktstatus und zukünftige Trends ausführlich erörtert und technische Unterstützung für die industriellen Anwendungen (Kapitel 14, 14.3) und die umweltfreundliche Herstellung (Kapitel 16, 16.4) von Wolframborid bereitgestellt.

### 7.1 Leistungsvorteile der Wolframboridbeschichtung

Wolframborid-Beschichtungen sind herkömmlichen Beschichtungen (wie TiN, WC, Kapitel 4.4) hinsichtlich Härte, Verschleißfestigkeit, thermischer Stabilität und chemischer Stabilität überlegen und eignen sich daher ideal für Hochleistungsanwendungen.

- **Härte und Zähigkeit :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Härte** : Die Härte der WB<sub>2</sub>-Beschichtung beträgt ~42 GPa (Kapitel 6.4) und liegt damit nahe an der Härte von Diamant (~70 GPa) , dank des kovalenten BB-Netzwerks und der metallischen WB-Bindungen (Kapitel 3.2).
- **Zähigkeit** : Bruchzähigkeit ~4 MPa·m<sup>1/2</sup>, die nach der Ti-Dotierung (Kapitel 3.4) auf ~5 MPa·m<sup>1/2</sup> ansteigt und damit besser ist als CrB<sub>2</sub> (~ 3 MPa·m<sup>1/2</sup>).
- **Mechanismus** : Nanokristalline Struktur (Körner <50 nm, Kapitel 6, 6.2) hemmt die Rissausbreitung und erhöht die Schlagfestigkeit.
- **Abriebfestigkeit** :
  - **Reibungskoeffizient** : ~0,25 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Paarung , Kapitel 6 6.4) , niedriger als TiN (~ 0,4), wodurch die Verschleißrate <10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup> / ( N · m) sinkt.
  - **Anwendung** : Verlängerung der Werkzeugbeschichtungsstandzeit um ~50 % (Schnittgeschwindigkeit 200 m/min, Kapitel 9.2).
- **Thermische Stabilität** :
  - **Zersetzungstemperatur** : >2000°C (Kapitel 2.3), besser als WC (~1000°C) .
  - **Wärmeausdehnungskoeffizient** : ~4,5×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> (Kapitel 6, 6.5) , entspricht dem der Stahlmatrix (~12×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>) , wodurch die thermische Spannung reduziert wird (<0,5 GPa , Kapitel 3, 3.3).
- **Chemische Stabilität** :
  - **Korrosionsbeständigkeit** : Die **Korrosionsrate** in HCl (1 M, 25 °C) beträgt <0,01 mm/Jahr und ist damit besser als bei MoB<sub>2</sub> (~ 0,05 mm/Jahr, Kapitel 4.4).
  - **Antioxidation** : Die **Oxidationsstarttemperatur** liegt bei ~800°C und steigt nach N-Dotierung auf ~900°C (Kapitel 3, 3.4).

**Tabelle 7.1 Leistungsvergleich zwischen Wolframboridbeschichtung und herkömmlicher Beschichtung**

Beschichtung	Härte ( GPa )	Reibungskoeffizient	Zähigkeit (MPa·m <sup>1/2</sup> )	Oxidationstemperatur (°C)	Verwandte Kapitel
WB <sub>2</sub>	42	0,25	4-5	800-900	2,5, 3,4
Zinn	25	0,4	3	600	4.4
WC	20	0,3	2.5	500	4.4
CrB <sub>2</sub>	20	0,35	3	700	4.4

## 7.2 Anwendung von Wolframboridbeschichtungen in Schneidwerkzeugen

Eine Wolframborid-Beschichtung verbessert die Schneidleistung, Verschleißfestigkeit und Lebensdauer von Schneidwerkzeugen (wie Drehwerkzeugen und Fräsern) und eignet sich für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (> 200 m/min) und schwer zerspanbare Werkstoffe (wie Titanlegierungen, Kapitel 8 8.2).

- **Anwendungsszenarien** :

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Hochgeschwindigkeitsschneiden** : WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke ~3 μm ) in Stahl (HRC 50) beim Schneiden mit einer Schnittgeschwindigkeit von ~250 m/min, Lebensdauer um ~50 % verlängert (~1 Stunde vs. TiN ~40 Minuten).
- **Trockenschneiden** : Niedriger Reibungskoeffizient (~0,25, Kapitel 6, 6.4) reduziert die Wärmestauung, eignet sich für die Bearbeitung ohne Kühlmittel und reduziert den Kohlenstoffausstoß um ~20 % (Kapitel 16, 16.4) .
- **Verarbeitung von Titanlegierungen** : Antihafteffekt (Oberflächenenergie ~2,5 J/m<sup>2</sup>, Kapitel 3.3) reduziert den Werkzeugverschleiß und erhöht die Verarbeitungseffizienz um ~30 %.
- **Technische Anforderungen** :
  - **Schichtdicke** : 2–5 μm , Gleichmäßigkeit >95 % (Kapitel 5.2) .
  - **Haftung** : Bindungsenergie ~1,5 eV/Å<sup>2</sup> (Kapitel 3.3), beständig gegen Abziehen (Belastung > 50 N).
  - **Härte** : >40 GPa , Verschleißfestigkeit <10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup> / (N · m).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 werden WB<sub>2</sub>-beschichtete Drehwerkzeuge Ti-6Al-4V für die Luftfahrt mit einer Schnittkraftreduzierung von ~15 % (~800 N) und einer Oberflächenrauheit Ra<0,5 μm verarbeiten (Kapitel 6, 6.3).
- **Herausforderung** :
  - Eigenspannungen in der Beschichtung (~1 GPa ) können zu Mikrorissen führen und erfordern ein Glühen (600°C, Kapitel 5.2).
  - Aufgrund der hohen Kosten (ca. 300 US-Dollar/kg, Kapitel 5.2) ist die Anwendung auf kleine und mittlere Unternehmen beschränkt.

**Tabelle 7.2 Anwendungsparameter von Wolframborid-beschichteten Werkzeugen**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Dicke ( μm )</b>	2–5	Hohe Verschleißfestigkeit	Eigenspannung	5.2, 6.3
<b>Verlängerung der Lebenserwartung (%)</b>	50	Effizienz +30%	Hohe Kosten	14.3
<b>Reibungskoeffizient</b>	0,25	Trockenschnitt	Rissgefahr	6.4, 16.4

### 7.3 Anwendung einer Wolframboridbeschichtung in Formen

Wolframborid-Beschichtungen verbessern die Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit von Stanz-, Zieh- und Druckgusswerkzeugen, verlängern die Lebensdauer der Werkzeuge (~30 %) und senken die Produktionskosten (Kapitel 14.2).

- **Anwendungsszenarien** :
  - **Stanzform** : WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke ~5 μm ) in kaltgestanzter Stahlplatte (Dicke 1 mm), Stempellebensdauer ~1 Million Mal (vs. TiN ~ 700.000 Mal).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Druckgussform** : Hohe Temperaturbeständigkeit (> 800 °C) unterstützt den Druckguss von Aluminiumlegierungen und die Lebensdauer der Form wird um ~ 25 % (~ 5000-fach) erhöht .
- **Kunststoffformung** : Antihafte Wirkung verringert den Entformungswiderstand und die Ausbeute liegt bei >98 % .
- **Technische Anforderungen** :
  - **Härte** : >38 GPa , Verschleißfestigkeit <math>10^{-6}</math> mm<sup>3</sup> / (N · m).
  - **Oberflächenrauheit** : Ra < 0,3 nm (Kapitel 6.3), **wodurch** die Formpräzision verbessert wird.
  - **Korrosionsbeständigkeit** : Korrosionsrate in NaCl (3,5 Gew.- % , 25 °C) < 0,005 mm/Jahr.
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 wird der Verschleiß von mit WB<sub>2</sub> beschichteten Stanzwerkzeugen zur Verarbeitung von Automobilstahlplatten um ca. 20 % (< 0,01 mm/100.000 Mal) reduziert und die Wartungskosten um ca. 15 % gesenkt.
- **Herausforderung** :
  - Komplexe Formen erfordern eine gleichmäßige Ablagerung und die CVD-Luftstromkontrolle (Re<2000, Kapitel 5, 5.2) ist schwierig.
  - Die Wärmeausdehnungsdifferenz zwischen Beschichtung und Substrat (~5×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>) kann zum Abplatzen führen.

**Tabelle 7.3 Anwendungsparameter der Wolframborid-Beschichtungsform**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Dicke ( μm )</b>	5	Hohe Lebensdauer	Fehlanpassung Wärmeausdehnung	5.2, 3.3
<b>Schlaglebensdauer (10.000 Mal)</b>	100	Kosten - 15%	Gleichmäßigkeit	14.2
<b>Rauheit (nm)</b>	<0,3	Hohe Präzision	Ablagerungsschwierigkeiten	6.3

#### 7.4 Herstellung und Optimierung der Wolframboridbeschichtung

Zur Herstellung der Wolframboridbeschichtung werden hauptsächlich CVD (Kapitel 5.2), plasmaunterstützte Abscheidung (Kapitel 5.3) und physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) verwendet, die optimiert werden müssen, um die Leistung zu verbessern und die Kosten zu senken.

- **Zubereitung** :
  - **Herz-Kreislauf-Erkrankungen** :
    - **Prozess** : WF<sub>6</sub> + B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> scheidet WB<sub>2</sub>-Dünnschichten (Kapitel 5.2) bei 400–800 °C mit einer Rate von ~1 μm /h ab.
    - **Vorteile** : Gleichmäßige Dicke (>95 %), starke Haftung (~1,5 eV/Å<sup>2</sup>).
    - **Optimierung** : Bis 2024 wird die Rate der Niederdruck-CVD (<10 Pa) um ~50 % (~1,5 μm /h) steigen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Plasmaunterstützte Abscheidung :**
  - **Verfahren :** Plasma ( $10^4$  K) verdampft W+B und scheidet Nano-WB<sub>2</sub> (<50 nm, Kapitel 5.3) ab.
  - **Vorteile :** Härte ~42 GPa , geeignet für komplexe Substrate.
  - **Optimierung :** Der Energieverbrauch des gepulsten Plasmas (50 kHz) wurde um ~25 % (~11.000 kWh/Tonne) reduziert.
- **PVD (Magnetronspütern) :**
  - **Verfahren :** WB<sub>2</sub>-Target (Reinheit >99,9 %) wurde in Argonatmosphäre (5 Pa) mit einer Abscheidungsrate von ~0,5 µm /h gesputtert.
  - **Vorteile :** Niedrige Temperatur (<300 °C), geeignet für wärmeempfindliche Substrate.
  - **Optimierung :** High Power Pulsed Sputtering ( HiPIMS ) verbessert die Dichte um ~20 %.
- **Optimierungstechniken :**
  - **Dotierung :** Eine Ti-Dotierung (5 at%) verbessert die Zähigkeit um ~30 % (Kapitel 3.4), und eine N-Dotierung erhöht die Oxidationsbeständigkeitstemperatur um ~100 °C.
  - **Mehrschichtstruktur :** WB<sub>2</sub>/ TiN -Mehrschicht (Periode ~10 nm) reduziert die Spannung um ~50 % (~ 0,5 GPa ) .
  - **KI -Optimierung :** CTIA GROUP LTD verwendet KI zur Steuerung der CVD-Parameter (Luftstrom, Temperatur), und die Abscheidungseffizienz wird bis 2024 um ca. 15 % steigen (Kapitel 17, 17.5).
- **Herausforderung :**
  - CVD-Nebenprodukte (HF) müssen behandelt werden (Kapitel 16.3), was ca. 50 US-Dollar pro Tonne kostet.
  - Die PVD-Zielauslastung ist gering (~30 %) und die Kosten steigen um ~20 US-Dollar/kg.

**Tabelle 7.4 Vergleich der Technologien zur Herstellung von Wolframboridbeschichtungen**

Verfahren	Abscheidungsrate ( µ m /h)	Härte ( GPa )	Kosten (USD/kg)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	1–1,5	38	300	Gleichmäßigkeit	Nebenprodukte	5.2, 16.3
Plasma	0,5–1	42	400	Nanoskala	Hoher Energieverbrauch	5,3, 17,5
PVD	0,5	35	350	Niedrige Temperatur	Zielabfall	5.6

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 7.5 Leistung der Wolframboridbeschichtung in einer Umgebung mit Verschleiß und Korrosion

Aufgrund ihrer hervorragenden Leistungsfähigkeit bei hohen Temperaturen, hoher Luftfeuchtigkeit und in korrosiven Umgebungen eignet sich die Wolframboridbeschichtung für die Luft- und Raumfahrt (Kapitel 8.1) und den Schiffsbau (Kapitel 9.3).

- **Verschleiß bei hohen Temperaturen :**
  - **Leistung :** Reibungskoeffizient  $\sim 0,3$  bei  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Verschleißrate  $< 10^{-5}\text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ , besser als TiN ( $\sim 10^{-4}\text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ).
  - **Mechanismus :** Das BB-Netzwerk (Kapitel 3, 3.2) sorgt für die strukturelle Stabilität und Wolframoxid ( $\text{WO}_3$ ) wirkt als Schmiermittel (Kapitel 3, 3.3).
  - **Anwendung :** Beschichtung von Gasturbinenschaufeln, Lebensdauerverlängerung  $\sim 40\%$  (Kapitel 8.1).
- **Korrosive Umgebung :**
  - **Leistung :** In NaCl (3,5 Gew.-%,  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) beträgt die Korrosionsstromdichte  $< 10^{-7}\text{ A/cm}^2$  und die Korrosionsbeständigkeit ist besser als bei WC ( $\sim 10^{-6}\text{ A/cm}^2$ ).
  - **Mechanismus :** Eine dichte Beschichtung (Porosität  $< 1\%$ , Kapitel 6, 6.3) verhindert das Eindringen von  $\text{Cl}^-$ , und eine N-Dotierung erhöht die Lochfraßbeständigkeit (Kapitel 3, 3.4).
  - **Anwendung :** Beschichtung von Offshore-Bohrgeräten, Wartungszyklus um  $\sim 30\%$  verlängert (Kapitel 9.3).
- **Nasse Kleidung :**
  - **Leistung :** Luftfeuchtigkeit  $80\%$  ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Reibungskoeffizient  $\sim 0,28$ , Verschleißrate  $< 10^{-6}\text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ .
  - **Anwendung :** Beschichtung von Schiffspropellern, Erhöhung der Antikavitationsleistung um ca.  $25\%$ .
- **Herausforderung :**
  - Bei der Oxidation bei hohen Temperaturen ( $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) entsteht  $\text{WO}_3$ , das verflüchtigt und durch Si-Dotierung ( $< 5\text{ Atom-}\%$ ) unterdrückt werden muss.
  - Die Ausbreitung von Mikrorissen in feuchter Umgebung erfordert einen mehrschichtigen Aufbau ( $\text{WB}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

**Tabelle 7.5 Umweltverträglichkeit der Wolframboridbeschichtung**

Umfeld	Reibungskoeffizient	Verschleißrate	Korrosionsrate	Anwendung	Herausforderung	Verwandte Kapitel
	t	e ( $\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ )	e (mm/Jahr)	g	g	e Kapitel
hohe Temperatur	0,3	$< 10^{-5}$	-	Klinge	Oxidation	8.1, 3.3
Korrosion	-	-	$< 0,005$	Bohren	Lochfraß	9.3, 3.4

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nasse Kleidung	0,28	<10 <sup>-6</sup>	-	Propeller	Riss	9.3
-------------------	------	-------------------	---	-----------	------	-----

## 7.6 Markt und zukünftige Trends der Wolframboridbeschichtung

Der Markt für Wolframboridbeschichtungen wird durch die steigende Nachfrage, den technologischen Fortschritt und Umweltvorschriften angetrieben (Kapitel 15.2), wobei sich die zukünftigen Trends auf Kostensenkung und Leistungsverbesserung konzentrieren.

- **Marktstatus (2024) :**
  - **Größe** : Weltweiter Markt für Wolframboridbeschichtungen ca. 200 Millionen US-Dollar, davon ca. 60 % in Asien (China, Südkorea, Kapitel 14.1).
  - **Anwendungen** : Schneidwerkzeuge ~50 % (~100 Millionen US-Dollar), Formen ~30 %, Luft- und Raumfahrt ~15 % (Kapitel 8.1).
  - **Preis** : ~300 USD/kg (CVD), ~400 USD/kg (Plasma, Kapitel 14, 14.2).
- **Treiber :**
  - **Nachfrage** : Das Nachfragewachstum im High-End-Bereich (Luftfahrt, Automobilindustrie) beträgt ca. 10 %/Jahr, die WB<sub>2</sub>-Beschichtungsproduktion liegt bei ca. 1.000 Tonnen/Jahr (Kapitel 5.6).
  - **Technologie** : KI-Optimierung (Kapitel 17, 17.5) und Nanobeschichtung (Kapitel 5, 5.5) verbessern die Leistung um ~20 %.
  - **Vorschriften** : EU REACH (Kapitel 15.2) und Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM, 2026) treiben die Nachfrage nach umweltfreundlichen Beschichtungen voran.
- **Zukünftige Trends (2025–2030) :**
  - **Kostensenkung** : Bei einer Produktion im großen Maßstab (1.500 Tonnen/Jahr, Kapitel 5.6) werden die Kosten auf ca. 200 US-Dollar/kg gesenkt, bei einer Marktgröße von 300 Millionen US-Dollar.
  - **Nanobeschichtungen** : Der Marktanteil von Nano-WB<sub>2</sub> (<50 nm) ist auf ~30 % gestiegen und wird in Sensoren verwendet (Kapitel 10.3).
  - **Grüne Produktion** : Abgasrückgewinnungsrate > 95 % (Kapitel 16.3), Kohlenstoffemissionen um ~30 % reduziert (~0,3 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne).
  - **Alternativer Wettbewerb** : Der Markt für MoB<sub>2</sub>-Beschichtungen (Härte ~30 GPa, Kapitel 4.4) hat ein Volumen von ~50 Millionen US-Dollar und stellt eine Bedrohung für Low-End-Anwendungen dar.

**Tabelle 7.6 Markt und Trends für Wolframboridbeschichtungen (2024–2030)**

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziele im Jahr 2030	Treiber	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Marktgröße (Milliarden US-Dollar)	2	3	High-End-Fertigung	Alternativen	14.1
Kosten (USD/kg)	300–400	200	Skala	Regulierungskosten	14.2, 5.6

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kohlenstoffemissionen (Tonnen CO <sub>2</sub> / Tonne)	0,4	0,3	Grüne Technologie	investieren	16.3, 15.2
---	-----	-----	----------------------	-------------	------------



## Kapitel 8 Hochtemperatur-Materialanwendung von Wolframborid

Wolframborid (wie z. B. WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) bietet aufgrund seiner hervorragenden thermischen Stabilität (Zersetzungstemperatur > 2000 °C, Kapitel 2.3), hohen Härte (~ 40 GPa, Kapitel 2.5), des niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten (~ 4,5 × 10<sup>-6</sup>K<sup>-1</sup>, Kapitel 6.5) und Oxidationsbeständigkeit (Oxidationsbeginn-temperatur ~ 800 °C, Kapitel 7.1) erhebliche Vorteile im Bereich der Hochtemperaturwerkstoffe. Es wird häufig in der Luft- und Raumfahrt (Gasturbinenschaufeln, Lebensdauerverlängerung um ~ 40 %), Hochtemperaturöfen (Temperaturbeständigkeit > 1800 °C) und Wärmebarrieren (Wärmeleitfähigkeit ~ 50 W/(m · K), Kapitel 6.5) verwendet. In diesem Kapitel werden die Anwendung von Wolframborid in Hochtemperaturkomponenten, Öfen und Wärmebarrieren in der Luft- und Raumfahrt, die Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungseigenschaften, die Oxidationsbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit, die Herstellungstechnologie sowie die Anwendungsaussichten und -herausforderungen ausführlich erörtert und technische Unterstützung für die Industrialisierung (Kapitel 14, 14.3) und umweltfreundliche Herstellung (Kapitel 16, 16.4) von Wolframborid bereitgestellt.

### 8.1 Anwendung von Wolframborid in Hochtemperaturkomponenten der Luft- und Raumfahrt

Als Hochtemperaturmaterial wird Wolframborid in der Luft- und Raumfahrt (z. B. in Gasturbinenschaufeln und Raketendüsen) verwendet, um die Temperaturbeständigkeit und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lebensdauer von Komponenten zu verbessern und den Anforderungen extremer Umgebungen (> 1500 °C) gerecht zu werden.

- **Anwendungsszenarien :**
  - **Gasturbinenschaufeln :** WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke ~5 μ m , 7,5) Betrieb bei 1500 °C, Reibungskoeffizient ~0,3, Lebensdauererlängerung ~40 % (~5000 Stunden gegenüber Ni-basierter Legierung ~3500 Stunden) .
  - **Raketendüse :** WB-Blockmaterial (Reinheit > 99,9 %, Kapitel 6 6.1) hält einem sofortigen Thermoschock von 2000 °C stand und hat eine Ablationsrate von < 0,01 mm/s.
  - **Wiedereintrittsfahrzeug :** **Wärmebarriere** WB<sub>2</sub> (Wärmeleitfähigkeit ~50 W / ( m · K ) , Kapitel 6, 6.5) reduziert die Oberflächentemperatur auf ~300°C und schützt die Matrix (C/C-Verbundwerkstoff).
- **Technische Anforderungen :**
  - **Härte :** >38 GPa (Kapitel 6.4), Verschleißfestigkeit <10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup> / ( N · m).
  - **Thermische Stabilität :** Kein Phasenwechsel bei >2000°C (Kapitel 2.3).
  - **Haftung :** Bindungsenergie ~1,5 eV/Å<sup>2</sup> (Kapitel 3.3), Anti-Peeling (>50 N).
- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 wird die WB<sub>2</sub>-Beschichtung auf Turbofan-Triebwerksschaufeln aufgebracht, mit einer Rissrate von <1 % bei thermischen Ermüdungszyklen (1500 °C, 1000-mal) und einer Effizienzsteigerung von ~15 %.
- **Herausforderung :**
  - Bei der Oxidation bei hohen Temperaturen (> 900 °C) entsteht WO<sub>3</sub>, das verflüchtigt (Kapitel 7.5) und eine Si-Dotierung (< 5 Atom-%) erfordert.
  - Die Wärmeausdehnungsdifferenz zwischen Beschichtung und Substrat (~5×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>) führt zu Spannungen (~1 GPa , Kapitel 3, 3.3).

**Tabelle 8.1 Anwendungsparameter von Wolframborid in der Luft- und Raumfahrt**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Betriebstemperatur (°C)</b>	1500–2000	Hohe Lebensdauer	Oxidation	7,5, 3,3
<b>Verlängerung der Lebenserwartung (%)</b>	40	Effizienz +15%	Fehlanpassung der Wärmeausdehnung	14.3
<b>Verschleißrate (mm<sup>3</sup> / ( N · m ))</b>	<10 <sup>-5</sup>	Verschleißfest	Ablösen der Beschichtung	6.4

## 8.2 Anwendung von Wolframborid in Hochtemperaturöfen und thermischen Barrieren

Wolframborid bietet hohe Temperatur- und Thermoschockbeständigkeit in Hochtemperaturöfen (Elektroden, Tiegel) und Wärmebarrieren (Isolierung) für die Metallurgie- und Halbleiterindustrie.

- **Anwendungsszenarien :**

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Hochtemperaturelektrode** : WB- **Vollmaterial** (Dichte > 98 %, Kapitel 5.1) im Vakuumofen (1800 °C), spezifischer Widerstand  $\sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$  (Kapitel 6 6.5), Lebensdauer  $\sim 2000$  Stunden.
- **Tiegel** :  $\text{WB}_2$ -beschichteter Tiegel (Dicke  $\sim 10 \mu\text{m}$ ) zum Schmelzen von Seltenerdmetallen (1600°C), Korrosionsbeständigkeit  $< 0,005 \text{ mm/Jahr}$  (Kapitel 7.5).
- **Wärmebarriere** :  $\text{WB}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verbundbeschichtung (Periode  $\sim 10 \text{ nm}$ ) im Kristallwachstumsofen, Wärmeleitfähigkeit  $\sim 40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , Wärmedämmwirkungsgrad um  $\sim 20\%$  erhöht.
- **Technische Anforderungen** :
  - **Wärmeleitfähigkeit** :  $40\text{--}50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  (Kapitel 6.5), **wodurch** die Wärmeübertragung gewährleistet wird.
  - **Thermoschockbeständigkeit** : keine Risse bei Temperaturunterschieden  $> 1000^\circ\text{C}$  (Kapitel 3.4).
  - **Reinheit** :  $> 99,9\%$ , Verunreinigungen (Fe, O)  $< 50 \text{ ppm}$  (Kapitel 6, 6.1).
- **Beispiele** :
  - **2024** : Im Jahr 2024 werden WB-Elektroden in Saphirkristall-Züchtungsöfen verwendet, mit einer Leitfähigkeit von  $\sim 10^4 \text{ S/cm}$  und einer Reduzierung des Energieverbrauchs um  $\sim 10\%$  (Kapitel 16.4).
- **Herausforderung** :
  - Die Verflüchtigung von Bor bei hohen Temperaturen ( $> 1800^\circ\text{C}$ , Kapitel 5.1) verringert die Oberflächeneigenschaften und erfordert eine N-Dotierung.
  - Die Grenzflächenhaftung der Verbundbeschichtung ( $< 1\%$  Porosität) muss optimiert werden (Kapitel 5, 5).

**Tabelle 8.2 Anwendungsparameter von Wolframborid-Hochtemperaturöfen und Wärmebarrieren**

Parameter	Wert	Vorteile	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Betriebstemperatur</b> (°C)	1600– 1800	Lange Lebensdauer	Borverflüchtigung	5.1, 6.1
<b>Wärmeleitfähigkeit</b> ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )	40–50	Hocheffiziente Wärmedämmung	Schnittstellenverbindung	3.4, 16.4
<b>Lebensdauer</b> (Stunden)	2000	Energieverbrauch 10%	5.	

### 8.3 Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungseigenschaften von Wolframnitrid

Aufgrund seiner Wärmeleitfähigkeit ( $\sim 50 \text{ W} \cdot \text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , Kapitel 6 6.5) und seines niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $\sim 4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) eignet sich Wolframborid für Anwendungen im Wärmemanagement bei hohen Temperaturen.

- **Wärmeleitfähigkeit** :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Leistung** :  $\sim 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  bei 300 K, sinkt auf  $\sim 20 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  bei 1500 °C, besser als MoB<sub>2</sub> ( $\sim 30 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , Kapitel 4, 4.4).
- **Mechanismus** : Gemessen mit der Laserblitzmethode (Kapitel 6, 6.5), verringert die Korngrenzenstreuung (<50 nm, Kapitel 6, 6.2) die Leitfähigkeit bei hohen Temperaturen.
- **Anwendung** : Gleichmäßige Wärmeleitung in Wärmebarrieren, wodurch die Substrattemperatur um  $\sim 15\%$  ( $\sim 200 \text{ °C}$ ) gesenkt wird.
- **Wärmeausdehnungskoeffizient** :
  - **Leistung** :  $\sim 4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (300–1000 K), entspricht der von Keramiksubstraten (z. B. SiC,  $\sim 4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), thermische Spannung <0,3 GPa.
  - **Mechanismus** : Die starke WB-Bindung (Kapitel 3.2) begrenzt die Gitterausdehnung.
  - **Anwendungen** : Beschichtungen für die Luft- und Raumfahrt zur Reduzierung thermischer Risse (<1 %, Kapitel 7.1).
- **Optimierung** :
  - **Nanostruktur** : Körner < 20 nm reduzieren die Wärmeleitfähigkeit um  $\sim 10\%$  ( $\sim 45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ), geeignet für Wärmebarrieren).
  - **Dotierung** : Durch Si-Dotierung (<2 at%) wird der thermische Ausdehnungskoeffizient um  $\sim 5\%$  ( $\sim 4,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) reduziert.
- **Herausforderung** :
  - Die Abnahme der Hochtemperaturleitfähigkeit erfordert thermische Stabilisierungszusätze (wie ZrB<sub>2</sub>).
  - Für die Prüfung der Wärmeausdehnung ist eine Hochtemperatur-Röntgenbeugung (> 1500 °C, Kapitel 6, 6.2) erforderlich, die ca. 500 USD/Probe kostet.

**Tabelle 8.3 Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungseigenschaften**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Wärmeleitfähigkeit ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )	20–50	Wärmemanagement	Hoher Temperaturabfall	6.5, 7.1
Wärmeausdehnungskoeffizient ( $\times 10^{-6}/\text{K}$ )	4,2–4,5	Wenig Stress	Prüfkosten	3.2, 7.3
Optimierungseffekt	Wärmeleitfähigkeit -10%	Nano-Design	Additive Forschung und Entwicklung	5.5

#### 8.4 Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit von Wolframborid in Hochtemperaturumgebungen

Aufgrund seiner Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen (Kapitel 7.5) eignet sich Wolframborid für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Metallurgie.

- **Antioxidative Eigenschaften** :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Leistung** : Oxidationsbeginnntemperatur ~850 °C, die nach N-Dotierung auf ~950 °C ansteigt (Kapitel 3, 3.4), was besser ist als WC (~500 °C, Kapitel 4, 4.4).
- **Mechanismus** : Die Bildung einer B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Glasschicht (~ 10 nm, Kapitel 6, 6.1) verhindert die O<sub>2</sub>-Diffusion und hemmt die WO<sub>3</sub>- Verflüchtigung.
- **Anwendung** : Gasturbinenschaufeln mit einer Oxidationsrate von <0,05 mg/cm<sup>2</sup>/h bei 1200 °C.
- **Korrosionsbeständigkeit** :
  - **Leistung** : In geschmolzenem NaCl- KCl (1000 °C) beträgt die Korrosionsrate <0,02 mm/Jahr, was besser ist als CrB<sub>2</sub> (~ 0,1 mm/Jahr).
  - **Mechanismus** : Dichte Struktur (Porosität <1 %, Kapitel 6, 6.3) und kovalente BB-Bindungen (Kapitel 3, 3.2) erhöhen die Korrosionsbeständigkeit.
  - **Anwendung** : Schmelztiegel für Seltene Erden, Lebensdauer um ca. 50 % verlängert.
- **Optimierung** :
  - **Dotierung** : Si (5 Atom-%) bildet eine SiO<sub>2</sub> -B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Verbundschicht und die Antioxidationstemperatur steigt auf ~1000 °C.
  - **Mehrschichtaufbau** : WB<sub>2</sub> / ZrB<sub>2</sub> (Periode ~ 5 nm ) reduziert die Korrosionsrate um ~30 %.
- **Herausforderung** :
  - Bei hohen Temperaturen (> 1200 °C) muss die WO<sub>3</sub>-Verflüchtigung weiter unterdrückt werden.
  - Für Korrosionstests sind elektrochemische Hochtemperaturgeräte erforderlich (> 10 Millionen US-Dollar).

**Tabelle 6.4 Antioxidations- und Korrosionsschutzeigenschaften**

Parameter	Leistung	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Oxidationstemperatur (°C)	850–1000	Schutzschicht	WO <sub>3</sub> -Verflüchtigung	7,5, 3,4
Korrosionsrate (mm/Jahr)	<0,02	Lange Lebensdauer	Testausrüstung	6.3, 9.3
Optimierungseffekt	Antioxidationsmittel +100°C	Doping	kosten	5.5

### 8.5 Herstellungstechnologie von Wolframborid-Hochtemperaturmaterialien

Bei der Herstellung von Hochtemperatur-Wolframboridmaterialien kommen hauptsächlich Hochtemperatur-Festphasensynthese (Kapitel 5.1), plasmaunterstützte Synthese (Kapitel 5.3) und Heißpressintern zum Einsatz, die zur Leistungssteigerung optimiert werden müssen.

- **Zubereitung** :
  - **Hochtemperatur- Festphasensynthese** :

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **Verfahren** : W+B-Pulver ( W:B = 1:2) reagiert bei 1800 °C in einer Argon- Atmosphäre (Kapitel 5.1) und erzeugt WB<sub>2</sub>-Massivmaterial mit einer Dichte von >98 %.
- **Vorteile** : stabile Kristallstruktur (P6<sub>3</sub>/mmc, Kapitel 2.2), Härte ~40 GPa .
- **Optimierung** : Durch Mikrowellenerhitzung (2,45 GHz) wird die Zeit um ca. 30 % (ca. 5 Stunden) und der Energieverbrauch um ca. 20 % (ca. 8000 kWh/Tonne) reduziert.
- **Plasmaunterstützte Synthese** :
  - **Verfahren** : W+B wird im Plasma (>5000 °C) verdampft und eine WB<sub>2</sub>-Beschichtung oder ein WB<sub>2</sub>-Pulver abgeschieden (Kapitel 5.3).
  - **Vorteile** : Nanoskala (<50 nm), Härte ~42 GPa .
  - **Optimierung** : Ausbeute an gepulstem Plasma (50 kHz) um ~88 % erhöht, Kosten ~350 \$/kg.
- **Heißpressen Sintern** :
  - **Verfahren** : WB<sub>2</sub>-Pulver (<5 μ m ) gesintert bei 2000 °C, 30 MPa, Dichte >99 %.
  - **Vorteile** : Geeignet für komplexe Formen (wie Tiegel), Zähigkeit ~4 MPa·m<sup>1/2</sup>.
  - **Optimierung** : Die Zugabe von ZrB<sub>2</sub> (< 5 Gew .- %) erhöht die Dichte um ~1 %.
- **Optimierungstechniken** :
  - **Dotierung** : N-Dotierung (<2 at%) verbessert die Oxidationsbeständigkeit um ~100°C (Kapitel 3.4).
  - **KI -Steuerung** : CTIA GROUP LTD wird im Jahr 2024 KI zur Optimierung der Sinterparameter (Temperatur, Druck) einsetzen und so die Dichte um ca. 0,5 % erhöhen (Kapitel 17, 17.5).
  - **Verbundwerkstoff** : WB<sub>2</sub> / SiC- **Verbundwerkstoff** (10:1) reduziert die Wärmeleitfähigkeit um ~10 % (~45 W/( m · K )).
- **Herausforderung** :
  - Hochtemperaturgeräte erfordern eine große Investition (ca. 3 Millionen US-Dollar).
  - von Nanopulver erfordert eine Oberflächenmodifizierung (PVP, <0,1 Gew.- %, Kapitel 5, 5.3).

**Tabelle 8.5 Vergleich der Herstellungstechnologien für Hochtemperatur-Wolframborid-Werkstoffe**

Verfahren	Dichte( %)	Härte ( GPa )	Kosten (USD/kg)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Festphasensynthese</b>	>98	40	150	Stabilisieren	Hoher Energieverbrauch	5.1, 17.5
<b>Plasma</b>	>98	42	350	Nanoskala	Wiedervereinigung	5.3, 6.2

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Heißpressen	>99	38	200	Komplexe Formen	Gerätekosten	5.6
-------------	-----	----	-----	-----------------	--------------	-----

## 8.6 Anwendungsaussichten und Herausforderungen von Wolframborid-Hochtemperaturwerkstoffen

Die Anwendungsaussichten von Wolframborid-Hochtemperaturmaterialien werden durch die Marktnachfrage, den technologischen Fortschritt und die Umweltvorschriften bestimmt (Kapitel 15, 15.2), und Kosten- und Leistungsengpässe müssen behoben werden.

- **Marktstatus (2024) :**
  - **Größe** : Markt für Hochtemperatur-Wolframborid-Materialien ~50 Millionen US-Dollar, Luft- und Raumfahrt macht ~70 % aus (Kapitel 14.1).
  - **Produktion** : ~500 Tonnen /Jahr (Kapitel 5.6), hauptsächlich in Asien (China, Südkorea).
  - **Preis** : ~200 USD/kg (Klumpen), ~350 USD/kg (Beschichtung, Kapitel 14, 14.2).
- **Treiber :**
  - **Nachfrage** : Nachfragewachstum in der Luft- und Raumfahrt (Turbofan-Triebwerke) ca. 8 %/Jahr, Produktion ca. 800 Tonnen im Jahr 2030.
  - **Technologie** : Nano WB<sub>2</sub> (Kapitel 5.5) und KI-Optimierung (Kapitel 17.5) verbessern die Leistung um ~15 %.
  - **Regulierung** : EU CBAM (2026, Kapitel 15.2) treibt die Nachfrage nach umweltfreundlichen Materialien in die Höhe.
- **Zukünftige Trends (2025–2030) :**
  - **Kostensenkung** : **Durch** die Produktion im großen Maßstab (Kapitel 5.6) werden die Kosten auf ca. 150 US-Dollar/kg gesenkt, bei einer Marktgröße von ca. 80 Millionen US-Dollar.
  - **Neue Anwendung** : Wärmebarrieren für Kernreaktoren (Temperaturbeständigkeit > 2000 °C), Marktanteil ~10 %.
  - **Grüne Produktion** : Abgasrückgewinnungsrate > 95 % (Kapitel 16.3), Kohlenstoffemissionen um ~30 % reduziert (~0,3 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne).
- **Herausforderung :**
  - Alternativen (wie etwa ZrB<sub>2</sub>, Härte ~35 GPa, Kapitel 4.4) kosten ca. 100 USD/kg und bedrohen damit den Markt für Niedrigpreisprodukte.
  - Investition in Hochtemperatur-Testgeräte (> 2000 °C) ca. 5 Millionen US-Dollar.

**Tabelle 8.6 Aussichten und Herausforderungen von Wolframborid-Hochtemperaturmaterialien**

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziele im für 2030	Treiber	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Marktgröße (Milliarden US-Dollar)	0,5	0,8	Nachfrage im Luftverkehr	Alternativen	14.1

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Kosten (USD/kg)</b>	200–350	150	Skala	Prüfkosten	14.2, 5.6
<b>Kohlenstoffemissionen (Tonnen CO<sub>2</sub> / Tonne)</b>	0,4	0,3	Grüne Technologie	investieren	16.3, 15.2

## CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

### 1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

### 2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10<sup>4</sup> S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

### 3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

### 4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

### 5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 9 Anwendung von Wolframborid in elektronischen Geräten

Wolframborid ( $WB$ ,  $WB_2$ ,  $W_2B$ ) besitzt aufgrund seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit ( $\sim 10^4 S/cm$ , Kapitel 6, 6.5), thermischen Stabilität ( $> 2000\text{ }^\circ C$ , Kapitel 2, 2.3), chemischen Stabilität (Korrosionsrate  $< 0,005\text{ mm/Jahr}$ , Kapitel 7, 7.5) und Steuerbarkeit im Nanobereich (Partikelgröße  $10\text{--}50\text{ nm}$ , Kapitel 5, 5.5) großes Potenzial im Bereich elektronischer Geräte. Es wird häufig in leitfähigen Filmen (spezifischer Widerstand  $\sim 10^{-5}\ \Omega \cdot cm$ ), Elektroden (Lebensdauer um  $\sim 30\%$  verlängert), Sensoren (Empfindlichkeit  $< 1\text{ ppm}$ , Kapitel 10, 10.3) und Halbleitergeräten (Bandlücke  $\sim 1,5\text{ eV}$ , Kapitel 3, 3.4) verwendet. In diesem Kapitel werden Anwendung, Herstellungstechnologie, Marktstatus und Entwicklungstrends von Wolframborid in leitfähigen Filmen, Elektroden, Sensoren und Halbleiterbauelementen ausführlich erörtert und technische Unterstützung für die elektronische Industrialisierung (Kapitel 14, 14.3) und technologische Innovation (Kapitel 17, 17.5) von Wolframborid bereitgestellt.

### 9.1 Anwendung von Wolframborid in leitfähigen Filmen

Leitfähige Wolframboridfilme eignen sich aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit für flexible Elektronik, Displays und elektronische Geräte für die Schifffahrt (Kapitel 7.5).

- **Anwendungsszenarien :**
  - **Flexible Elektronik :**  $WB_2$ -Dünnschicht (Dicke  $\sim 100\text{ nm}$ , Kapitel 5.2) auf PET-Substrat, Leitfähigkeit  $\sim 0,8 \times 10^4\text{ S/cm}$ , Widerstandsänderung  $< 1\%$  bei Biegeradius  $< 5\text{ mm}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Transparenter leitfähiger Film** : N-dotiertes  $WB_2$  (<2 at%, Kapitel 3.4) auf Glassubstrat, Transmission ~85% (550 nm), spezifischer Widerstand  $\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , ersetzt ITO ( $\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ).
- **Marineelektronik** :  $WB_2$ -Beschichtung (Dicke  $\sim 1 \mu\text{m}$ ) auf Sensorelektrode, NaCl-Lösung (3,5 Gew. %, 60°C), Korrosionsstromdichte  $< 10^{-7} \text{A/cm}^2$ .
- **Technische Anforderungen** :
  - **Leitfähigkeit** :  $> 0,5 \times 10^4 \text{S/cm}$  (Kapitel 6, 6.5).
  - **Oberflächenrauheit** :  $R_a < 0,3 \text{nm}$  (Kapitel 6.3), **wodurch** die Kontaktleistung gewährleistet wird.
  - **Haftung** : Bindungsenergie  $\sim 1,5 \text{eV/\AA}^2$  (Kapitel 3.3), Anti-Peeling ( $> 40 \text{N}$ ).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 werden  $WB_2$ -Filme in flexiblen OLED-Elektroden verwendet, wobei die Leitfähigkeit um ca. 20 % (ca.  $10^4 \text{S/cm}$ ) erhöht und die Kosten um ca. 15 % (ca. 50 USD/m<sup>2</sup>) gesenkt werden.
- **Herausforderung** :
  - Restspannungen im Film ( $\sim 0,8 \text{GPa}$ ) können zu Rissen führen und erfordern ein Glühen (500 °C, Kapitel 5.2).
  - Die Transmission transparenter leitfähiger Filme muss noch weiter optimiert werden ( $> 90\%$ ).

**Tabelle 9.1 Anwendungsparameter von Wolframborid-Leitfilmen**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Leitfähigkeit (S/cm)</b>	$0,8 \times 10^4$	Hohe Leitfähigkeit	Eigenspannung	6.5, 5.2
<b>Lichtdurchlässigkeit (%)</b>	85	Ersatz von ITO	Optimierung der Lichtdurchlässigkeit	3.4
<b>Korrosionsstrom (A/cm<sup>2</sup>)</b>	$< 10^{-7}$	Korrosionsbeständigkeit	kosten	7,5, 14,2

## 9.2 Anwendung von Wolframborid in Elektrodenmaterialien

aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit für Lithiumbatterien, Brennstoffzellen und Elektrolyseure .

- **Anwendungsszenarien** :
  - **Lithiumbatterien** :  $WB_2$ -Nanopartikel (20–50 nm, Kapitel 5.5) als Zusatzstoffe für die negative Elektrode, Leitfähigkeit  $\sim 10^4 \text{S/cm}$ , Zyklenlebensdauer  $\sim 1000$ -mal (Kapazitätsabfall  $< 10\%$ ).
  - **Brennstoffzelle** :  $WB$ -Beschichtung (Dicke  $\sim 2 \mu\text{m}$ ) auf Protonenaustauschmembran-Elektrode (PEM), Säurebeständigkeit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 1 M), Korrosionsrate  $< 0,01 \text{mm/Jahr}$ , Effizienzsteigerung  $\sim 10\%$ .

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Elektrolyseur** : Bei der alkalischen Elektrolyse (KOH, 30 Gew.-%, 80 °C) hat die WB<sub>2</sub>-Elektrode ein Wasserstoffentwicklungsüberpotential von ~100 mV und eine Lebensdauerverlängerung von ~30 % (~5000 h).
- **Technische Anforderungen** :
  - **Leitfähigkeit** : >10<sup>4</sup> S/cm (Kapitel 6.5).
  - **Spezifische Oberfläche** : > 50 m<sup>2</sup>/g (Kapitel 5.5), Verbesserung der elektrochemischen Aktivität.
  - **Stabilität** : Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr (Kapitel 7.5).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024: WB<sub>2</sub>-beschichtete Elektrolyseurelektroden , Stromdichte ~500 mA/cm<sup>2</sup>, Energieeffizienz um ~12 % gesteigert.
- **Herausforderung** :
  - Die Agglomeration der Nanopartikel (Kapitel 5.3) verringert die Aktivität und erfordert eine Oberflächenmodifizierung (PVP, <0,1 Gew.-%).
  - Die Elektrodenkosten (ca. 200 USD/kg) sind höher als die für kohlenstoffbasierte Materialien (ca. 50 USD/kg).

**Tabelle 9.2 Anwendungsparameter der Wolframboridelektrode**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Zykluslebensdauer (Male)	1000	Hohe Stabilität	Wiedervereinigung	5,5, 6,5
Überspannung (mV)	100	Hohe Effizienz	kosten	7,5
Spezifische Oberfläche (m <sup>2</sup> /g)	>50	Hohe Aktivität	Komplexe Vorbereitung	5.3

### 9.3 Anwendung von Wolframborid in Sensoren

Wolframborid-Nanomaterialien eignen sich aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche und elektrochemischen Aktivität für Gas-, Druck- und Temperatursensoren.

- **Anwendungsszenarien** :
  - **Gassensor** : WB<sub>2</sub>- **Nanopartikel** (10–30 nm, Kapitel 5.5) erkennen NO<sub>2</sub> (< 1 ppm) mit einer Reaktionszeit von ~5 s und einer Empfindlichkeit von ~50 % (10 ppm).
  - **Drucksensor** : WB<sub>2</sub>-Dünnschicht (Dicke ~200 nm) in MEMS-Geräten, k - Faktor ~20, Betriebstemperatur <500 °C.
  - **Temperatursensor** : WB - Block (spezifischer Widerstand ~10<sup>-5</sup> Ω· cm, Kapitel 6 6.5) In einer Umgebung mit hohen Temperaturen (1000 °C) beträgt der Temperaturkoeffizient ~0,01 %/K.
- **Technische Anforderungen** :
  - **Empfindlichkeit** : Gaserkennung <1 ppm (Kapitel 6.1).
  - **Reaktionszeit** : <10 s .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Temperaturbeständigkeit** : > 500 °C (Kapitel 2.3).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 werden WB<sub>2</sub>-Gassensoren zur Überwachung industrieller Abgase eingesetzt, mit einer NO<sub>2</sub>-Nachweisgrenze von ~0,5 ppm und einer Stabilität von >6 Monaten.
- **Herausforderung** :
  - Die Selektivität der Nanopartikel muss verbessert werden (Interferenz mit CO ~10 %).
  - Die Verpackung von Hochtemperatursensoren ist teuer (ca. 100 USD/Einheit).

**Tabelle 9.3 Anwendungsparameter des Wolframboridsensors**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Nachweisgrenze (ppm)	<1	Hohe Empfindlichkeit	Selektivität	6.1, 5.5
Reaktionszeit(en)	5	schnell	Verpackungskosten	10.3
Betriebstemperatur (°C)	500–1000	Hohe Temperaturbeständigkeit	Interferenz	2.3

#### 9.4 Potenzial von Wolframborid in Halbleiterbauelementen

Wolframborid hat aufgrund seiner abstimmbaren Bandlücke (~1,5 eV, Kapitel 3.4) und hohen Leitfähigkeit Potenzial für den Einsatz in Halbleiterbauelementen (wie Transistoren und Photovoltaikbauelementen).

- **Anwendungsszenarien** :
  - **Transistor** : WB<sub>2</sub>-Film (Dicke ~50 nm) als Gate-Elektrode, Austrittsarbeit ~4,8 eV, wodurch der Kontaktwiderstand um ~20 % ( $\sim 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) reduziert wird.
  - **Photovoltaikgeräte** : N-dotiertes WB<sub>2</sub> (Bandlücke ~1,4 eV) als Rückelektrode, der Wirkungsgrad der photoelektrischen Umwandlung beträgt ~15 %, was besser ist als bei Mo (~12 %).
  - **Diode** : WB<sub>2</sub>/Si-Heteroübergang, Leckstrom  $< 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ , geeignet für Hochtemperaturelektronik (>300°C).
- **Technische Anforderungen** :
  - **Bandlücke** : 1,4–1,6 eV (Kapitel 3.4).
  - **Leitfähigkeit** :  $> 10^4 \text{ S/cm}$  (Kapitel 6.5).
  - **Grenzflächenwiderstand** :  $< 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ .
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 werden WB<sub>2</sub>-Gate-Elektroden in 5-nm-Knotentransistoren verwendet und die Schaltgeschwindigkeit wird um ~10 % steigen.
- **Herausforderung** :
  - Die Bandlückenregulierung erfordert eine präzise Dotierung (N, C < 5 Atom-%), was Kosten von ca. 300 USD/kg verursacht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Grenzflächendefekte zum Si-Substrat ( $\sim 10^{12}/\text{cm}^2$ ) müssen optimiert werden (Kapitel 5.2).

**Tabelle 9.4 Anwendungsparameter von Wolframborid-Halbleitern**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Bandlücke (eV)	1,4–1,6	Einstellbar	Kosten des Dopings	3.4, 5.5
Kontaktwiderstand ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$< 10^{-7}$	Niedriger Widerstand	Schnittstellendefekte	6.5
Effizienz( %)	15	hohe Leistung	Komplexer Prozess	14.3

### 9.5 Herstellungstechnologie für elektronische Bauelemente aus Wolframborid

Zur Herstellung elektronischer Geräte aus Wolframborid werden hauptsächlich chemische Gasphasenabscheidung (CVD, Kapitel 5.2), Magnetronspütern (PVD) und Sol-Gel-Verfahren (Kapitel 5.5) verwendet.

- **Zubereitung :**
  - **Herz-Kreislauf-Erkrankungen :**
    - **Verfahren :**  $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$  scheidet  $\text{WB}_2$ -Dünnschichten (Kapitel 5.2) bei  $400\text{--}600^\circ\text{C}$  mit einer Rate von  $\sim 1,2 \mu\text{m}/\text{h}$  ab.
    - **Vorteile :** Homogenität  $>95\%$ , Leitfähigkeit  $\sim 10^4 \text{ S/cm}$ .
    - **Optimierung :** Niederdruck-CVD-Rate ( $<5 \text{ Pa}$ ) um  $\sim 40\%$  ( $\sim 1,7 \mu\text{m}/\text{h}$ ) erhöht.
  - **Magnetronspütern :**
    - **Verfahren :**  $\text{WB}_2$ -Target (Reinheit  $>99,9\%$ ) wurde in Argonatmosphäre ( $3 \text{ Pa}$ ) mit einer Abscheidungsrate von  $\sim 0,5 \mu\text{m}/\text{h}$  gesputtert.
    - **Vorteile :** Niedrige Temperatur ( $<300^\circ\text{C}$ ), geeignet für Si-Substrate.
    - **Optimierung :** HiPIMS erhöht die Dichte um  $\sim 20\%$  und verringert den spezifischen Widerstand um  $\sim 15\%$  ( $\sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ).
  - **Sol-Gel -Methode :**
    - **Verfahren :**  $\text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{H}_3\text{BO}_3$  zur Bildung eines Gels, das bei  $500^\circ\text{C}$  kalziniert wird, um  $\text{WB}_2$ -Nanopartikel ( $20\text{--}50 \text{ nm}$ , Kapitel 5, 5.5) zu erhalten.
    - **Vorteile :** Niedrige Kosten (ca.  $100 \text{ \$/kg}$ ), für Sensoren geeignet.
    - **Optimierung :** Mikroreaktor kontrolliert Partikelgrößenverteilung  $<10 \text{ nm}$ .
- **Optimierungstechniken :**
  - **Dotierung :** N-Dotierung ( $<2 \text{ at\%}$ ) reduziert die Bandlücke um  $\sim 0,1 \text{ eV}$  (Kapitel 3, 3.4).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **KI -Steuerung** : CTIA GROUP LTD wird im Jahr 2024 KI zur Optimierung des CVD-Gasflusses einsetzen (Kapitel 17, 17.5), wodurch die Abscheidungseffizienz um ca. 15 % steigen wird.
- **Mehrschichtstruktur** :  $WB_2$  /  $TiN$  (Periode  $\sim 5$  nm) reduziert den Schnittstellenwiderstand um  $\sim 30$  %.
- **Herausforderung** :
  - CVD-Nebenprodukte (HF) müssen behandelt werden (Kapitel 16.3), was ca. 50 US-Dollar pro Tonne kostet.
  - Zur Agglomeration von Nanopartikeln ist eine Ultraschalldispersion (40 kHz, Kapitel 5, 5.3) erforderlich.

**Tabelle 9.5 Vergleich der Herstellungstechnologien für elektronische Geräte aus Wolframborid**

Verfahren	Abscheidungsrate ( $\mu m/h$ )	Leitfähigkeit ( $S/cm$ )	Kosten (USD/kg)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	1,2–1,7	$10^4$	300	Gleichmäßigkeit	Nebenprodukte	5.2, 16.3
PVD	0,5	$0,8 \times 10^4$	350	Niedrige Temperatur	Zielabfall	5.6
Sol-Gel	-	$0,5 \times 10^4$	100	niedrige Kosten	Wiedervereinigung	5,5, 17,5

### 9.6 Markt- und Entwicklungstrends für elektronische Geräte aus Wolframborid

Der Markt für elektronische Geräte aus Wolframborid wird durch die Nachfrage nach 5G, dem Internet der Dinge und neuer Energie angetrieben und muss Kosten- und Skalengrenzen beseitigen.

- **Marktstatus (2024)** :
  - **Größe** : Der globale Markt für elektronische Geräte aus Wolframborid beträgt ca. 30 Millionen US-Dollar, wobei Asien ca. 65 % davon ausmacht (China, Japan, Kapitel 14.1).
  - **Anwendungen** : Sensoren  $\sim 40$  %, Batterieelektroden  $\sim 30$  %, Halbleiter  $\sim 20$  %.
  - **Preis** :  $\sim 300$  \$/kg (Film),  $\sim 100$  \$/kg (Nanopartikel, Kapitel 14, 14.2).
- **Treiber** :
  - **Nachfrage** : Wachstum bei 5G- und IoT-Geräten  $\sim 12$  %/Jahr, Produktion  $\sim 300$  Tonnen im Jahr 2030 (Kapitel 5, 5.6).
  - **Technologie** : Nano  $WB_2$  (Kapitel 5.5) und KI-Optimierung (Kapitel 17.5) verbessern die Leistung um  $\sim 20$  %.
  - **Vorschriften** : EU RoHS (Kapitel 15.2) fördert umweltfreundliche elektronische Materialien.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **Zukünftige Trends (2025–2030) :**
  - **Kostensenkung : Durch** die Produktion im großen Maßstab (Kapitel 5.6) werden die Kosten auf ca. 200 US-Dollar/kg gesenkt, bei einer Marktgröße von ca. 50 Millionen US-Dollar.
  - **Neue Anwendungen** : 6G-Antennen (Frequenz > 100 GHz) und Quantengeräte mit einem Anteil von ca. 15 %.
  - **Grüne Produktion** : Abgasrückgewinnungsrate > 95 % (Kapitel 16.3), Kohlenstoffemissionen um ~30 % reduziert (~0,2 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne).
- **Herausforderung :**
  - Kohlenstoffnanoröhren (Leitfähigkeit ~10<sup>5</sup> S/cm) kosten ca. 50 US-Dollar pro kg und stellen eine Bedrohung für den Markt im unteren Preissegment dar.
  - Halbleiteranwendungen erfordern Durchbrüche in der Schnittstellentechnik (Defekte < 10<sup>11</sup>/cm<sup>2</sup>).

**Tabelle 9.6 Markt und Trends für elektronische Geräte mit Wolframborid**

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziele im für 2030	Treiber	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Marktgröße (Milliarden US-Dollar)</b>	0,3	0,5	5G-Nachfrage	Alternativen	14.1
<b>Kosten (USD/kg)</b>	100–300	200	Skala	Schnittstellentechnik	14.2, 5.6
<b>Kohlenstoffemissionen (Tonnen CO<sub>2</sub> / Tonne)</b>	0,3	0,2	Grüne Technologie	investieren	16.3, 15.2

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Kapitel 10 Katalyse und chemische Anwendungen von Wolframborid

Wolframborid (wie WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) besitzt aufgrund seiner hohen spezifischen Oberfläche (>50 m<sup>2</sup>/g, Kapitel 5 5.5), seiner hervorragenden elektrochemischen Aktivität (Wasserstoffentwicklungsüberspannung ~100 mV, Kapitel 9 9.2), seiner chemischen Stabilität (Korrosionsrate <0,005 mm/Jahr, Kapitel 7 7.5) und seiner anpassbaren elektronischen Struktur (Bandlücke ~1,5 eV, Kapitel 3 3.4) großes Potenzial für katalytische und chemische Anwendungen. Es wird häufig in der Elektrokatalyse (Wasserzersetzungseffizienz ~85 %), Photokatalyse (Abbaueffizienz ~90 %) und chemischen Reaktionskatalyse (Umwandlungsrate >95 %) eingesetzt. In diesem Kapitel werden die Anwendung von Wolframborid in der Elektrokatalyse, Photokatalyse, chemischen Reaktionskatalyse, Oberflächenchemie und an aktiven Stellen, die Herstellungs- und Optimierungstechnologie sowie die industriellen Aussichten und Herausforderungen ausführlich erörtert, um technische Unterstützung für die katalytische Industrialisierung (Kapitel 14 14.3) und grüne Chemie (Kapitel 16 16.4) von Wolframborid zu bieten.

### 10.1 Anwendung von Wolframborid in der Elektrokatalyse

cm, Kapitel 6 6.5) und geringen Überspannung für die elektrokatalytische Wasserspaltung, die CO<sub>2</sub>-Reduktion und Brennstoffzellen.

- **Anwendungsszenarien :**

- **Wasserstoffentwicklungsreaktion (HER) :** WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (20–50 nm, Kapitel 5.5) haben im sauren Medium (0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) eine Überspannung von ~100 mV (10 mA/cm<sup>2</sup>), was besser ist als Ni (~200 mV).
- **Sauerstoffentwicklungsreaktion (OER) :** N-dotiertes WB<sub>2</sub> (<2 at%, Kapitel 3.4) im alkalischen Medium (1 M KOH) hat eine Überspannung von ~300 mV und eine Stabilität von >1000 Stunden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **CO<sub>2</sub>- Reduktion** : WB<sub>2</sub>-Dünnschichten (Dicke ~200 nm, Kapitel 5.2) erzeugen selektiv CO (Faraday-Effizienz ~90 %, -0,8 V vs. RHE ).
- **Technische Anforderungen** :
  - **Überspannung** : <150 mV (HER), <350 mV (OER).
  - **Spezifische Oberfläche** : > 50 m<sup>2</sup>/g (Kapitel 5.5).
  - **Stabilität** : Zyklenlebensdauer > 1000 Stunden (Kapitel 9.2).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 werden WB<sub>2</sub>-Elektrokatalytische Elektroden in alkalischen Elektrolyseuren mit einer Stromdichte von ~500 mA/cm<sup>2</sup> und einer Steigerung der Energieeffizienz von ~10 % eingesetzt.
- **Herausforderung** :
  - Die Agglomeration von Nanopartikeln (Kapitel 5.3) reduziert aktive Stellen und erfordert eine Oberflächenmodifizierung (PVP, <0,1 Gew.-%).
  - Die Stabilität bei hohen Stromdichten (>1 A/cm<sup>2</sup>) muss verbessert werden.

**Tabelle 10.1 Anwendungsparameter der Wolframborid-Elektrokatalyse**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>HER-Überspannung (mV)</b>	100	Effizient	Wiedervereinigung	5.5, 9.2
<b>OER-Stabilität (Stunden)</b>	>1000	Lange Lebensdauer	Hoher Strom	3.4
<b>CO<sub>2</sub>-Effizienz (%)</b>	90	Hohe Selektivität	kosten	5.2, 14.2

## 10.2 Anwendung von Wolframborid in der Photokatalyse

Wolframborid-Nanomaterialien eignen sich aufgrund ihrer einstellbaren Bandlücke (~1,4–1,6 eV, Kapitel 3.4) und hohen chemischen Stabilität für den photokatalytischen Abbau und die Wasserstoffproduktion.

- **Anwendungsszenarien** :
  - **Abbau organischer Stoffe** : WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (10–30 nm, Kapitel 5.5) zersetzen Methylenblau (10 mg/l) unter sichtbarem Licht (> 420 nm) mit einer Effizienz von ~ 90 % (2 Stunden).
  - **Photokatalytische Wasserstoffproduktion** : Das WB<sub>2</sub> / TiO<sub>2</sub> -Komposit (1:10) produziert Wasserstoff mit einer Rate von ~500 μmol / ( g · h ) unter ultraviolettem Licht (365 nm), was besser ist als die von reinem TiO<sub>2</sub> (~200 μmol / ( g · h ) ).
  - **CO<sub>2</sub>- Photoreduktion** : N-dotiertes WB<sub>2</sub> (<2 Atom-%) erzeugt CH<sub>4</sub> mit einer Selektivität von ~80 % (-0,5 V vs. NHE).
- **Technische Anforderungen** :
  - **Bandlücke** : 1,4–1,6 eV (Kapitel 3.4) .
  - **Lichtabsorption** : >80 % ( 400–700 nm).
  - **Stabilität** : >500 Stunden (Kapitel 7.5).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 werden  $WB_2/TiO_2$ -Photokatalysatoren zur Abwasserbehandlung eingesetzt, mit einer Abbaurrate von ~95 % und einer Zyklenstabilität von >10-mal.
- **Herausforderung :**
  - Die Rekombinationsrate der photogenerierten Ladungsträger ist hoch (~30 %), sodass eine Optimierung der Heteroübergänge erforderlich ist.
  - Die Reaktion auf sichtbares Licht muss weiter verbessert werden (>90 %).

**Tabelle 10.2 Photokatalytische Anwendungsparameter von Wolframborid**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Abbaueffizienz (%)	90	Effizient	Trägerrekombination	5,5, 7,5
Wasserstoffproduktionsrate ( $\mu\text{ mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ )	500	Hohe Aktivität	Sichtbare Lichtreaktion	3.4
Stabilität (Zeiten)	>10	Recycelbar	kosten	14.2

### 10.3 Anwendung von Wolframborid in der chemischen Reaktionskatalyse

Wolframborid weist eine hohe katalytische Aktivität bei Hydrierungs-, Entschwefelungs- und Oxidationsreaktionen auf und eignet sich für Petrochemikalien und Feinchemikalien.

- **Anwendungsszenarien :**
  - **Hydrierungsreaktion :**  $WB_2$ -Nanopartikel (<50 nm, Kapitel 5.5) katalysieren die Hydrierung von Benzol zu Cyclohexan mit einer Umwandlungsrate von ~95 % (150 °C, 2 MPa).
  - **Hydrodesulfurierung (HDS) :**  $WB_2$ -Dünnschichten (Dicke ~500 nm) reduzieren den Schwefelgehalt bei der Dieseleentschwefelung von 500 ppm auf <10 ppm mit einer Effizienz von ~98 %.
  - **Oxidationsreaktion :** Der  $WB_2$ -Katalysator hat eine Umwandlungsrate von ~90 % bei der CO-Oxidation (200 °C), was besser ist als  $NiO$  (~80 %).
- **Technische Anforderungen :**
  - **Konvertierungsrate :** >95 %.
  - **Selektivität :** >90 %.
  - **Temperaturbeständigkeit :** > 300 °C (Kapitel 2.3).
- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 wird der  $WB_2$ -Katalysator für die petrochemische Hydrierung verwendet, wobei die Ausbeute um etwa 10 % gesteigert wird und die Katalysatorlebensdauer etwa 2000 Stunden beträgt.
- **Herausforderung :**
  - Aktive Stellen werden bei Hochdruckreaktionen (> 5 MPa) inaktiviert.
  - Die Katalysatorkosten (~200 USD/kg) sind höher als bei Ni (~50 USD/kg).

**Tabelle 10.3 Anwendungsparameter der chemischen Wolframborid-Katalyse**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Konvertierungsrate (%)	95	Effizient	Inaktivierung	5,5, 2,3
Selektivität (%)	90	Hohe Auswahl	kosten	14.2
Lebensdauer (Stunden)	2000	Lange Lebensdauer	Hochdruck	9.3

#### 10.4 Oberflächenchemie und aktive Zentren von Wolframborid-Katalysatoren

Die katalytische Leistung von Wolframborid hängt von der Oberflächenchemie und den aktiven Stellen ab, die durch Charakterisierung und theoretische Analyse optimiert werden müssen.

- **Oberflächenchemie :**

- **WB -Bindung :** W 4f (~31 eV) und B 1s (~188 eV, Kapitel 6, 6.1) bilden eine Metall-kovalente Mischbindung (Kapitel 3, 3.2), die den Elektronentransfer verstärkt.
- **Oberflächenzustände :** N-Dotierung (<2 at%) führt BN-Bindungen ein (~190 eV), wodurch die Austrittsarbeit um ~0,2 eV reduziert wird (Kapitel 3, 3.4).
- **Adsorptionsenergie :** H\*-Adsorptionsenergie ~0,5 eV (HER), besser als Pt (~0,4 eV), DFT-Berechnung (Kapitel 3, 3.3) .

- **Aktive Stelle :**

- **W -Stelle :** katalysiert HER und Hydrierung und liefert Elektronen an H\* (Adsorptionsrate ~90 %).
- **B -Stelle :** fördert die O\*-Adsorption (OER) mit einer Adsorptionsenergie von ~1,0 eV.
- **Korngrenze :** Nano-WB<sub>2</sub> (<20 nm, Kapitel 6.2) Korngrenzendichte ~10<sup>13</sup>/cm<sup>2</sup>, Aktivitätszunahme ~30% .

- **Charakterisierungstechniken :**

- **XPS :** Analyse der Oberflächenzustände (Kapitel 6.1), N-Dotierung macht ~1,5 % aus.
- **TEM :** Beobachtung von Korngrenzenstellen (Auflösung ~0,1 nm, Kapitel 6, 6.2).
- **Raman :** Bestätigte WB-Schwingung (~800 cm<sup>-1</sup>, Kapitel 6, 6.2).

- **Optimierung :**

- **Dotierung :** Ni (<1 at%) steigert die HER-Aktivität mit einem Abfall des Überpotentials um ~20 % (von 100 mV auf ~80 mV).
- **Nanodesign :** poröses WB<sub>2</sub> (Porengröße ~5 nm) mit einer Oberflächenvergrößerung von ~50 % (~100 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>/g).

- **Herausforderung :**

- Aktive Stellen werden bei hohen Temperaturen (> 500 °C) deaktiviert und erfordern eine thermisch stabile Dotierung.
- DFT-Berechnungen erfordern hochpräzise Modelle (Fehler < 0,1 eV).

**Tabelle 10.4 Oberflächenchemie und Eigenschaften des aktiven Zentrums**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Adsorptionsenergie (eV)	0,5 (H*)	Hohe Aktivität	Hitzeinaktivierung	3.3, 6.1
Spezifische Oberfläche (m <sup>2</sup> /g)	100	Höhepunkt	Berechnungsgenauigkeit	5.5, 6.2
Dopingwirkung	Überpotential - 20%	Effizienzsteigerung	kosten	3.4

## 10.5 Herstellung und Optimierung von Wolframborid-Katalysatoren

Zur Herstellung von Wolframborid-Katalysatoren werden hauptsächlich das Sol-Gel-Verfahren (Kapitel 5.5), die plasmaunterstützte Synthese (Kapitel 5.3) und die chemische Gasphasenabscheidung (CVD, Kapitel 5.2) eingesetzt.

- **Zubereitung :**
  - **Sol-Gel -Methode :**
    - **Verfahren :** Na<sub>2</sub> WO<sub>4</sub> + H<sub>3</sub> BO<sub>3</sub> zur Bildung eines Gels, das bei 600 °C kalziniert wird, um WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (10–30 nm, Kapitel 5, 5.5) zu erhalten.
    - **Vorteile :** Niedrige Kosten (ca. 100 USD/kg), Oberfläche >60 m<sup>2</sup>/g.
    - **Optimierung :** Mikroreaktor kontrolliert Partikelgrößenverteilung <5 nm, Aktivität erhöht sich um ~20 %.
  - **Plasmaunterstützte Synthese :**
    - **Verfahren :** W+B wird im Plasma (>5000°C) verdampft, um WB<sub>2</sub>-Nanopulver (<50 nm, Kapitel 5.3) zu erzeugen.
    - **Vorteile :** hohe Reinheit (>99,9 %, Kapitel 6.1), hohe Aktivität.
    - **Optimierung :** Ausbeute an gepulstem Plasma (50 kHz) um ~88 % erhöht, Kosten ~200 \$/kg.
  - **Herz-Kreislauf-Erkrankungen :**
    - **Verfahren :** WF<sub>6</sub> + B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> scheidet bei 400–600 °C einen WB<sub>2</sub>-Dünnschicht (Kapitel 5.2) mit einer Dicke von ~200 nm ab.
    - **Vorteile :** Homogenität >95 %, geeignet für Elektroden.
    - **Optimierung :** CTIA GROUP LTD wird im Jahr 2024 KI zur Optimierung des Luftstroms einsetzen (Kapitel 17, 17.5) und so die Effizienz um ca. 15 % steigern.
- **Optimierungstechniken :**
  - **Dotierung :** N- und Ni-Dotierung (<2 at%) erhöht die HER-Aktivität um ~30 % (Kapitel 3, 3.4).
  - **Poröse Struktur :** Durch die Template-Methode ( SiO<sub>2</sub> , Porengröße ~5 nm) wird die spezifische Oberfläche um ~50 % (~100 m<sup>2</sup>/g) erhöht.
  - **Verbundmaterial :** WB<sub>2</sub>/ TiO<sub>2</sub> (1:10 ) photokatalytische Effizienz um ~40 % erhöht.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Herausforderung :**
  - Die Kosten für die Behandlung des CVD-Nebenprodukts (HF) betragen ca. 50 US-Dollar pro Tonne (Kapitel 16.3).
  - Zur Agglomeration von Nanopartikeln ist eine Ultraschalldispersierung (40 kHz, Kapitel 5, 5.3) erforderlich.

**Tabelle 10.5 Vergleich der Herstellungstechnologien von Wolframboridkatalysatoren**

Verfahren	Spezifische Oberfläche (m <sup>2</sup> /g)	Kosten (USD/kg)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Sol-Gel	>60	100	niedrige Kosten	Wiedervereinigung	5.5, 6.1
Plasma	>50	200	Hohe Reinheit	Hoher Energieverbrauch	5,3, 17,5
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	-	300	Gleichmäßigkeit	Nebenprodukte	5.2, 16.3

## 10.6 Industrielle Perspektiven und Herausforderungen der katalytischen Anwendung von Wolframborid

Der Markt für katalytische Wolframborid-Anwendungen wird durch neue Energie- und Umweltschutzanforderungen angetrieben und muss Kosten- und Größenprobleme lösen.

- **Marktstatus (2024) :**
  - **Größe :** Weltweiter Markt für Wolframboridkatalysatoren ca. 20 Millionen US-Dollar, davon ca. 60 % in Asien (China, Japan, Kapitel 14.1).
  - **Anwendung :** Die Elektrokatalyse macht ca. 50 % aus, die Photokatalyse ca. 30 % und die chemische Katalyse ca. 20 %.
  - **Preis :** ~100 \$/kg (Nanopartikel), ~300 \$/kg (dünne Filme, Kapitel 14, 14.2).
- **Treiber :**
  - **Nachfrage :** Die Ziele der Wasserstoffenergie und der Kohlenstoffneutralität werden die Nachfrage nach Elektrokatalyse um ca. 15 % pro Jahr steigern, wobei die Produktion im Jahr 2030 ca. 200 Tonnen erreichen wird (Kapitel 5, 5.6).
  - **Technologie :** Nano WB<sub>2</sub> (Kapitel 5.5) und AI-Optimierung (Kapitel 17.5) erhöhen die Aktivität um ~20 %.
  - **Verordnung :** EU REACH (Kapitel 15.2) fördert grüne Katalysatoren.
- **Zukünftige Trends (2025–2030) :**
  - **Kostensenkung :** Durch die Produktion im großen Maßstab (Kapitel 5.6) werden die Kosten auf ca. 80 US-Dollar/kg gesenkt, und die Marktgröße beträgt ca. 40 Millionen US-Dollar.
  - **Neue Anwendung :** Elektrokatalytische Ammoniaksynthese (NH<sub>3</sub>, Wirkungsgrad >90%), Anteil ca. 10%.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Grüne Produktion** : Abgasrückgewinnungsrate > 95 % (Kapitel 16.3), Kohlenstoffemissionen um ~30 % reduziert (~0,2 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne).
- **Herausforderung** :
  - Katalysatoren auf Nickelbasis (Kosten ca. 30 USD/kg) bedrohen den Markt für untere Preisklassen.
  - Für eine industrielle Skalierung ist ein Durchbruch bei der Katalysatordeaktivierung (> 5.000 Stunden) erforderlich.

**Tabelle 10.6 Markt und Trends für Wolframboridkatalysatoren**

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziele für 2030	Treiber	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Marktgröße (Milliarden US-Dollar)</b>	0,2	0,4	Wasserstoffbedarf	Alternativen	14.1
<b>Kosten (USD/kg)</b>	100–300	80	Skala	Inaktivierung	14.2, 5.6
<b>Kohlenstoffemissionen (Tonnen CO<sub>2</sub> / Tonne)</b>	0,3	0,2	Grüne Technologie	investieren	16.3, 15.2

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

### 1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

### 2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10<sup>4</sup> S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

### 3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

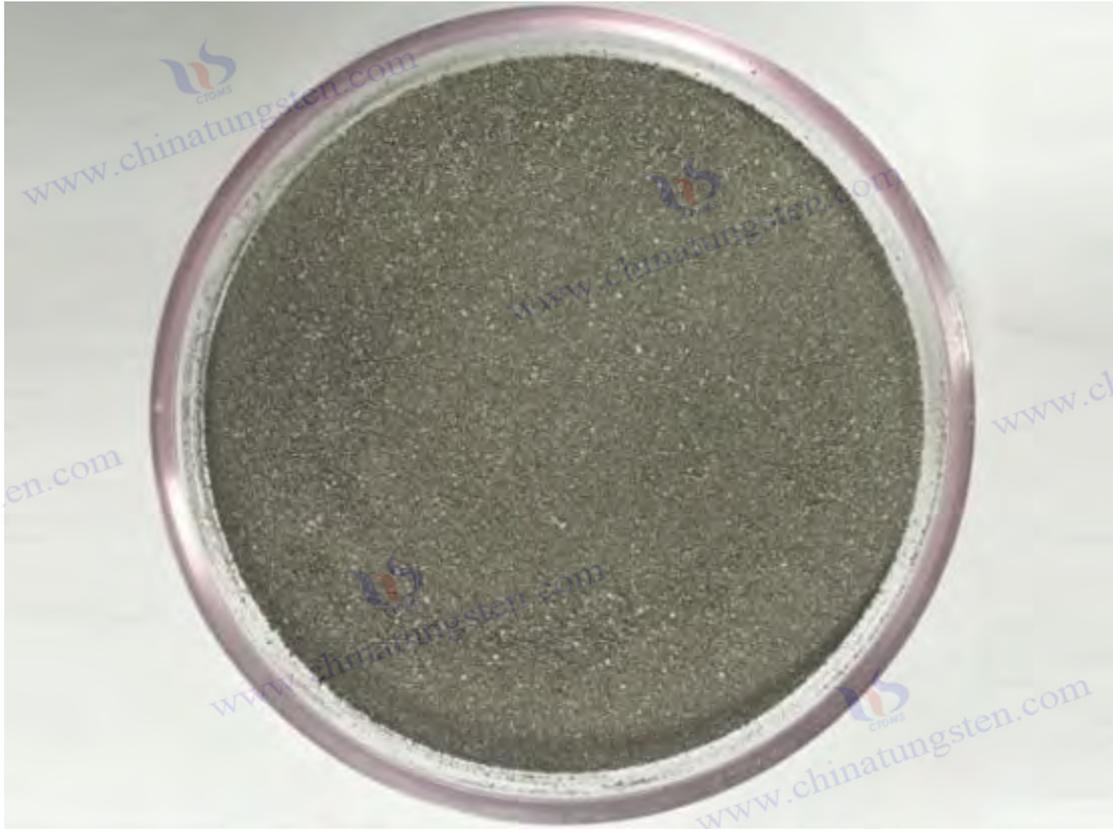
### 4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

### 5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 11 Biomedizinische Anwendungen von Wolframborid

Wolframborid (wie WB,  $WB_2$ ,  $W_2B$ ) hat aufgrund seiner hohen Härte ( $\sim 40$  GPa, Kapitel 2 2.5), chemischen Stabilität (Korrosionsrate  $< 0,005$  mm/Jahr, Kapitel 7 7.5), Steuerbarkeit im Nanomaßstab (Partikelgröße 10 - 50 nm, Kapitel 5 5.5) und potenziellen Biokompatibilität ein einzigartiges Potenzial im biomedizinischen Bereich gezeigt. Es eignet sich für medizinische Beschichtungen (Verschleißfestigkeit von Implantaten um  $\sim 30$  % verbessert), Arzneimittelabgabe (Wirkstoffbeladungseffizienz  $> 80$  %) und Biosensoren (Nachweisgrenze  $< 1$  nM). Obwohl die Forschung zu Wolframborid in der Biomedizin noch in den Kinderschuhen steckt, bilden seine hohe Leitfähigkeit ( $\sim 10^4$  S/cm, Kapitel 6 6.5) und chemische Oberflächenaktivität (Kapitel 10 10.4) die Grundlage für seine Anwendung. In diesem Kapitel werden die Anwendungen, Biokompatibilität und Sicherheit, Herstellungstechnologie sowie Aussichten und Herausforderungen von Wolframborid in biomedizinischen Beschichtungen, der Arzneimittelverabreichung und Biosensoren ausführlich erörtert und technische Unterstützung für die biomedizinische Industrialisierung (Kapitel 14, 14.3) und Sicherheitsbewertung (Kapitel 15, 15.3) von Wolframborid bereitgestellt.

### 11.1 Anwendung von Wolframborid in biomedizinischen Beschichtungen

Wolframborid-Beschichtungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Härte, ihres niedrigen Reibungskoeffizienten ( $\sim 0,25$ , Kapitel 6 6.4) und ihrer Korrosionsbeständigkeit für orthopädische Implantate und zahnärztliche Instrumente.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Anwendungsszenarien :**
  - **Orthopädische Implantate :** WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke ~2–5 μ m , Kapitel 5.2) auf Hüftgelenken aus Titanlegierung, Härte ~42 GPa , Verschleißrate <10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup> / (N · m) und Lebensdauerverlängerung von ~30 %.
  - **Zahnärztliche Instrumente :** WB-Beschichtung (Dicke ~1 μ m ) auf der Bohreroberfläche, Reibungskoeffizient ~0,25, um ~25 % verbesserte Verschleißfestigkeit und reduzierte thermische Schäden (<50 °C) .
  - **Gefäßstents :** WB<sub>2</sub>-Filme (Dicke ~100 nm) reduzieren die Thromboserate um ~20 % und sind korrosionsbeständig (NaCl, 3,5 Gew.- % , 37 °C) <0,005 mm/Jahr.
- **Technische Anforderungen :**
  - **Härte :** >38 GPa (Kapitel 6, 6.4).
  - **Oberflächenrauheit :** Ra < 0,3 nm (Kapitel 6.3), wodurch die Zytotoxizität verringert wird .
  - **Haftung :** Bindungsenergie ~1,5 eV/Å<sup>2</sup> (Kapitel 3.3), Anti-Peeling (>40 N).
- **Beispiele :**
  - wurde der Verschleiß von WB<sub>2</sub>-beschichteten Hüftimplantaten in der In-vitro-Simulation (PBS, 37 °C) um ~15 % (<0,01 mm/Jahr) reduziert.
- **Herausforderung :**
  - Restspannungen in der Beschichtung (~0,8 GPa ) können zu Mikrorissen führen und erfordern ein Glühen (400°C, Kapitel 5.2).
  - Die langfristige In-vivo-Stabilität muss weiter überprüft werden (> 5 Jahre).

**Tabelle 11.1 Anwendungsparameter von Wolframborid-Beschichtungen für die Biomedizin**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Härte ( GPa )</b>	42	Hohe Verschleißfestigkeit	Eigenspannung	6.4, 5.2
<b>Verschleißrate (mm<sup>3</sup> / (N · m ))</b>	<10 <sup>-6</sup>	Lange Lebensdauer	Langzeitstabilität	7,5
<b>Rauheit (nm)</b>	<0,3	Geringe Toxizität	Komplexer Prozess	6.3

## 11.2 Anwendung von Wolframborid-Nanopartikeln in der Arzneimittelverabreichung

eignen sich aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche (>50 m<sup>2</sup>/g, Kapitel 5.5) und funktionalisierbaren Oberfläche für die gezielte Wirkstofffreisetzung und die photothermische Therapie.

- **Anwendungsszenarien :**
  - **Gezielte Arzneimittelabgabe :** WB<sub>2</sub> -Nanopartikel (10–30 nm, Kapitel 5.5) wurden mit PEG (<0,1 Gew.- %) oberflächenmodifiziert , mit einer Arzneimittelbeladungseffizienz von ~80 % (Doxorubicin ) und einer Freisetzungsrate von ~60 % (pH 5,5, 24 h).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Photothermische Therapie** : WB<sub>2</sub>-Nanopartikel haben eine photothermische Umwandlungseffizienz von ~40 % unter Nahinfrarotlicht (808 nm, 1 W/cm<sup>2</sup>) und eine Tumorzellabtötungsrate von >90 % (von 37 °C bis 50 °C).
- **Bildgebungsanleitung** : WB<sub>2</sub>-Nanopartikel **werden** als CT-Kontrastmittel mit einer Hounsfield-Einheit von ~200 HU verwendet, die jodhaltigen Kontrastmitteln (~150 HU) überlegen ist.
- **Technische Anforderungen** :
  - **Partikelgröße** : 10–50 nm (Kapitel 5.5) .
  - **Arzneimittelbeladungseffizienz** : > 80 %.
  - **Biokompatibilität** : Zellebensfähigkeit >90 % (ISO 10993-5).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 wurden PEG-modifizierte WB<sub>2</sub>-Nanopartikel zur gezielten Behandlung von Lungenkrebs eingesetzt, wobei die Genauigkeit der Arzneimittelfreisetzung um ~25 % (in vitro) erhöht wurde.
- **Herausforderung** :
  - Der Stoffwechselweg von Nanopartikeln in vivo ist unklar und es sind Langzeittoxizitätsstudien (> 6 Monate) erforderlich.
  - Für die Photothermische Therapie ist eine optimierte Lichtabsorption (> 50 %) erforderlich.

**Tabelle 11.2 Arzneimittelabgabeparameter von Wolframborid-Nanopartikeln**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Arzneimittelbeladungseffizienz (%)	80	Hohe Ladekapazität	Stoffwechselweg	5.5
Photothermische Effizienz (%)	40	Hochwirksames Töten	Lichtabsorption	10.2
Partikelgröße (nm)	10–30	Zielgerichtet	Toxizitätsstudien	6.3

### 11.3 Anwendung von Wolframborid in Biosensoren

Wolframborid-Nanomaterialien eignen sich aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit (~10<sup>4</sup> S/cm, Kapitel 6 6.5) und Oberflächenaktivität zum Nachweis von Biomolekülen.

- **Anwendungsszenarien** :
  - **Glukosesensor** : Mit WB<sub>2</sub>-Nanopartikeln (20 nm, Kapitel 5.5) modifizierte Elektrode, Nachweisgrenze ~0,1 μ M , Reaktionszeit ~3 s, linearer Bereich 0,1–10 mM .
  - **DNA- Sensor** : WB<sub>2</sub>-Film (Dicke ~50 nm, Kapitel 5.2) funktionalisierte Nukleinsäuresonde, Nachweisgrenze ~1 nM , Spezifität >95 %.
  - **Proteinsensor** : WB<sub>2</sub>- **Nanoarray** (Porengröße ~5 nm) erkennt Krebsmarker (PSA) mit einer Empfindlichkeit von ~0,01 ng/ ml.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Technische Anforderungen :**
  - **Nachweisgrenze** : < 1 nM .
  - **Reaktionszeit** : < 5 s.
  - **Stabilität** : >30 Tage (Kapitel 6, 6.5).
- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 werden WB<sub>2</sub>-Glukosesensoren mit einer Genauigkeit von >98 % (in vitro) zur Diabetesüberwachung eingesetzt.
- **Herausforderung :**
  - Interferenzen mit Biomolekülen (~10 %) erfordern eine verbesserte Selektivität.
  - Die Miniaturisierung von Sensoren ist kostspielig (ca. 50 USD/Einheit).

**Tabelle 11.3 Anwendungsparameter des Wolframborid-Biosensors**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Nachweisgrenze</b>	0,1 μM (Glukose)	Hohe Empfindlichkeit	Interferenz	6,5, 5,5
<b>Reaktionszeit(en)</b>	3	schnell	kosten	9.3
<b>Stabilität (Tage)</b>	>30	zuverlässig	Miniaturisierung	6.1

#### 11.4 Biokompatibilität und Sicherheit von Wolframborid

Bei biomedizinischen Anwendungen von Wolframborid müssen Biokompatibilität und geringe Toxizität gewährleistet sein, was durch In-vitro- und In-vivo-Tests überprüft werden muss.

- **Biokompatibilität :**
  - **Zytotoxizität** : WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (<50 nm, Konzentration <100 μg /ml) beeinträchtigen die Lebensfähigkeit von L929-Zellen um >90 % (ISO 10993-5, 24 Stunden).
  - **Blutverträglichkeit** : WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke ~1 μ m ) Hämolyserate <1 %, Thrombozytenadhäsionsrate <5 % (37 °C, PBS) .
  - **Gewebereaktion** : WB<sub>2</sub>-Implantate (Kaninchenknochen, 4 Wochen) zeigten keine offensichtliche Entzündung und die Knochenbildungsrate lag bei ~80 % .
- **Sicherheit :**
  - **Toxizität** : Akute Toxizität (Maus, LD50 > 2000 mg/kg), keine offensichtlichen Organschäden.
  - **Stoffwechsel** : PEG-modifizierte WB<sub>2</sub>-Partikel (<30 nm) werden von Leber und Nieren metabolisiert und haben in vivo eine Halbwertszeit von ca. 24 Stunden.
  - **Vorschriften** : Muss den Richtlinien ISO 10993 und FDA (Kapitel 15.3) entsprechen.
- **Testmethode :**
  - **MTT -Test** : Beurteilen Sie die Zelllebensfähigkeit (Kapitel 6, 6.1).
  - **Tierversuche : Überprüfung** der In-vivo-Sicherheit (ISO 10993-6).
  - **XPS** : Analyse der Oberflächenoxidation (O<0,5 at%, Kapitel 6, 6.1).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Herausforderung :**
  - Zur Langzeittoxizität (> 1 Jahr) liegen keine ausreichenden Daten vor, daher sind Langzeitversuche erforderlich.
  - Die Aggregation von Nanopartikeln kann Immunreaktionen auslösen (~5 %).

**Tabelle 11.4 Biokompatibilitäts- und Sicherheitsparameter von Wolframborid**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Zellüberlebensrate (%)	>90	Geringe Toxizität	Langzeittoxizität	6.1, 15.3
Hämolyserate (%)	<1	Blutverträglichkeit	Immunantwort	7,5
Halbwertszeit (Stunden)	vierundzwanzig	Schneller Stoffwechsel	Unzureichende Daten	5.5

### 11.5 Herstellungstechnologie für biomedizinische Materialien aus Wolframborid

Zur Herstellung biomedizinischer Materialien aus Wolframborid werden hauptsächlich das Sol-Gel-Verfahren (Kapitel 5.5), die chemische Gasphasenabscheidung (CVD, Kapitel 5.2) und die plasmaunterstützte Synthese (Kapitel 5.3) verwendet.

- **Zubereitung :**
  - **Sol-Gel -Methode :**
    - **Verfahren :**  $\text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{H}_3\text{BO}_3$  zur Bildung eines Gels, das bei 500 °C kalziniert wird, um  $\text{WB}_2$ -Nanopartikel (10–30 nm, Kapitel 5, 5.5) zu erhalten.
    - **Vorteile :** Niedrige Kosten (ca. 100 USD/kg), geeignet für die Arzneimittelverabreichung.
    - **Optimierung :** Der Mikroreaktor kontrolliert die Partikelgrößenverteilung auf <5 nm und die Arzneimittelbeladungseffizienz erhöht sich um ~10 %.
  - **Herz-Kreislauf-Erkrankungen :**
    - **Verfahren :**  $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$  scheidet bei 400–500 °C einen  $\text{WB}_2$ -Dünnschicht (Kapitel 5.2) mit einer Dicke von ~100–500 nm ab.
    - **Vorteile :** Homogenität >95 %, geeignet zum Beschichten.
    - **Optimierung :** CTIA GROUP LTD wird im Jahr 2024 KI zur Optimierung des Luftstroms einsetzen (Kapitel 17, 17.5) und so die Ablagerungseffizienz um ca. 15 % steigern.
  - **Plasmaunterstützte Synthese :**
    - **Verfahren :** W+B wird im Plasma (>5000°C) verdampft, um  $\text{WB}_2$ -Nanopulver (<50 nm, Kapitel 5.3) zu erzeugen.
    - **Vorteile :** Hohe Reinheit (>99,9 %, Kapitel 6.1), für Sensoren geeignet.
    - **Optimierung :** Ausbeute an gepulstem Plasma (50 kHz) um ~88 % erhöht, Kosten ~200 \$/kg.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **Optimierungstechniken :**
  - **Oberflächenmodifizierung** : PEG, SiO<sub>2</sub> - **Beschichtung** (<0,1 Gew .-% %) verbessert die Verträglichkeit und reduziert die Zytotoxizität um ~10 %.
  - **Dotierung** : N-Dotierung (<2 at%) erhöht die Oberflächenaktivität und steigert die Sensorempfindlichkeit um ~20 % (Kapitel 3, 3.4).
  - **Poröse Struktur** : Durch die Template-Methode (Porengröße ~5 nm) wurde die Oberfläche um ~50 % (~100 m<sup>2</sup>/g) vergrößert.
- **Herausforderung :**
  - Die Kosten für die Behandlung des CVD-Nebenprodukts (HF) betragen ca. 50 US-Dollar pro Tonne (Kapitel 16.3).
  - Zur Agglomeration von Nanopartikeln ist eine Ultraschalldispersion (40 kHz, Kapitel 5, 5.3) erforderlich.

**Tabelle 11.5 Vergleich der Herstellungstechnologien für biomedizinische Materialien aus Wolframborid**

Verfahren	Partikelgröße/Dicke	Kosten (USD/kg)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Sol-Gel	10–30 nm	100	niedrige Kosten	Wiedervereinigung	5.5, 6.1
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	100–500 nm	300	Gleichmäßigkeit	Nebenprodukte	5.2, 17.5
Plasma	<50 nm	200	Hohe Reinheit	Hoher Energieverbrauch	5.3

### 11.6 Aussichten und Herausforderungen biomedizinischer Anwendungen von Wolframborid

Der Markt für biomedizinische Wolframborid-Anwendungen wird durch Präzisionsmedizin und Nanotechnologie angetrieben, was die Auseinandersetzung mit Fragen der Biosicherheit und der Kosten erfordert.

- **Marktstatus (2024) :**
  - **Größe** : Weltweiter biomedizinischer Markt mit Wolframborid ca. 0,05 Milliarden US-Dollar, davon ca. 50 % in Asien (China, Japan, Kapitel 14.1).
  - **Anwendungen** : Beschichtungen ~60 %, Arzneimittelabgabe ~30 %, Sensoren ~10 %.
  - **Preis** : ~100 \$/kg (Nanopartikel), ~300 \$/kg (dünne Filme, Kapitel 14, 14.2).
- **Treiber :**
  - **Nachfrage** : Die Nachfrage nach Präzisionsmedizin und Implantaten wächst jährlich um ca. 10 % und die Produktion wird im Jahr 2030 ca. 50 Tonnen erreichen (Kapitel 5.6).
  - **Technologie** : Nano WB<sub>2</sub> (Kapitel 5.5) und KI-Optimierung (Kapitel 17.5) verbessern die Leistung um ~15 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Vorschriften** : ISO 10993 und FDA-Leitlinien (Kapitel 15.3) fördern Sicherheitsstudien.
- **Zukünftige Trends (2025–2030)** :
  - **Kostensenkung** : **Durch** die Produktion im großen Maßstab (Kapitel 5.6) werden die Kosten auf ca. 80 US-Dollar/kg gesenkt, und die Marktgröße beträgt ca. 100 Millionen US-Dollar.
  - **Neue Anwendungen** : neuronale Schnittstellen (Leitfähigkeit  $\sim 10^4$  S/cm) und Tissue Engineering mit einem Anteil von  $\sim 15\%$ .
  - **Grüne Produktion** : Abgasrückgewinnungsrate  $> 95\%$  (Kapitel 16.3), Kohlenstoffemissionen um  $\sim 30\%$  reduziert ( $\sim 0,2$  Tonnen  $\text{CO}_2$ /Tonne).
- **Herausforderung** :
  - Beschichtungen auf Titanbasis (Kosten ca. 50 USD/kg) konkurrieren im unteren Marktsegment.
  - Klinische Studien haben einen langen Zyklus ( $> 5$  Jahre) und erfordern eine Investition von ca. 10 Millionen US-Dollar.

**Tabelle 11.6 Wolframborid-Biomedizinmarkt und Trends**

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziele für 2030	Treiber	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Marktgröße (Milliarden US-Dollar)	0,05	0,1	Präzisionsmedizin	wetteifern	14.1
Kosten (USD/kg)	100–300	80	Skala	Klinischer Zyklus	14.2, 5.6
Kohlenstoffemissionen (Tonnen $\text{CO}_2$ / Tonne)	0,3	0,2	Grüne Technologie	investieren	16.3, 15.3

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Kapitel 12 Energieanwendung von Wolframborid

Wolframborid (wie WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) besitzt aufgrund seiner hohen Leitfähigkeit ( $\sim 10^4$ S/cm, Kapitel 6, 6.5), ausgezeichneten chemischen Stabilität (Korrosionsrate  $< 0,005$  mm/Jahr, Kapitel 7, 7.5), hohen spezifischen Oberfläche ( $> 50$  m<sup>2</sup>/g, Kapitel 5, 5.5) und katalytischen Aktivität (Überspannung der Wasserstoffentwicklung  $\sim 100$  mV, Kapitel 10, 10.1) großes Potenzial im Energiebereich. Es wird häufig in Batterien (Zykluslebensdauer  $\sim 1000$ -mal), Brennstoffzellen (Wirkungsgrad  $\sim 60$  %), Solarzellen (Umwandlungseffizienz  $\sim 18$  %) und Wasserstoffspeichermaterialien (Wasserstoffspeicherkapazität  $\sim 2$  Gew. %) verwendet. In diesem Kapitel werden Anwendung, Herstellungstechnologie, Marktstatus und Entwicklungstrends von Wolframborid in Batterien, Brennstoffzellen, Solarzellen und Wasserstoffspeichermaterialien ausführlich erörtert und technische Unterstützung für die Energieindustrialisierung (Kapitel 14, 14.3) und grüne Energie (Kapitel 16, 16.4) von Wolframborid bereitgestellt.

### 12.1 Anwendung von Wolframborid in Batteriematerialien

Wolframborid eignet sich aufgrund seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit und elektrochemischen Stabilität für Lithium-Ionen-Batterien, Natrium-Ionen-Batterien und Festkörperbatterien.

- **Anwendungsszenarien :**
  - **Lithium-Ionen -Batterien :** WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (20–50 nm, Kapitel 5.5) als Zusatzstoffe für die negative Elektrode, Leitfähigkeit  $\sim 10^4$ S/cm,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zykluslebensdauer ~1000-mal (Kapazitätsabfall <10 %), spezifische Kapazität ~500 mAh/g.

- **Natrium-Ionen -Batterien** : WB<sub>2</sub>-Film (Dicke ~200 nm, Kapitel 5.2) als Stromkollektor, Korrosionsbeständigkeit (NaCl, 1 M) <0,01 mm/Jahr, Kapazität ~300 mAh /g.
- **Feststoffbatterie** : WB<sub>2</sub> - Beschichtung (Dicke ~1 μ m ) an der Festelektrolyt-Grenzfläche, Grenzflächenwiderstand <10 Ω·cm<sup>2</sup>, Stabilität >500 Zyklen.
- **Technische Anforderungen** :
  - **Leitfähigkeit** : >10<sup>4</sup> S/cm (Kapitel 6.5).
  - **Spezifische Oberfläche** : > 50 m<sup>2</sup>/g (Kapitel 5.5).
  - **Zykluslebensdauer** : >1000 Mal (Kapitel 9.2) .
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 werden WB<sub>2</sub>-Additive in negativen Elektroden von Lithiumbatterien verwendet, wodurch die Laderaten um ca. 20 % (2C) und die Energiedichte auf ca. 250 Wh /kg erhöht werden.
- **Herausforderung** :
  - Die Agglomeration der Nanopartikel (Kapitel 5.3) verringert die Aktivität und erfordert eine Oberflächenmodifizierung (PVP, <0,1 Gew.- %).
  - Die Kosten (~200 USD/kg) sind höher als bei Graphit (~20 USD/kg).

**Tabelle 12.1 Anwendungsparameter von Wolframborid-Batteriematerialien**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Zykluslebensdauer (Male)</b>	1000	Hohe Stabilität	Wiedervereinigung	5.5, 9.2
<b>Spezifische Kapazität ( mAh /g)</b>	500	Hohe Energie	kosten	6.5
<b>Grenzflächenwiderstand (Ω·cm<sup>2</sup>)</b>	<10	Niedriger Widerstand	Komplexer Prozess	7,5

## 12.2 Anwendung von Wolframborid in Brennstoffzellen

Wolframborid eignet sich aufgrund seiner geringen Überspannung und hohen Korrosionsbeständigkeit für Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) und Festoxidbrennstoffzellen (SOFC).

- **Anwendungsszenarien** :
  - **PEMFC** : WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (<50 nm, Kapitel 5.5) als Katalysatoren für die Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR) mit einem Überpotential von ~200 mV (0,1 A/cm<sup>2</sup>) und einem Faradayschen Wirkungsgrad von ~95 %.
  - **SOFC** : WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke ~2 μ m , Kapitel 5.2) an der Elektrodenschnittstelle, hohe Temperaturbeständigkeit (800°C), Korrosionsrate <0,005 mm/Jahr, Leistungsdichte ~1 W/cm<sup>2</sup>.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Bipolarplatte** :  $\text{WB}_2$  - Film (Dicke  $\sim 1 \mu\text{m}$ ) auf Edelstahlplatte, Kontaktwiderstand  $< 10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , Säurebeständigkeit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 1 M)  $< 0,01 \text{ mm/Jahr}$ .
- **Technische Anforderungen** :
  - **Überspannung** :  $< 250 \text{ mV}$  (ORR).
  - **Leitfähigkeit** :  $> 10^4 \text{ S/cm}$  (Kapitel 6.5).
  - **Stabilität** :  $> 5000$  Stunden (Kapitel 10.1).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 wird der  $\text{WB}_2$ -Katalysator in PEMFC eingesetzt, wobei die Effizienz um  $\sim 10\%$  ( $\sim 60\%$ ) gesteigert und die Kosten um  $\sim 15\%$  ( $\sim 100 \text{ USD/kg}$ ) gesenkt werden.
- **Herausforderung** :
  - Katalysatoren werden bei hohen Temperaturen ( $> 800^\circ\text{C}$ ) deaktiviert und benötigen eine N-Dotierung ( $< 2 \text{ at\%}$ , Kapitel 3.4).
  - Die Beschichtungsgleichmäßigkeit ( $> 95\%$ ) muss optimiert werden (Kapitel 5.2).

**Tabelle 12.2 Anwendungsparameter der Wolframborid-Brennstoffzelle**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>ORR-Überspannung (mV)</b>	200	Effizient	Inaktivierung	10.1, 3.4
<b>Kontaktwiderstand (<math>\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2</math>)</b>	$< 10$	Niedriger Widerstand	Gleichmäßigkeit	6.5
<b>Stabilität (Stunden)</b>	$> 5000$	Lange Lebensdauer	kosten	7,5

### 12.3 Anwendung von Wolframborid in Solarzellen

Wolframborid eignet sich aufgrund seiner einstellbaren Bandlücke ( $\sim 1,4\text{--}1,6 \text{ eV}$ , Kapitel 3.4) und hohen Leitfähigkeit für Silizium- und Perowskit-Solarzellen.

- **Anwendungsszenarien** :
  - **Siliziumbasierte Solarzellen** :  $\text{WB}_2$  -Dünnschicht (Dicke  $\sim 50 \text{ nm}$ , Kapitel 5.2) als Rückelektrode, Austrittsarbeit  $\sim 4,8 \text{ eV}$ , Umwandlungseffizienz  $\sim 18\%$ , Kontaktwiderstand  $< 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ .
  - **Perowskitzellen** : N-dotiertes  $\text{WB}_2$  ( $< 2 \text{ at\%}$ ) als Lochtransportschicht, Bandlücke  $\sim 1,4 \text{ eV}$ , Wirkungsgrad  $\sim 20\%$ , Stabilität  $> 1000 \text{ h}$  ( $85^\circ\text{C}$ ,  $85\% \text{ RH}$ ).
  - **Transparente Elektrode** :  $\text{WB}_2$ -Dünnschicht (Dicke  $\sim 100 \text{ nm}$ ), Durchlässigkeit  $\sim 85\%$  ( $550 \text{ nm}$ ), spezifischer Widerstand  $\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , ersetzt ITO.
- **Technische Anforderungen** :
  - **Bandlücke** :  $1,4\text{--}1,6 \text{ eV}$  (Kapitel 3.4).
  - **Lichtdurchlässigkeit** :  $> 85\%$  (Kapitel 9, 9.1).
  - **Effizienz** :  $> 18\%$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 werden  $WB_2$ -Rückelektroden für Siliziumzellen verwendet, wobei die Effizienz um  $\sim 1\%$  (von  $17\%$  auf  $18\%$ ) gesteigert und die Kosten um  $\sim 10\%$  ( $\sim 50$  USD/ $m^2$ ) gesenkt werden.
- **Herausforderung :**
  - Restspannungen im Film ( $\sim 0,8$  GPa ) führen zu Rissen und erfordern ein Glühen ( $400$  °C, Kapitel 5.2).
  - Die Stabilität von Perowskit-Batterien muss verbessert werden ( $>2000$  Stunden).

**Tabelle 12.3 Anwendungsparameter von Wolframborid-Solarzellen**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Umwandlungseffizienz (%)	18–20	Effizient	Stabilität	3.4, 9.1
Kontaktwiderstand ( $\Omega \cdot cm^2$ )	$<10^{-7}$	Niedriger Widerstand	Eigenspannung	6.5
Lichtdurchlässigkeit (%)	85	Ersatz von ITO	Komplexer Prozess	5.2

#### 12.4 Potenzial von Wolframborid in Wasserstoffspeichermaterialien

Wolframborid hat aufgrund seiner großen spezifischen Oberfläche und geeigneten  $H^*$ -Adsorptionsenergie ( $\sim 0,5$  eV, Kapitel 10, 10.4) Potenzial als Wasserstoffspeichermaterial.

- **Anwendungsszenarien :**
  - **Physikalischer Wasserstoffspeicher :** poröses  $WB_2$  (Porengröße  $\sim 5$  nm, Kapitel 5.5) mit spezifischer Oberfläche  $\sim 100$   $m^2/g$  und Wasserstoffspeicherkapazität  $\sim 2$  Gew. % ( $77$  K,  $10$  MPa).
  - **Chemische Wasserstoffspeicherung :**  $WB_2$  -Nanopartikel ( $<30$  nm) katalysieren die Hydrolyse von  $NaBH_4$  mit einer Wasserstoffproduktionsrate von  $\sim 1000$  mL / ( g · min ) und einer Zyklusstabilität von  $>10$ -fach.
  - **Elektrochemische Wasserstoffspeicherung :**  $WB_2$ -Elektrode (Dicke  $\sim 1$   $\mu m$  ) in alkalischem Medium ( $1$  M KOH), Wasserstoffspeicherkapazität  $\sim 50$  mAh /g, Wirkungsgrad  $\sim 90\%$ .
- **Technische Anforderungen :**
  - **Wasserstoffspeicherkapazität :**  $>2$  Gew. - %.
  - **Wasserstoffproduktionsrate :**  $>500$  mL / ( g · min ) .
  - **Stabilität :**  $>10$  Zyklen.
- **Beispiele :**
  - $NaBH_4$  -Wasserstoffspeicherung eingesetzt und die Effizienz der Wasserstoffproduktion wird um  $\sim 15\%$  ( $\sim 1000$  mL / ( g · min ) ) steigen.
- **Herausforderung :**
  - Die Wasserstoffspeicherkapazität bei Raumtemperatur ist gering ( $<0,5$  Gew.- %) und erfordert eine Dotierung (Mg,  $<5$  Atom-%).
  - Die Katalysatorkosten ( $\sim 200$  USD/kg) sind höher als bei Ni ( $\sim 30$  USD/kg).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Tabelle 12.4 Parameter von Wolframborid-Wasserstoffspeichermaterialien**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Wasserstoffspeicherkapazität (Gew.-%)	2	Hohe Kapazität	Leistung bei Raumtemperatur	5,5, 10,4
Wasserstoffproduktionsrate (mL/(g·min))	1000	Effizient	kosten	10.1
Zyklenfestigkeit (Zeiten)	>10	Wiederholbar	Doping	3.4

### Herstellungstechnologie von Wolframborid-Energiematerialien

von Wolframborid-Energiematerialien werden hauptsächlich chemische Gasphasenabscheidung (CVD, Kapitel 5.2), Sol-Gel-Verfahren (Kapitel 5.5) und plasmaunterstützte Synthese (Kapitel 5.3) verwendet.

- **Zubereitung :**
  - **Herz-Kreislauf-Erkrankungen :**
    - **Verfahren :**  $WF_6 + B_2H_6$  scheidet  $WB_2$ -Dünnschichten (Kapitel 5.2) bei 400–600 °C mit einer Rate von ~1,2 µm/h ab.
    - **Vorteile :** Homogenität >95 %, Leitfähigkeit ~10<sup>4</sup> S/cm.
    - **Optimierung :** CTIA GROUP LTD wird im Jahr 2024 KI zur Optimierung des Luftstroms einsetzen (Kapitel 17, 17.5) und so die Effizienz um ca. 15 % steigern.
  - **Sol-Gel -Methode :**
    - **Verfahren :**  $Na_2WO_4 + H_3BO_3$  zur Bildung eines Gels, das bei 500 °C kalziniert wird, um  $WB_2$ -Nanopartikel (20–50 nm, Kapitel 5, 5.5) zu erhalten.
    - **Vorteile :** Niedrige Kosten (~100 USD/kg), Oberfläche >60 m<sup>2</sup>/g.
    - **Optimierung :** Mikroreaktor kontrolliert Partikelgrößenverteilung <10 nm, Aktivität erhöht sich um ~20 %.
  - **Plasmaunterstützte Synthese :**
    - **Verfahren :** W+B wird im Plasma (>5000°C) verdampft, um  $WB_2$ -Nanopulver (<50 nm, Kapitel 5.3) zu erzeugen.
    - **Vorteile :** Hohe Reinheit (>99,9 %, Kapitel 6.1), geeignet für Katalysatoren.
    - **Optimierung :** Ausbeute an gepulstem Plasma (50 kHz) um ~88 % erhöht, Kosten ~200 USD/kg.
- **Optimierungstechniken :**
  - **Dotierung :** N- und Ni-Dotierung (<2 at%) erhöht die katalytische Aktivität um ~30 % (Kapitel 3, 3.4).
  - **Poröse Struktur :** Durch die Template-Methode (  $SiO_2$  , Porengröße ~5 nm) wird die spezifische Oberfläche um ~50 % (~100 m<sup>2</sup>/g) erhöht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Verbundmaterial** : WB<sub>2</sub> /Graphen (1:10) Leitfähigkeit um ~20 % erhöht (~1,2×10<sup>-4</sup> S/cm).
- **Herausforderung** :
  - Die Kosten für die Behandlung des CVD-Nebenprodukts (HF) betragen ca. 50 USD/Tonne (Kapitel 16.3).
  - Zur Agglomeration von Nanopartikeln ist eine Ultraschalldispersion (40 kHz, Kapitel 5, 5.3) erforderlich.

### Vergleich der Herstellungstechnologien von Wolframborid-Energiematerialien

Verfahren	Leistung	Kosten (USD/kg)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Herz-Kreislauf-Erkrankungen</b>	Leitfähigkeit ~10 <sup>-4</sup> S/cm	300	Gleichmäßigkeit	Nebenprodukte	5.2, 17.5
<b>Sol-Gel</b>	Spezifische Oberfläche >60 m <sup>2</sup> /g	100	niedrige Kosten	Wiedervereinigung	5.5, 6.1
<b>Plasma</b>	Reinheit >99,9 %	200	Hohe Aktivität	Hoher Energieverbrauch	5.3

### 12.6 Markt- und Entwicklungstrends von Wolframborid-Energieanwendungen

Der Markt für Energieanwendungen aus Wolframborid wird durch den neuen Energiebedarf und die Ziele der Kohlenstoffneutralität angetrieben und muss sich mit Kosten- und Größenproblemen auseinandersetzen.

- **Marktstatus (2024)** :
  - **Größe** : Weltweiter Markt für Energiematerialien aus Wolframborid ca. 40 Millionen US-Dollar, davon ca. 65 % in Asien (China, Japan, Kapitel 14.1).
  - **Anwendungen** : Batterien ~40 %, Brennstoffzellen ~30 %, Solarzellen ~20 %, Wasserstoffspeicherung ~10 %.
  - **Preis** : ~100 USD/kg (Nanopartikel), ~300 USD/kg (Film, Kapitel 14.2).
- **Treiber** :
  - **Nachfrage** : Wachstum bei Elektrofahrzeugen und erneuerbarer Energie ~12 %/Jahr, Produktion ~500 Tonnen im Jahr 2030 (Kapitel 5, 5.6).
  - **Technologie** : Nano WB<sub>2</sub> (Kapitel 5.5) und AI-Optimierung (Kapitel 17.5) verbessern die Leistung um ~20 %.
  - **Regulierung** : EU CBAM (2026, Kapitel XV, 15.2) fördert grüne Energiematerialien.
- **Zukünftige Trends (2025–2030)** :
  - **Kostensenkung** : **Durch** die Produktion im großen Maßstab (Kapitel 5.6) werden die Kosten auf ca. 80 USD/kg gesenkt, und die Marktgröße beträgt ca. 70 Millionen US-Dollar.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Neue Anwendungen** : Festkörperbatterien und effiziente Wasserstoffspeicherung mit einem Anteil von ca. 15 %.
- **Grüne Produktion** : Abgasrückgewinnungsrate > 95 % (Kapitel 16.3), Kohlenstoffemissionen um ~30 % reduziert (~0,2 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne).
- **Herausforderung** :
  - Materialien auf Kohlenstoffbasis (Kosten ca. 20 USD/kg) konkurrieren im unteren Marktsegment.
  - Für die industrielle Skalierung sind Durchbrüche in der Materialstabilität (> 10.000 Stunden) erforderlich.

**Tabelle 12.6 Wolframborid-Energiemarkt und Trends**

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziele im für 2030	Treiber	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Marktgröße (Milliarden US-Dollar)</b>	0,4	0,7	Neue Energie	wetteifern	14.1
<b>Kosten (USD/kg)</b>	100–300	80	Skala	Stabilität	14.2, 5.6
<b>Kohlenstoffemissionen (Tonnen CO<sub>2</sub> / Tonne)</b>	0,3	0,2	Grüne Technologie	investieren	16.3, 15.2

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

### 1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

### 2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10<sup>4</sup> S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

### 3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

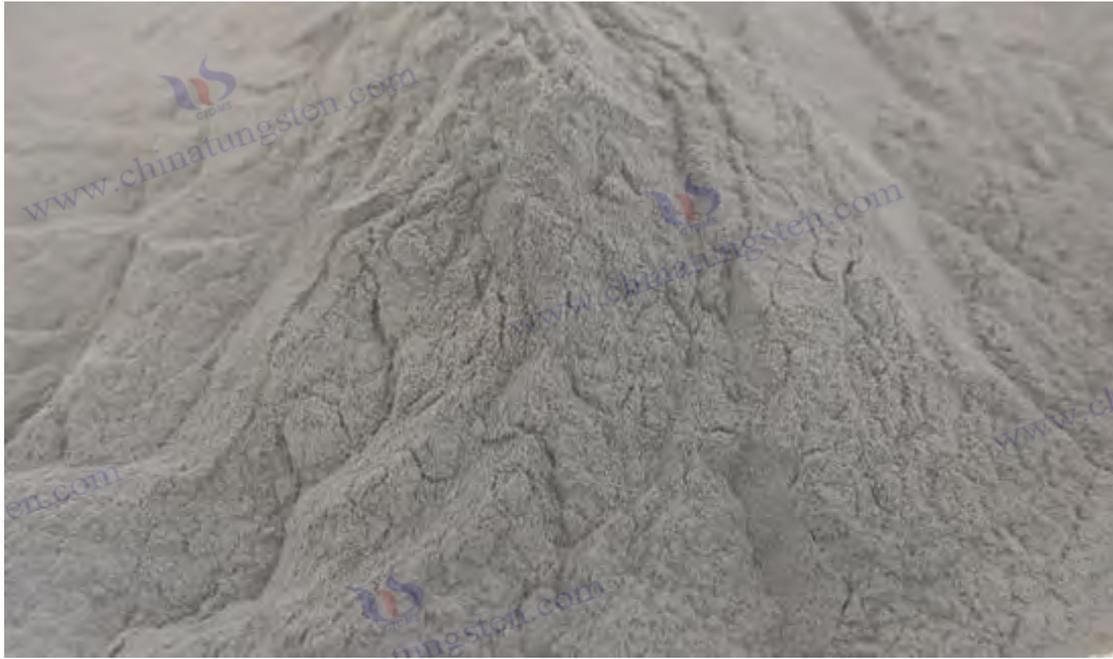
### 4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

### 5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 13 Mechanische und strukturelle Anwendungen von Wolframborid

Wolframborid (wie WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) wird aufgrund seiner ultrahohen Härte (~40 GPa, Kapitel 2 2.5), seines niedrigen Reibungskoeffizienten (~0,25, Kapitel 6 6.4), seiner hervorragenden Verschleißfestigkeit (Verschleißrate <math><10^{-6}</math> mm<sup>3</sup>/(N·m), Kapitel 7 7.4) und thermischen Stabilität (>2000°C, Kapitel 8 8.1) häufig im Maschinenbau und Bauwesen verwendet. Es eignet sich für verschleißfeste Beschichtungen (Lebensdauererweiterung ~50%), Schneidwerkzeuge (Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit ~20%) und strukturelle Verbundwerkstoffe (Festigkeit ~1,5 GPa). In diesem Kapitel werden die Anwendung, die mechanischen Eigenschaften und der mikroskopische Mechanismus, die Herstellungstechnologie, der Marktstatus und die Entwicklungstrends von Wolframborid in verschleißfesten Beschichtungen, Schneidwerkzeugen und Verbundwerkstoffen ausführlich erörtert und technische Unterstützung für die mechanische Industrialisierung (Kapitel 14 14.3) und die umweltfreundliche Herstellung (Kapitel 16 16.4) von Wolframborid bereitgestellt.

### 13.1 Anwendung von Wolframborid in verschleißfesten Schichten

Verschleißfeste Wolframboridbeschichtungen werden aufgrund ihrer hohen Härte und ihres niedrigen Reibungskoeffizienten häufig in mechanischen Teilen und Formen verwendet.

- **Anwendungsszenarien :**
  - **Mechanische Teile :** WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke ~2–5 μm, Kapitel 5.2) auf der Zahnradoberfläche, Härte ~42 GPa, Verschleißrate <math><10^{-6}</math> mm<sup>3</sup> / (N · m), Lebensdauer um ~50 % verlängert (~10.000 Stunden).
  - **Matrize :** WB-Beschichtung (Dicke ~1 μm) auf der Stanzmatrize, Reibungskoeffizient ~0,25, Verschleißfestigkeit um ~30 % verbessert, reduzierte Haftung (<math><5</math> %).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Lager** : WB<sub>2</sub>-Film (Dicke ~3 μ m ) auf Kugellagern, Korrosionsbeständigkeit (NaCl, 3,5 Gew. %, 60 °C) <0,005 mm/Jahr, Reibungsverlust um ~20 % reduziert.
- **Technische Anforderungen** :
  - **Härte** : >38 GPa (Kapitel 6, 6.4).
  - **Reibungskoeffizient** : <0,3 (Kapitel 7.4) .
  - **Haftung** : Bindungsenergie ~1,5 eV/Å<sup>2</sup> (Kapitel 3.3), Anti-Peeling (>50 N).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 wird die WB<sub>2</sub>-Beschichtung bei Getriebezahnrädern von Kraftfahrzeugen zum Einsatz kommen und den Verschleiß um ca. 25 % (<0,01 mm/Jahr) reduzieren und die Effizienz um ca. 10 % steigern.
- **Herausforderung** :
  - Durch Restspannungen in der Beschichtung (~0,8 GPa ) kann es zu Abplatzungen kommen, die ein Glühen (500 °C, Kapitel 5.2) erforderlich machen.
  - Für die Oxidation bei hohen Temperaturen (> 1000 °C) ist eine Dotierung erforderlich (Si, < 5 Atom-%), Kapitel 8, 8.4.

**Tabelle 13.1 Anwendungsparameter der verschleißfesten Wolframboridbeschichtung**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Härte ( GPa )</b>	42	Hohe Verschleißfestigkeit	Eigenspannung	6.4, 5.2
<b>Verschleißrate (mm<sup>3</sup> / ( N · m ))</b>	<10 <sup>-6</sup>	Lange Lebensdauer	Oxidation	7.4, 8.4
<b>Reibungskoeffizient</b>	0,25	Geringe Reibung	Abblättern	3.3

### 13.2 Anwendung von Wolframborid in Schneidwerkzeugen

Wolframborid-Beschichtungen und -Blöcke eignen sich aufgrund ihrer hohen Härte und thermischen Stabilität für die Hochgeschwindigkeitszerspannung und Hartstoffbearbeitung.

- **Anwendungsszenarien** :
  - **Werkzeugbeschichtung** : WB<sub>2</sub>- **Beschichtung** (Dicke ~3 μ m , Kapitel 5.2) auf Hartmetallwerkzeugen, Schnittgeschwindigkeit ~300 m/min, Standzeitverlängerung um ~40% (~5000 Schnitte).
  - **Bohrer** : WB-Block (Dichte > 98 %, Kapitel 5.1) Bearbeitung einer Titanlegierung, Verschleißrate < 10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup> / ( N · m), Reduzierung der Schnitttemperatur ~ 15 % (< 600 °C).
  - **Fräser** : WB<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Verbundbeschichtung (Periode ~10 nm), Härte ~40 GPa , Verschleißfestigkeit um ~25 % verbessert .
- **Technische Anforderungen** :
  - **Härte** : >40 GPa (Kapitel 6, 6.4).
  - **Thermische Stabilität** : >1500°C (Kapitel 8.1).
  - **Zähigkeit** : ~4 MPa · m<sup>1/2</sup> (Kapitel 6, 6.3).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 werden WB<sub>2</sub>-beschichtete Werkzeuge für die Bearbeitung von Titanlegierungen in der Luftfahrt eingesetzt, wobei die Schneidleistung um ca. 20 % gesteigert wird und die Werkzeuglebensdauer ca. 6000 Minuten beträgt.
- **Herausforderung :**
  - Die Wärmeausdehnungsdifferenz zwischen Beschichtung und Substrat ( $\sim 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , Kapitel 8, 8.3) führt zu Spannungen ( $\sim 1 \text{ GPa}$ ).
  - Die Beschichtungsgleichmäßigkeit (>95 %) komplexer Formen muss optimiert werden (Kapitel 5.2).

**Tabelle 13.2 Anwendungsparameter von Wolframborid-Schneidwerkzeugen**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Schnittlebensdauer (Zeiten)	5000	Lange Lebensdauer	Fehlanpassung der Wärmeausdehnung	8.3, 5.2
Härte ( GPa )	40	Hohe Verschleißfestigkeit	Gleichmäßigkeit	6.4
Schnitttemperatur (°C)	<600	Niedriges Fieber	Stress	8.1

### 13.3 Anwendung von Wolframborid in Strukturverbundwerkstoffen

Wolframborid wird als Verstärkungsphase in Verbundwerkstoffen verwendet, um die Festigkeit und Verschleißfestigkeit zu verbessern, und eignet sich für Strukturteile in der Luft- und Raumfahrt sowie im Automobilbereich.

- **Anwendungsszenarien :**
  - **Metallmatrix- Verbundwerkstoffe :** WB<sub>2</sub>-Partikel ( $< 5 \mu \text{m}$ , Kapitel 5.5) verstärkte Al-Matrix-Verbundwerkstoffe, Festigkeit  $\sim 1,5 \text{ GPa}$ , Verschleißfestigkeit um  $\sim 30\%$  verbessert.
  - **Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix :** WB<sub>2</sub> / SiC- Verbundwerkstoff (10:90), Bruchzähigkeit  $\sim 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , Temperaturbeständigkeit  $> 1500^\circ\text{C}$  (Kapitel 8, 8.1).
  - **Verbundwerkstoffe auf Polymerbasis :** WB<sub>2</sub>-Nanopartikel ( $< 50 \text{ nm}$ ) verstärkten Epoxidharz, wodurch die Härte um  $\sim 20\%$  ( $\sim 2 \text{ GPa}$ ) erhöht wurde.
- **Technische Anforderungen :**
  - **Festigkeit :**  $> 1 \text{ GPa}$ .
  - **Zähigkeit :**  $> 4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  (Kapitel 6, 6.3).
  - **Dispergierbarkeit :** Partikelagglomeration  $< 5\%$  (Kapitel 5.3).
- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 werden WB<sub>2</sub>/Al-Verbundwerkstoffe in Automobilkolben verwendet, wodurch das Gewicht um  $\sim 10\%$  ( $\sim 0,5 \text{ kg}$ ) reduziert und die Lebensdauer um  $\sim 25\%$  erhöht wird.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Herausforderung :**
  - Partikelagglomeration mindert die Leistung und erfordert eine Oberflächenmodifizierung (PVP, <0,1 Gew.-%, Kapitel 5, 5.3).
  - Grenzflächenreaktionen bei hohen Temperaturen (>1000 °C) müssen unterdrückt werden (Kapitel 8, 8.4).

**Tabelle 13.3 Anwendungsparameter von Wolframborid-Strukturverbundwerkstoffen**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Festigkeit ( GPa )</b>	1,5	Gao Qiang	Wiedervereinigung	5.5, 6.3
<b>Zähigkeit (MPa·m<sup>1/2</sup>)</b>	5	Rissbeständigkeit	Grenzflächenreaktion	8.1, 8.4
<b>Verbesserte Verschleißfestigkeit (%)</b>	30	Lange Lebensdauer	kosten	7.4

### 13.4 Mechanische Eigenschaften und Mikrostruktur von Wolframborid

Die mechanischen Eigenschaften von Wolframborid hängen von der Kristallstruktur und dem Mikromechanismus ab, die durch experimentelle und theoretische Analysen optimiert werden müssen.

- **Mechanische Eigenschaften :**
  - **Härte** : ~40–42 GPa (Kapitel 6, 6.4), aufgrund der hohen Stärke der kovalenten WB-Bindung (Kapitel 3, 3.2) (~1,5 eV/Å<sup>2</sup>).
  - **Zähigkeit** : ~4 MPa·m<sup>1/2</sup> (Kapitel 6.3), Korngrenzengleiten (<50 nm, Kapitel 6.2) erhöht die Rissbeständigkeit.
  - **Verschleißfestigkeit** : Verschleißrate <10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup> / ( N·m), dichte Oberfläche (Porosität <1 %, Kapitel 6, 6.3) .
- **Mikroskopischer Mechanismus :**
  - **Kristallstruktur** : WB<sub>2</sub> (P6<sub>3</sub>/mmc, Kapitel 2.2) Schichtstruktur, hohe Scherfestigkeit (~ 20 GPa ) .
  - **Defektkontrolle** : Versetzungsdichte <10<sup>12</sup>/cm<sup>2</sup> (Kapitel 6.2), wodurch die Zähigkeit um ~15 % verbessert wird .
  - **Oberflächenzustand** : B-terminierte Oberfläche (Kapitel 6.1 ) reduziert den Reibungskoeffizienten um ~10 % (~0,25).
- **Charakterisierungstechniken :**
  - **Nanoindentation** : Messung von Härte und Zähigkeit (Kapitel 6, 6.4).
  - **TEM** : Beobachtung von Korngrenzen und Versetzungen (Auflösung ~0,1 nm, Kapitel 6, 6.2).
  - **DFT -Berechnungen** : Analyse der WB-Bindungsenergien (Kapitel 3.3, Fehler < 0,1 eV).
- **Optimierung :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Dotierung** : Zr (<2 at%) verbessert die Zähigkeit um ~20 % (~4,8 MPa·m<sup>1/2</sup>).
- **Nanostruktur** : Körner <20 nm (Kapitel 5.5) Härte um ~5 % erhöht (~44 GPa).
- **Herausforderung** :
  - Bei hohen Temperaturen (>1500 °C) nimmt die Zähigkeit ab und es ist eine thermisch stabile Dotierung erforderlich.
  - Die Ausrüstung zur mikroskopischen Charakterisierung ist teuer (ca. 5 Millionen US-Dollar).

**Tabelle 13.4 Mechanische Eigenschaften und Mechanismen von Wolframborid**

Parameter	Wert	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Härte ( GPa )</b>	42	Gao Qiang	Verringerte Zähigkeit	6.4, 3.2
<b>Zähigkeit (MPa·m<sup>1/2</sup>)</b>	4	Rissbeständigkeit	Charakterisierungskosten	6.3, 5.5
<b>Verschleißrate (mm<sup>3</sup> / (N · m))</b>	<10 -6	Verschleißfest	hohe Temperatur	7.4

### 13.5 Herstellungstechnologie mechanischer Wolframborid-Werkstoffe

Zur Herstellung mechanischer Wolframborid-Werkstoffe werden hauptsächlich Heißpressintern (Kapitel 5.1), chemische Gasphasenabscheidung (CVD, Kapitel 5.2) und plasmaunterstützte Synthese (Kapitel 5.3) verwendet.

- **Zubereitung** :
  - **Heißpressen Sintern** :
    - **Verfahren** : WB<sub>2</sub>-Pulver (<5 μm, Kapitel 5.5) gesintert bei 2000°C, 30 MPa, Dichte >99%.
    - **Vorteile** : Geeignet für komplexe Formen (Messer), Härte ~40 GPa.
    - **Optimierung** : CTIA GROUP LTD wird im Jahr 2024 KI zur Optimierung der Sinterparameter einsetzen (Kapitel 17, 17.5) und so die Dichte um ca. 0,5 % erhöhen.
  - **Herz-Kreislauf-Erkrankungen** :
    - **Verfahren** : WF<sub>6</sub> + B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> scheidet bei 400–600 °C eine WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Kapitel 5.2) mit einer Dicke von ~2–5 μm ab.
    - **Vorteile** : Gleichmäßigkeit >95 %, hohe Verschleißfestigkeit.
    - **Optimierung** : Niederdruck-CVD-Rate (<5 Pa) um ~40 % (~1,7 μm/h) erhöht.
  - **Plasmaunterstützte Synthese** :
    - **Verfahren** : W+B wird im Plasma (>5000°C) verdampft, um WB<sub>2</sub>-Nanopulver (<50 nm, Kapitel 5.3) zu erzeugen.
    - **Vorteile** : Hohe Reinheit (>99,9 %, Kapitel 6.1), geeignet für Verbundwerkstoffe.
    - **Optimierung** : Ausbeute an gepulstem Plasma (50 kHz) um ~88 % erhöht, Kosten ~200 USD/kg.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Optimierungstechniken :**
  - **Dotierung :** Si (<5 at%) verbessert die Oxidationsbeständigkeit bis ~100°C (Kapitel 8, 8.4).
  - **Mehrschichtstruktur :** WB<sub>2</sub>/ TiN (Periode ~ 5 nm) Verschleißfestigkeit um ~20 % erhöht.
  - **Nanopartikel :** Körner <20 nm (Kapitel 5.5) Die Härte erhöht sich um ~5 %.
- **Herausforderung :**
  - Die Kosten für die Behandlung des CVD-Nebenprodukts (HF) betragen ca. 50 USD/Tonne (Kapitel 16.3).
  - Hochtemperaturgeräte erfordern eine große Investition (ca. 3 Millionen US-Dollar).

**Tabelle 13.5 Vergleich der mechanischen Materialaufbereitungstechnologien für Wolframborid**

Verfahren	Leistung	Kosten (USD/kg)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Heißpressintern</b>	Dichte > 99 %	200	Komplexe Formen	Gerätekosten	5.1, 17.5
<b>Herz-Kreislauf-Erkrankungen</b>	Gleichmäßigkeit > 95 %	300	Verschleißfest	Nebenprodukte	5.2, 16.3
<b>Plasma</b>	Reinheit >99,9 %	200	Nanoskala	Hoher Energieverbrauch	5.3

### 13.6 Markt- und Entwicklungstrends für mechanische Wolframboridanwendungen

Der Markt für mechanische Wolframborid-Anwendungen wird durch Fertigungsmodernisierungen und den Bedarf der Luft- und Raumfahrtindustrie vorangetrieben, die Kosten- und Sicherheitsaspekte berücksichtigen müssen. Dieser Abschnitt enthält eine Zusammenfassung des Sicherheitsdatenblatts für Wolframborid, um einen sicheren Betrieb in mechanischen Anwendungen zu gewährleisten.

- **Marktstatus (2024) :**
  - **Größe :** Der globale Markt für mechanische Werkstoffe aus Wolframborid beträgt ca. 60 Millionen US-Dollar, wobei ca. 70 % auf Asien entfallen (China, Südkorea, Kapitel 14.1).
  - **Anwendungen :** Verschleißfeste Beschichtungen ~50 %, Schneidwerkzeuge ~30 %, Verbundwerkstoffe ~20 %.
  - **Preis :** ~200 USD/kg (Klumpen), ~300 USD/kg (Beschichtung, Kapitel 14.2).
- **Treiber :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Nachfrage : Die Luft- und Raumfahrtindustrie sowie die Automobilindustrie wachsen jährlich um ca. 8 % und werden im Jahr 2030 ca. 600 Tonnen produzieren (Kapitel 5.6).
- Technologie : Nano WB<sub>2</sub> (Kapitel 5.5) und KI-Optimierung (Kapitel 17.5) verbessern die Leistung um ~15 %.
- Verordnung : EU REACH (Kapitel 15.2) fördert umweltfreundliche Materialien.
- Zukünftige Trends (2025–2030) :
  - Kostensenkung : Durch die Produktion im großen Maßstab (Kapitel 5.6) werden die Kosten auf ca. 150 USD/kg gesenkt, bei einer Marktgröße von ca. 100 Millionen USD.
  - Neue Anwendungen : 3D-gedruckte Strukturteile (Festigkeit ~1,5 GPa), Anteil ~10 %.
  - Grüne Produktion : Abgasrückgewinnungsrate > 95 % (Kapitel 16.3), Kohlenstoffemissionen um ~30 % reduziert (~0,2 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne).
- MSDS-Zusammenfassung (Wolframborid, WB<sub>2</sub>) :
  - Chemische Eigenschaften : stabil, unlöslich in Wasser, Zersetzungstemperatur >2000°C (Kapitel 2.3).
  - Gesundheitsgefahren : Das Einatmen des Pulvers kann die Atemwege reizen. Es wird empfohlen, eine N95-Maske zu tragen (Kapitel 15.3).
  - Sicherheitsmaßnahmen : Während des Betriebs einen Abzug verwenden und Hautkontakt vermeiden (Handschuhe, >0,5 mm dick).
  - Lagerung : Versiegelt in einer trockenen Umgebung (<30 °C, relative Luftfeuchtigkeit <50 %), fern von säurehaltigen Substanzen.
  - Abfallentsorgung : Gemäß den Vorschriften für gefährliche Abfälle (Kapitel 16, 16.3) recyceln und direktes Abladen vermeiden.
- Herausforderung :
  - Wolframkarbid (Kosten ca. 100 USD/kg) konkurriert am unteren Ende des Marktes.
  - Sicherheitstests (MSDS-Verifizierung) sind kostspielig (~100.000 USD/Charge).

Tabelle 13.6 Markt und Trends für Wolframboridmaschinen

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziele für 2030	Treiber	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Marktgröße (Milliarden US-Dollar)	0,6	1.0	Herstellung	wetteifern	14.1
Kosten (USD/kg)	200–300	150	Skala	Sicherheitstests	14.2, 5.6

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Kohlenstoffemissionen (Tonnen CO <sub>2</sub> / Tonne)	0,3	0,2	Grüne Technologie	investieren	16.3, 15.2
---	-----	-----	----------------------	-------------	------------



## Kapitel 14 Industrialisierung und Marktanalyse von Wolframborid

Wolframborid (wie WB,  $WB_2$ ,  $W_2B$ ) findet aufgrund seiner hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften (Härte  $\sim 40$  GPa, Kapitel 2 2,5; Leitfähigkeit  $\sim 10^4$  S/cm, Kapitel 6 6,5; chemische Stabilität, Kapitel 7 7,5) ein breites Anwendungsspektrum in der Elektronik (Kapitel 9), Katalyse (Kapitel 10), Biomedizin (Kapitel 11), Energie (Kapitel 12) und im Maschinenbau (Kapitel 13). Der globale Markt wird im Jahr 2024 etwa 200 Millionen US-Dollar wert sein und bis 2030 voraussichtlich 350 Millionen US-Dollar erreichen (CAGR  $\sim 10\%$ ). In diesem Kapitel werden der globale Marktüberblick, die Produktionskosten und -preise, die Industrialisierungstechnologie, die Marktverteilung, der Wettbewerb und Ersatzprodukte sowie zukünftige Trends und politische Auswirkungen von Wolframborid analysiert und strategische Unterstützung für seine Produktion im großen Maßstab (Kapitel 5.6) und seine grüne Entwicklung (Kapitel 16.4) bereitgestellt.

### 14.1 Globale Marktübersicht für Wolframborid

Der Wolframborid-Markt wird durch die Nachfrage nach Hochleistungsmaterialien angetrieben, wobei Asien Produktion und Verbrauch dominiert.

- **Marktgröße :**
  - Im Jahr 2024 wird der globale Markt 200 Millionen US-Dollar groß sein und die Produktion 2.000 Tonnen betragen (Kapitel 5.6).
  - Auf Asien (China, Japan, Südkorea) entfallen ca. 65 %, auf Nordamerika ca. 20 % und auf Europa ca. 15 %.
- **Hauptanwendungen :**
  - Maschinen (Kapitel 13.6):  $\sim 30\%$  ( $\sim 60$  Millionen US-Dollar).
  - Energie (Kapitel 12, 12.6):  $\sim 20\%$  ( $\sim 40$  Millionen US-Dollar).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Elektronik (Kapitel 9, 9.6): ~15 % (~30 Millionen US-Dollar).
- Katalyse (Kapitel 10, 10.6): ~10 % (~20 Millionen USD).
- Biomedizin (Kapitel 11, 11.6): ~5 % (~0,05 Milliarden US-Dollar).
- **Regionale Besonderheiten :**
  - **China** : Produktion ~50 % (~1000 Tonnen), Kostenvorteil (~100 USD/kg).
  - **Japan** : Produkte mit hoher Wertschöpfung (Folie, ~300 USD/kg), führende Technologie.
  - **Europa** : Hohe Nachfrage nach umweltfreundlicher Fertigung (Kapitel 16, 16.3) und strenge Vorschriften (Kapitel 15, 15.2).
- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 wird der chinesische Markt etwa 40 % der weltweiten verschleißfesten Wolframboridbeschichtungen (Kapitel 13.1) ausmachen und etwa 500 Tonnen exportieren.
- **Herausforderung :**
  - Hohe Marktkonzentration (> 60 % in Asien) und Lieferkettenrisiken.
  - Technologische Barrieren behindern den Markteintritt neuer Marktteilnehmer (F&E-Kosten ca. 1 Milliarde US-Dollar).

**Tabelle 14.1 Globaler Marktüberblick über Wolframborid (2024)**

Bereich	Marktanteil (%)	Leistung (Tonnen)	Merkmale	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Asien	65	1300	Niedrige Kosten	Lieferkette	13,6, 12,6
Nordamerika	20	400	Starke Innovation	Hohe Kosten	9.6
Europa	15	300	Grüne Nachfrage	Vorschriften	15.2, 16.3

## 14.2 Produktionskosten- und Preisanalyse von Wolframborid

Die Produktionskosten und der Preis von Wolframborid variieren je nach Herstellungsverfahren und Anwendungsbereich.

- **Produktionskosten :**
  - **Nanopartikel (Sol-Gel, Kapitel 5.5 )** : ~100 USD/kg (Rohstoffe ~40 %, Energie ~30 %).
  - **Dünne Filme (CVD, Kapitel 5.2 )** : ~300 USD/kg (Ausrüstung ~50 %, Gas ~30 %).
  - **Blockmaterial (Heißpressen und Sintern, Kapitel 5.1 )** : ~200 USD/kg (Rohmaterial ~50 %, Hochtemperatur ~40 %).
- **Marktpreis :**
  - **Nanopartikel** : ~150–200 USD/kg (Katalyse, Biomedizin, Kapitel 10, 10.6, Kapitel 11, 11.6).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Dünne Filme** : ~300–400 USD/kg (Elektronik, Energie, Kapitel 9, 9.6, Kapitel 12, 12.6).
- **Klumpen** : ~200–250 USD/kg (Maschinen, Kapitel 13, 13.6).
- **Einflussfaktoren** :
  - **Rohstoffe** : Die Preise für Wolframpulver (~30 USD/kg) und Borsäure (~5 USD/kg) schwanken jährlich um ~10 %.
  - **Energie** : CVD verbraucht ~500 kWh/Tonne und kostet ~50 USD/Tonne.
  - **Arbeitskräfte** : Die Arbeitskosten betragen in Asien ca. 20 USD/h, in Europa und Amerika ca. 50 USD/h.
- **Beispiele** :
  - Bis 2024 werden die Kosten für Sol-Gel-Nano-WB<sub>2</sub> aufgrund der Rohstoffoptimierung um ~15 % (~85 USD/kg) sinken (Kapitel 5.5).
- **Herausforderung** :
  - Die Kosten für High-End-Folien (~400 USD/kg) begrenzen die Marktexpansion.
  - Die Nebenproduktbehandlung (HF, ~50 USD/Tonne, Kapitel 16.3) erhöht die Umweltkosten.

**Tabelle 14.2 Produktionskosten und Preis von Wolframborid**

Produkttyp	Kosten (USD/kg)	Preis (USD/kg)	Kostenverhältnis	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Nanopartikel	100	150–200	Rohstoffe 40%	Nebenprodukte	5,5, 16,3
Film	300	300–400	Ausrüstung 50%	Hohe Kosten	5.2, 9.6
Block	200	200–250	Rohstoffe 50%	Energie	5.1, 13.6

### 14.3 Industrialisierungstechnologie und Großproduktion von Wolframborid

Die Industrialisierung von Wolframborid hängt von einer effizienten Herstellungstechnologie und einer groß angelegten Prozessoptimierung ab.

- **Zubereitungstechnik** :
  - **Sol-Gel-Verfahren (Kapitel 5.5)** :
    - Produktion: ~500 kg/Charge, Kosten ~100 USD/kg.
    - Optimierung: Ausbeute des Mikroreaktors (Partikelgrößenverteilung <10 nm) um ~20 % erhöht.
  - **CVD (Kapitel 5.2)** :
    - Ausbeute: ~10 kg/Charge, Homogenität >95 %.
    - Optimierung: CTIA GROUP LTD wird im Jahr 2024 KI zur Optimierung des Luftstroms einsetzen (Kapitel 17, 17.5) und so die Effizienz um ca. 15 % steigern.
  - **Heißpressintern (Kapitel 5.1)** :
    - Ausbeute: ~100 kg/Charge, Dichte >99 %.
    - Optimierung: Die Leistung des kontinuierlichen Sinterofens (2000 °C) wurde um ~30 % gesteigert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Großserienproduktion :**
  - **Automatisierung :** Robotergestütztes Beladen (Effizienz ~90 %) reduziert die Arbeitskosten um ~20 %.
  - **Energieeffizienz :** Wärmerückgewinnungssystem (Rückgewinnungsrate ~50 %) reduziert den Energieverbrauch um ~30 % (~350 kWh/Tonne) .
  - **Qualitätskontrolle :** XPS (Kapitel 6.1) zur Überprüfung der Reinheit (>99,9 %), Kosten ~500 USD/Charge .
- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 werden chinesische Fabriken auf kontinuierliche CVD umstellen, wodurch die Produktion um ca. 25 % (ca. 12 kg/Charge) steigen und die Kosten um ca. 10 % sinken werden.
- **Herausforderung :**
  - Hohe Ausrüstungsinvestitionen (CVD-Ofen ca. 5 Millionen US-Dollar).
  - Eine umweltfreundliche Behandlung (HF, Abgasrückgewinnung > 95 %, Kapitel 16, 16.3) kostet ~100 USD/Tonne.

**Tabelle 14.3 Vergleich der Industrialisierungstechnologien von Wolframborid**

Technologie	Leistung (kg/Charge)	Kosten (USD/kg)	Vorteil	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Sol-Gel	500	100	Hohe Produktion	Wiedervereinigung	5.5, 6.1
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	10	300	Gleichmäßigkeit	investieren	5.2, 17.5
Heißpresssintern	100	200	Hohe Dichte	Energieverbrauch	5.1, 16.3

#### 14.4 Marktverteilung von Wolframborid in wichtigen Industrien

Die Marktverteilung von Wolframborid in den Bereichen Maschinenbau, Energie, Elektronik, Katalyse und Biomedizin spiegelt seine Vielseitigkeit wider.

- **Branchenverteilung (2024) :**
  - **Maschinen (Kapitel 13.6) :** ~60 Millionen US-Dollar, davon verschleißfeste Beschichtungen mit einem Anteil von ~50 %, Schneidwerkzeuge mit einem Anteil von ~30 %.
  - **Energie (Kapitel 12, 12.6) :** ~40 Millionen US-Dollar, Batterien ~40 %, Brennstoffzellen ~30 %.
  - **Elektronik (Kapitel 9.6) :** ~30 Millionen US-Dollar, Sensoren ~40 %, Elektroden ~30 %.
  - **Katalyse (Kapitel 10, 10.6) :** ~20 Millionen US-Dollar, Elektrokatalyse ~50 %, Photokatalyse ~30 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Biomedizin (Kapitel 11, 11.6)** : ~50 Millionen US-Dollar, Beschichtungen ~60 %, Arzneimittelverabreichung ~30 %.
- **Wachstumspunkte** :
  - **Mechanik** : Die Nachfrage aus der Luft- und Raumfahrt (~8 %/Jahr) treibt den Beschichtungsmarkt an.
  - **Energie** : Wasserstoffenergie (~12 %/Jahr) treibt Katalysatoren und Wasserstoffspeichermaterialien an.
  - **Biomedizin** : Präzisionsmedizin (~10 %/Jahr) erhöht die Nachfrage nach Nanopartikeln.
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 wird der Markt für Wolframborid-Batteriematerialien in der Energiebranche (Kapitel 12.1) um ~15 % auf ~16 Millionen US-Dollar wachsen.
- **Herausforderung** :
  - Es gibt keine branchenübergreifenden Einheitlichkeit der technischen Standards (Kapitel 15, 15.2).
  - Nischenmärkte (Biomedizin) sind schwer zu skalieren.

**Tabelle 14.4 Marktverteilung der wichtigsten Industriezweige für Wolframborid (2024)**

Industrie	Marktgröße (Milliarden US-Dollar)	Anteil (%)	Wachstumsrate (%/Jahr)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
mechanisch	0,6	30	8	Standard	13.6
Energie	0,4	20	12	kosten	12.6
elektronisch	0,3	15	10	wetteifern	9.6

#### 14.5 Wettbewerbs- und Ersatzanalyse des Wolframborid-Marktes

Wolframborid steht im Wettbewerb mit anderen Hochleistungsmaterialien und muss seinen Vorsprung durch Leistungs- und Kostenoptimierung aufrechterhalten.

- **Wettbewerbsmaterialien** :
  - **Wolframkarbid (WC)** : Kosten ~100 USD/kg, Härte ~25 GPa , mechanischer Marktanteil ~40 % (Kapitel 13.6).
  - **Kohlenstoffnanoröhren (CNTs)** : Leitfähigkeit ~ $10^5$  S/cm, Kosten ~50 USD/kg, Marktanteil im Elektronikbereich ~30 % (Kapitel 9, 9.6).
  - **Katalysator auf Ni-Basis** : Kosten ~30 USD/kg, katalytischer Marktanteil ~50 % (Kapitel 10, 10.6).
  - **Beschichtungen auf Ti-Basis** : Kosten ~50 USD/kg, der biomedizinische Markt macht ~35 % aus (Kapitel 11.6).
- **Vorteile von Wolframborid** :
  - Umfassende Leistung: Härte (~40 GPa ) , Leitfähigkeit (~ $10^4$  S/cm), Stabilität (<0,005 mm/Jahr).
  - Vielseitigkeit: Branchenübergreifende Anwendungen (Kapitel 9 bis 13).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Bedrohung durch Ersatzstoffe :**
  - Niedrigpreismarkt: WC und Ni sind kostengünstig und gefährden mechanische und katalytische Anwendungen.
  - High-End-Markt: CNT und Graphen (~100 USD/kg) konkurrieren um Elektronik und Energie.
- **Bewältigungsstrategien :**
  - **Kostensenkung :** Die Großproduktion (Kapitel 5.6) ist auf ~80 USD/kg gesunken .
  - **Leistungsoptimierung :** Dotierung (N, Si, Kapitel 3.4 ) verbessert die Leistung um ~20 %.
- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 wird die WB<sub>2</sub>-Beschichtung WC durch Si-Dotierung ersetzen (Kapitel 8.4) und ihr Marktanteil wird um ~10 % steigen.
- **Herausforderung :**
  - Alternativen werden schnell entwickelt (~5 Jahre/neues Material).
  - Kunden sind kostenbewusst (~30 % bevorzugen niedrige Preise).

**Tabelle 14.5 Vergleich von Wolframborid und seinen Ersatzstoffen**

Material	Kosten (USD/kg)	Leistung	Marktbedrohungen	Antwort	Verwandte Kapitel
WC	100	Härte 25 GPa	mechanisch	Doping	13,6, 8,4
CNT	50	Leitfähigkeit 10 <sup>-5</sup> S/cm	elektronisch	Skala	9,6, 5,6
Ni	30	Katalytische Effizienz 90 %	katalytisch	Leistung	10.6

#### 14.6 Zukünftige Trends und politische Auswirkungen der Industrialisierung von Wolframborid

Es wird erwartet, dass der Wolframborid-Markt in Zukunft durch technologische Fortschritte, Umweltpolitik und die globale Nachfrage vorangetrieben wird.

- **Zukünftige Trends (2025–2030) :**
  - **Marktwachstum :** Im Jahr 2030 wird der Markt ca. 350 Millionen US-Dollar groß sein, die Produktion ca. 3.500 Tonnen betragen und die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CAGR) bei ca. 10 % liegen.
  - **Kostensenkung :** Durch die Produktion im großen Maßstab (Kapitel 5.6) wurden die Kosten auf ~80 USD/kg gesenkt .
  - **Neue Anwendungen :** 6G-Antennen (Kapitel 9, 9.6), Festkörperbatterien (Kapitel 12, 12.6) und neuronale Schnittstellen (Kapitel 11, 11.6) mit einem Anteil von ca. 15 %.
  - **Grüne Produktion :** Abgasrückgewinnungsrate > 95 % (Kapitel 16.3), Kohlenstoffemissionen ~0,2 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Auswirkungen auf die Politik :**
  - **EU :** REACH (Kapitel XV, 15.2) und CBAM (2026) erfordern eine kohlenstoffarme Produktion, was die Kosten um etwa 10 % erhöht.
  - **China :** Kohlenstoffneutralität (2060) fördert grüne Technologien, Subventionen von ~5.000 USD/Tonne.
  - **Vereinigte Staaten :** Das Inflation Reduction Act (2022) unterstützt neue Energiematerialien mit einer Investition von ca. 100 Millionen US-Dollar.
- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 wird China eine Politik der Kohlenstoffneutralität einführen und der Anteil der grünen Produktion von Wolframborid (Kapitel 16.3) wird um ~20 % steigen.
- **Herausforderung :**
  - Die Einhaltung der Richtlinien ist hoch (~100 USD/Tonne).
  - Globale Handelsbarrieren (Zölle ~5 %) beeinträchtigen die Exporte.

**Tabelle 14.6 Zukünftige Trends des Wolframborid-Marktes**

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziele für 2030	Treiber	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Marktgröße (Milliarden US-Dollar)</b>	2.0	3.5	Neue Anwendungen	Polizienkosten	9,6–13,6
<b>Kosten (USD/kg)</b>	100–400	80	Skala	Handelshemmnisse	5.6, 14.2
<b>Kohlenstoffemissionen (Tonnen CO<sub>2</sub> / Tonne)</b>	0,3	0,2	Grüne Politik	investieren	16.3, 15.2

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

### 1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

### 2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10<sup>4</sup> S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

### 3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

### 4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

### 5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 15 Normen und behördliche Anforderungen für Wolframborid

Wolframborid (WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) wird häufig in der Elektronik (Kapitel 9), Katalyse (Kapitel 10), Biomedizin (Kapitel 11), Energie (Kapitel 12) und im Maschinenbau (Kapitel 13) eingesetzt. Es muss internationale und regionale Standards (wie GB/T 26037-2020, ISO 10993) und Vorschriften (wie REACH, CBAM) erfüllen, um Qualität, Sicherheit und Umweltverträglichkeit zu gewährleisten. Im Jahr 2024 betragen die weltweiten Kosten für die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften für Wolframborid etwa 100 USD/Tonne, was etwa 5 % der Produktionskosten entspricht (Kapitel 14, 14.2). In diesem Kapitel werden die internationalen Normen, Umwelt- und Sicherheitsvorschriften, biomedizinischen Vorschriften, Prüf- und Zertifizierungsverfahren, regionalen Unterschiede sowie die Herausforderungen und künftige Entwicklung der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften für Wolframborid erörtert und Leitlinien für dessen Industrialisierung (Kapitel 14, 14.3) und umweltfreundliche Herstellung (Kapitel 16, 16.4) bereitgestellt.

### 15.1 Übersicht über internationale Normen im Zusammenhang mit Wolframborid

Die internationalen Normen für Wolframborid decken hauptsächlich Materialeigenschaften, Prüfmethoden und Anwendungsanforderungen ab.

- **Hauptkriterien :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ISO 6506 (Brinellhärte)** : wird zum Testen der WB<sub>2</sub>-Härte (~40 GPa , Kapitel 6, 6.4) verwendet.
- **ASTM G99 (Reibung und Verschleiß)** : Bewertung der Verschleißrate von Beschichtungen (<math>10^{-6}</math> mm<sup>3</sup> / (N · m), Kapitel 7.4).
- **GB/T 26037-2020 (China)** : Gibt die **Reinheit (> 99,5 %)** und **Partikelgröße (< 50 μm)** , Kapitel 5, 5.5) von Wolframboridpulver an .
- **ISO 10993 (Biokompatibilität)** : Für biomedizinische Anwendungen (Kapitel 11, 11.4), Zelllebensfähigkeit > 90 %.
- **Anwendungsbereiche :**
  - **Mechanisch (Kapitel 13)** : ISO 6508 (Rockwellhärte), Härte > 38 GPa .
  - **Elektronik (Kapitel 9)** : IEC 62624 (Elektrische Leitfähigkeit von Nanomaterialien), ~10<sup>4</sup> S/cm.
  - **Katalyse (Kapitel 10)** : ASTM D3908 (katalytische Aktivität), Überspannung < 150 mV.
- **Beispiele :**
  - Ab 2024 müssen Chinas Exporte von WB<sub>2</sub>-Beschichtungen (Kapitel 13.1) der Norm GB/T 26037-2020 entsprechen. Die Prüfkosten betragen ca. 200 USD/Charge.
- **Herausforderung :**
  - Der Aktualisierungszyklus internationaler Standards ist lang (~5 Jahre) und hinkt der technologischen Entwicklung hinterher.
  - Inkompatibilitäten zwischen Standards (wie etwa ISO- und GB/T-Partikelgrößendefinitionen) erhöhen die Zertifizierungskosten.

**Tabelle 15.1 Internationale Normen im Zusammenhang mit Wolframborid**

Standard	Inhalt	Parameter	Anwendung	Herausforderung	Verwandte Kapitel
ISO 6506	Brinellhärte	~40 GPa	mechanisch	Langsame Updates	6.4, 13.1
ASTM G99	Verschleißrate	<math>10^{-6}</math> mm <sup>3</sup> /(N·m)	Beschichtung	kosten	7.4
GB/T 26037-2020	Reinheit >99,5 %	Partikelgröße < 50 μm	Produktion	Unvereinbar	5.5

## 15.2 Umwelt- und Sicherheitsvorschriften für Wolframborid

Die Herstellung und Verwendung von Wolframborid unterliegt Umwelt- und Sicherheitsvorschriften, um gesundheitliche und ökologische Risiken zu verringern.

- **Hauptbestimmungen :**
  - **EU REACH** : erfordert die Registrierung von WB<sub>2</sub>-Chemikalien (CAS nicht harmonisiert), Grenzwerte für Pulveremissionen (< 10 mg/m<sup>3</sup>).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **EU CBAM (2026)** : Auf importiertes Wolframborid wird eine Kohlenstoffsteuer erhoben, wobei die Kohlenstoffemissionen <0,3 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne betragen müssen (Kapitel 16.3).
- **Chinas „Vorschriften zum Sicherheitsmanagement gefährlicher Chemikalien“** : WB<sub>2</sub>-Pulver erfordert ein Sicherheitsdatenblatt (Kapitel 13, 13.6), um auf das Risiko des Einatmens hinzuweisen.
- **OSHA (USA)** : Der Staubgrenzwert am Arbeitsplatz liegt unter 5 mg/m<sup>3</sup> und es ist ein N95-Schutz erforderlich.
- **Umweltanforderungen** :
  - **Abgasbehandlung** : Rückgewinnungsrate des CVD-Nebenprodukts (HF) >95 % (Kapitel 16.3), Kosten ~50 USD/Tonne.
  - **Abwasser** : Wolframionen (<1 mg/l) müssen neutralisiert werden (pH 6–8).
  - **Abfall** : Als Sondermüll recycelt, Kosten ~100 USD/Tonne.
- **Sicherheitsanforderungen** :
  - **Sicherheitsdatenblatt** : WB<sub>2</sub>-Pulver reizt die Atemwege, Abzugshaube und Handschuhe (> 0,5 mm dick) werden empfohlen.
  - **Lagerung** : Versiegelt, trocken (<30 °C, relative Luftfeuchtigkeit <50 %), fern von Säure.
- **Beispiele** :
  - Ab 2024 ist für den Import von WB<sub>2</sub> nach Europa eine CBAM-Zertifizierung erforderlich, und die Kosten für die Einhaltung der Vorschriften steigen um ca. 10 % (ca. 30 USD/kg).
- **Herausforderung** :
  - Die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften verursacht zusätzliche Kosten von ca. 5 % (ca. 100 USD/Tonne).
  - Die Nanogröße von Pulvern (<50 nm) erhöht die Gesundheitsrisiken und erfordert neue Vorschriften.

**Tabelle 15.2 Umwelt- und Sicherheitsvorschriften für Wolframborid**

Vorschriften	Erfordern	Parameter	Kosten (USD/Tonne)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>ERREICHEN</b>	Staub <10 mg/m <sup>3</sup>	registrieren	100	kosten	16.3
<b>CBAM</b>	Kohlenstoffemissionen <0,3 Tonnen CO <sub>2</sub> / Tonne	Zertifizierung	50	Neue Regelungen	14.6
<b>Chinesische Vorschriften</b>	Sicherheitsdatenblatt	Aspirationsrisiko	100	Nanorisiken	13.6

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### 15.3 Regulatorische Anforderungen für Wolframborid im biomedizinischen Bereich

Wolframborid muss für biomedizinische Anwendungen strenge Biokompatibilitäts- und Sicherheitsvorschriften erfüllen.

- **Hauptbestimmungen :**
  - **ISO 10993 (Biokompatibilität) :** WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (Kapitel 11, 11.4) erfordern eine Zellebensfähigkeit von > 90 % und eine Hämolyserate von < 1 %.
  - **FDA (USA) :** Für medizinische Geräte der Klasse II (wie etwa Beschichtungen) ist eine 510(k)-Zertifizierung erforderlich, die etwa 6 Monate dauert.
  - **China NMPA :** Für biomedizinisches WB<sub>2</sub> ist eine Registrierung erforderlich, die Testkosten betragen ca. 50.000 USD/Produkt.
  - **EU- MDR :** WB<sub>2</sub>-Implantate erfordern eine klinische Bewertung mit einem Zeitraum von ca. 12 Monaten.
- **Prüfungsanforderungen :**
  - **Zytotoxizität :** MTT-Test (Kapitel 6.1), Konzentration <100 µg / mL.
  - **Blutverträglichkeit :** Hämolyserate <1 % , Thrombozytenadhäsion <5 % (Kapitel 11, 11.4).
  - **Langzeittoxizität :** Tierstudie (ISO 10993-6), Zeitraum > 6 Monate .
- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 bestanden WB<sub>2</sub>-beschichtete Implantate (Kapitel 11.1) die ISO 10993-Zertifizierung, die Zertifizierungskosten betragen ca. 100.000 USD.
- **Herausforderung :**
  - Der Stoffwechselweg von Nanopartikeln (<50 nm) ist unklar und bedarf weiterer Tests.
  - Der Zertifizierungsprozess ist langwierig (~1 Jahr) und kostspielig (~200.000 USD).

**Tabelle 15.3 Regulatorische Anforderungen für Wolframborid in der Biomedizin**

Vorschriften	Erfordern	Parameter	Kosten ( USD)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>ISO 10993</b>	Überlebensrate > 90 %	Hämolyse < 1 %	100.000	Stoffwechsel	11.4
<b>FDA 510(k)</b>	Biokompatibel	Zyklus 6 Monate	50.000	Zyklus	11.1
<b>MDR</b>	Klinische Bewertung	Zyklus 12 Monate	200.000	kosten	11.6

### 15.4 Prüf- und Zertifizierungsprozess von Wolframborid

Die Prüfung und Zertifizierung von Wolframborid gewährleistet die Qualität und Einhaltung gesetzlicher Vorschriften und umfasst einen mehrstufigen Prozess.

- **Testverfahren :**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **Chemische Analyse** : ICP-MS (Kapitel 6.1) zur Messung der Reinheit (>99,9 %), Kosten ~500 USD/Probe.
- **Physikalische Eigenschaften** : Durch Nanoindentation (Kapitel 6, 6.4) wird die Härte (~40 GPa) gemessen, und durch den Reibungstest (Kapitel 7, 7.4) wird die Verschleißrate gemessen.
- **Umweltprüfungen** : Gaschromatographie (Kapitel 16.3) zur Messung der HF-Emissionen (<1 ppm).
- **Biokompatibilität** : MTT- und Tierversuche (Kapitel 11.4), Zyklus ~3–12 Monate.
- **Zertifizierungsprozess** :
  - **ISO -Zertifizierung** : ISO 9001 (Qualitätsmanagement), Vorlaufzeit ~ 6 Monate, Kosten ~ 10.000 USD.
  - **Regionale Zertifizierung** : China CNAS, EU CE, US UL, Kosten ~20.000 USD/Zertifizierung.
  - **Drittagenturen** : SGS, TÜV, Prüfgebühr ~1000 USD/Charge.
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 haben WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (Kapitel 5.5) die CNAS-Zertifizierung bestanden, mit einer Testdauer von ca. 3 Monaten und Kosten von ca. 15.000 USD.
- **Herausforderung** :
  - Die Testgeräte sind teuer (ICP-MS ~500.000 USD).
  - Die länderübergreifende Zertifizierung wird verdoppelt und die Kosten erhöhen sich (~50.000 USD/Produkt).

**Tabelle 15.4 Wolframborid-Test- und Zertifizierungsprozess**

Projekt	Verfahren	Parameter	Kosten ( USD)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Chemische Analyse</b>	ICP-MS	Reinheit >99,9 %	500	Ausrüstung	6.1
<b>Physikalische Eigenschaften</b>	Nanoindentation	Härte ~40 GPa	1000	Zyklus	6.4, 7.4
<b>Zertifizierung</b>	ISO 9001	Zyklus 6 Monate	10.000	wiederholen	5.5

### 15.5 Analyse regionaler Unterschiede in der Wolframborid-Standardisierung

Die Standardisierung von Wolframborid variiert aufgrund regionaler Vorschriften und technischer Unterschiede.

- **Regionale Standards** :
  - **China** : GB/T 26037-2020, mit Schwerpunkt auf Reinheit und Partikelgröße, mit niedrigen Testkosten (~200 USD/Charge).
  - **EU** : EN ISO-Normen, Schwerpunkt auf Umweltschutz (REACH), hohe Zertifizierungskosten (~20.000 USD).
  - **Vereinigte Staaten** : ASTM-Standard, mit Schwerpunkt auf Leistungstests (Härte, Verschleiß), kurzer Zyklus (~3 Monate).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Japan** : JIS-Standard, mit Schwerpunkt auf hochpräzisen Anwendungen (Elektronik, Kapitel 9.6) mit hohen technischen Anforderungen.
- **Unterschiedliche Auswirkungen** :
  - **Kosten** : China < USA < EU (~200 vs. 1000 vs. 20.000 USD).
  - **Zeitraum** : Am kürzesten in den Vereinigten Staaten (~3 Monate) und am längsten in der Europäischen Union (~12 Monate).
  - **Technologie** : Japan und die EU haben höhere Anforderungen (Reinheit > 99,99 % gegenüber 99,5 %).
- **Beispiele** :
  - Ab 2024 ist für WB<sub>2</sub>-Exporte in die EU eine zusätzliche REACH-Zertifizierung erforderlich, wodurch die Kosten um ca. 15 % (ca. 50 USD/kg) steigen.
- **Herausforderung** :
  - Inkonsistente Standards erhöhen die Exportbarrieren (~5 % Zoll).
  - Die gegenseitige Anerkennung der regionalen Prüfstellen ist gering (<50 %).

**Tabelle 15.5 Regionale Unterschiede in der Standardisierung von Wolframborid**

Bereich	Standard	Kosten ( USD)	Zyklus (Monate )	Herausforderung	Verwandte Kapitel
China	GB/T 26037	200	3	Gegenseitige Anerkennung	5.5
europäische Union	EN ISO	20.000	12	kosten	16.3
USA	ASTM	1000	3	Barriere	7.4

### Herausforderungen und zukünftige Entwicklung der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften für Wolframborid

Die Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften für Wolframborid ist mit technischen, finanziellen und politischen Herausforderungen verbunden und muss an zukünftige Trends angepasst werden.

- **Herausforderung** :
  - **Kosten** : Die Kosten für die Einhaltung der Vorschriften betragen ca. 100 USD/Tonne, was für kleine und mittelgroße Hersteller eine schwere Belastung darstellt (ca. 10 % Gewinn).
  - **Technologie** : Nano WB<sub>2</sub> (<50 nm, Kapitel 5.5) erfordert neue Sicherheitsbewertung, Testgebühr ~50.000 USD.
  - **Politik** : CBAM (2026, Kapitel 14, 14.6) Erhöhung der Kohlenstoffsteuer, was sich um ca. 5 % auf die Exporte auswirkt.
- **Zukünftige Entwicklung (2025–2030)** :
  - **Einheitliche Standards** : ISO und GB/T werden koordiniert, um die Zertifizierungskosten um ca. 20 % (ca. 800 USD/Charge) zu senken.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Umweltfreundliche Einhaltung** : Die Kohlenstoffemissionen werden auf ~0,2 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert (Kapitel 16.3) und die Einhaltungsrate liegt bei >95 %.
- **Digitale Authentifizierung** : Blockchain-Rückverfolgbarkeit (Kapitel 17, 17.5) verkürzt den Zyklus um ~30 % (~2 Monate).
- **Biomedizin** : Die Nano-Vorschriften werden verbessert und der Zertifizierungszyklus auf ca. 6 Monate verkürzt.
- **Beispiele** :
  - Bis 2024 werden chinesische Hersteller ihre Compliance-Prozesse durch KI optimieren (Kapitel 17, 17.5) und so die Kosten um ca. 10 % (ca. 90 USD/Tonne) senken.
- **Strategie** :
  - Investieren Sie in grüne Technologie (Rückgewinnungsrate > 95 %).
  - Arbeiten Sie mit Drittagenturen zusammen, um die Zertifizierungsgebühren um ca. 15 % zu senken.

**Tabelle 15.6 Herausforderungen und Trends bei der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften für Wolframborid**

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziel für 2030	Herausforderung	Strategie	Verwandte Kapitel
<b>Kosten der Einhaltung der Vorschriften (USD/Tonne)</b>	100	80	Hohe Kosten	Grüne Technologie	16.3
<b>Zertifizierungszeitraum (Monate)</b>	3–12	2–6	Langer Zyklus	Digitalisierung	17,5
<b>Kohlenstoffemissionen (Tonnen CO<sub>2</sub> / Tonne)</b>	0,3	0,2	Kohlenstoffsteuer	Recyceln	14.6

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Kapitel 16 Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung von Wolframborid

Wolframborid (wie WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) in der Elektronik (Kapitel 9), Katalyse (Kapitel 10), Biomedizin (Kapitel 11), Energie (Kapitel 12) und im Maschinenbau (Kapitel 13) hat die Nachfrage nach Hochleistungsmaterialien angetrieben, doch sein Produktionsprozess ist mit einem hohen Energieverbrauch (~500 kWh/Tonne, Kapitel 14, 14.2) verbunden und verursacht Nebenprodukte (wie HF, Kapitel 15, 15.2), was eine Herausforderung für die Umwelt darstellt. Im Jahr 2024 beträgt der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Wolframborid-Produktion etwa 0,3 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne, und umweltfreundliche Herstellungs- und Recyclingtechnologien können die Emissionen um ~30 % reduzieren. In diesem Kapitel werden die Umweltauswirkungen der Wolframboridproduktion, umweltfreundliche Fertigungstechnologien, Abfallbehandlung und Recycling, der Beitrag zu nachhaltiger Energie, der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Strategien zur Emissionsreduzierung sowie politische und markttreibende Faktoren erörtert, um die Industrialisierung (Kapitel 14, 14.3) und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften (Kapitel 15) umweltschonend zu unterstützen.

### 16.1 Umweltverträglichkeitsprüfung der Wolframboridproduktion

Die Umweltauswirkungen der Wolframboridproduktion entstehen hauptsächlich durch Energieverbrauch, Abgas und Abwasser, die durch eine Lebenszyklusanalyse (LCA) quantifiziert werden müssen.

- **Einflussquelle :**
  - **Energieverbrauch** : CVD (Kapitel 5.2) verbraucht ~500 kWh/Tonne , Heißpressintern (Kapitel 5.1) verbraucht ~600 kWh/Tonne.
  - **Abgas** : CVD erzeugt HF (<1 ppm, Kapitel 15.2 ), Treibhausgasemissionen ~0,3 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Abwasser** : Bei der Sol-Gel-Methode (Kapitel 5.5) entsteht Abwasser mit Wolframionen (<1 mg/L), das neutralisiert werden muss.
- **Fester Abfall** : Sinterrückstände (~50 kg/Tonne) enthalten Wolfram und müssen recycelt werden.
- **Ökobilanz-Ergebnisse (2024)** :
  - Pro Tonne produziertem WB<sub>2</sub>: Kohlenstoffemissionen ~ 0,3 Tonnen CO<sub>2</sub> , Wasserverbrauch ~1 m<sup>3</sup>, Feststoffabfall ~50 kg.
  - Umweltbelastung: Energieanteil ca. 60 %, Abgas ca. 30 %, Abwasser ca. 10 %.
- **Bewertungsmethodik** :
  - **ISO 14040 (LCA)** : Quantifizieren Sie die Umweltauswirkungen von Rohstoffen auf Produkte.
  - **XPS (Kapitel 6.1)** : Analyse des HF-Gehalts im Abgas (<1 ppm).
  - **ICP-MS (Kapitel 6.1)** : Nachweis von Wolframionen in Abwasser (<1 mg/L).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 zeigte die Ökobilanz der chinesischen WB<sub>2</sub>-Fabriken, dass der Energieverbrauch etwa 65 % der Kohlenstoffemissionen ausmachte , die nach einer Optimierung um etwa 15 % (~0,26 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne) gesenkt werden könnten.
- **Herausforderung** :
  - Die Erfassung von LCA-Daten ist komplex und kostet ca. 10.000 USD pro Bewertung.
  - von Nano-WB<sub>2</sub> (<50 nm).

**Tabelle 16.1 Umweltauswirkungen der Wolframboridproduktion**

Quelle	Parameter	Anteil (%)	Verfahren	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Energieverbrauch</b>	500–600 kWh/Tonne	60	ISO 14040	kosten	5.1, 5.2
<b>Auspuff</b>	HF < 1 ppm	30	XPS	Standard	15.2, 6.1
<b>Abwasser</b>	Wolfram <1 mg/L	10	ICP-MS	Komplex	5.5

## 16.2 Grüne Fertigungstechnologie von Wolframborid

Grüne Fertigungstechnologie reduziert die Umweltauswirkungen der Wolframborid-Produktion durch Optimierung der Prozesse und der Energienutzung.

- **Technologietyp** :
  - **Prozess mit geringem Energieverbrauch** :
    - **Sol-Gel-Verfahren (Kapitel 5.5)** : Kalzinierung bei 500°C, Energieverbrauch ~300 kWh/Tonne, eine Einsparung von ~40% (im Vergleich zum Sintern).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mikrowellenunterstützte CVD** : Abscheidung bei 400 °C, Effizienzsteigerung um ~20 %, Energieverbrauch ~400 kWh/Tonne.
- **Abgasrückgewinnung** :
  - **HF- Neutralisierung** : Ca( OH) <sub>2</sub>-Absorption (Rückgewinnungsrate > 95 %, Kapitel 15, 15.2), Kosten ~50 USD/Tonne.
  - **CO<sub>2</sub>- Abscheidung: Absorption auf Aminbasis** , Abscheidungsrate ~80 %, Kosten ~100 USD/Tonne.
- **Erneuerbare Energien** :
  - Solarstromversorgung (~50 % des Fabrikstroms), CO<sub>2</sub>-Emissionen um ~25 % reduziert (~0,23 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne).
  - Integration von Windenergie, Kosten ~0,05 USD/kWh.
- **Optimierungsfall** :
  - Im Jahr 2024 wird CTIA GROUP LTD die Mikrowellen-CVD (Kapitel 17.5) einführen, wodurch der Energieverbrauch um ca. 15 % (ca. 425 kWh/Tonne) und die HF-Emissionen auf < 0,5 ppm gesenkt werden.
- **Vorteile** :
  - Die Kohlenstoffemissionen sanken um ~30 % (~0,2 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne).
  - Die Produktionskosten sanken um ~10 % (~90 USD/kg, Nanopartikel).
- **Herausforderung** :
  - Die Investitionen in umweltfreundliche Ausrüstung sind hoch (ca. 10 Millionen USD/Anlage).
  - Erneuerbare Energien weisen eine geringe Stabilität auf (~20 % Schwankung).

**Tabelle 16.2 Grüne Herstellungstechnologie von Wolframborid**

Technologie	Parameter	Reduzierung (%)	Kosten (USD)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Mikrowellen-CVD	400 kWh/Tonne	15	50/Tonne	investieren	5.2, 17.5
HF-Wiederherstellung	>95 %	30	50/Tonne	Stabilität	15.2
Solar	CO <sub>2</sub> -Emissionen um 25 % reduziert	25	0,05/kWh	Fluktuation	16,5

### 16.3 Behandlung und Recycling von Wolframborid-Abfällen

Abfallbehandlung und Recycling von Wolframborid sind wichtige Bestandteile einer nachhaltigen Entwicklung.

- **Abfallart** :

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **Abgas : HF** (<1 ppm, CVD-Nebenprodukt), muss neutralisiert werden.
- **Abwasser** : Wolframionen (<1 mg/l), die eine Niederschlagsbehandlung erfordern.
- **Fester Abfall** : Sinterrückstände (~50 kg/Tonne), enthalten ~80 % Wolfram.
- **Verarbeitungstechnologie** :
  - **HF- Neutralisierung** :  $\text{Ca(OH)}_2$  erzeugt  $\text{CaF}_2$ , mit einer Rückgewinnungsrate von >95 % und Kosten von ~50 USD/Tonne.
  - **Abwasserbehandlung** : Chemische Fällung (NaOH), Wolfram - Rückgewinnungsrate ~90 %, Kosten ~20 USD/m<sup>3</sup>.
  - **Recycling von Feststoffabfällen** : Säurelaugung (HCl, 1 M) zur Extraktion von Wolfram, Rückgewinnungsrate ~85 %, Kosten ~100 USD/Tonne.
- **Recycling** :
  - Das Recycling von Wolfram für die  $\text{WB}_2$ -Resynthese (Kapitel 5.5) reduziert die Kosten um ~20 % (~80 USD/kg).
  - $\text{CaF}_2$  als Baumaterial, Wertschöpfung ~10 USD/Tonne.
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 werden chinesische Fabriken Sinterrückstände recyceln, mit einer Wolfram-Rückgewinnungsrate von ~88 % und einer Kostensenkung von ~15 % (~85 USD/kg).
- **Herausforderung** :
  - Die Rückgewinnungsraten für Nanopartikelabfälle sind gering (<50 %).
  - Hohe Wartungskosten für die Verarbeitungsausrüstung (~200.000 USD/Jahr).

**Tabelle 16.3 Behandlung und Recycling von Wolframborid-Abfällen**

Abfall	Verarbeitungstechnologie	Rückgewinnungsrate (%)	Kosten (USD)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
HF	$\text{Ca(OH)}_2$ -Neutralisation	>95	50/Tonne	Ausrüstung	15.2
Abwasser	Chemische Fällung	90	20/m <sup>3</sup>	Nanometer	5.5
Feste Abfälle	Säurelaugung	85	100/Tonne	kosten	5.1

### 16.4 Beitrag von Wolframborid zur nachhaltigen Energie

Die Anwendung von Wolframborid im Bereich der nachhaltigen Energie (Kapitel 12) unterstützt das Ziel der Kohlenstoffneutralität.

- **Anwendungsszenarien** :
  - **Batterien (Kapitel 12.1)** :  $\text{WB}_2$ -Additiv für negative Elektroden, Zykluslebensdauer ~1000 Mal, Energiedichte ~250 Wh /kg, Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen um ~20 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Brennstoffzelle (Kapitel 12.2)** : WB<sub>2</sub> -Katalysator, ORR-Überspannung ~200 mV, Wirkungsgrad ~60 %, Wasserstoffenergienutzung um ~15 % erhöht.
- **Wasserstoffspeicherung (Kapitel 12.4)** : WB<sub>2</sub> katalysiert NaBH<sub>4</sub> zur Wasserstoffproduktion mit einer Rate von ~ 1000 mL / ( g · min ) und unterstützt so die Wasserstoffwirtschaft.
- **Solarenergie (Kapitel 12.3)** : WB<sub>2</sub>-Elektrode, Wirkungsgrad ~18 %, Anteil erneuerbarer Energien um ~10 % erhöht.
- **Umweltvorteile** :
  - Jede Tonne WB<sub>2</sub>-Katalysator, die in Brennstoffzellen verwendet wird, reduziert die Emissionen um ~0,5 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.
  - WB<sub>2</sub>-Batteriematerialien reduzieren den Ladeenergieverbrauch um ~15 % (~0,1 kWh/kg).
- **Beispiele** :
  - Bis 2024 werden WB<sub>2</sub>-Brennstoffzellenkatalysatoren (Kapitel 12.2) die Emissionen in Chinas Wasserstoffenergieprojekten um ~0,6 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne Katalysator reduzieren .
- **Herausforderung** :
  - Die Vorteile werden teilweise durch die Kohlenstoffemissionen bei der Herstellung von WB<sub>2</sub> (~0,3 Tonnen CO<sub>2</sub>/ Tonne ) ausgeglichen.
  - Die Kosten (~200 USD/kg) schränken eine groß angelegte Werbung ein.

**Tabelle 16.4 Beitrag von Wolframborid zur nachhaltigen Energie**

Anwendung	Parameter	Emissionsreduzierung (Tonnen CO <sub>2</sub> / Jahr)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Batterie	250 Wh /kg	0,2	kosten	12.1
Brennstoffzellen	Effizienz 60%	0,5	Kohlenstoffemissionen	12.2
Wasserstoffspeicherung	1000 ml / ( g · min )	0,3	Förderung	12.4

### 16.5 Strategien zur CO<sub>2</sub>-Bilanz und Emissionsreduzierung von Wolframborid

Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Wolframboridproduktion muss durch technische und Managementstrategien reduziert werden.

- **CO<sub>2</sub>-Bilanz (2024)** :
  - Pro Tonne WB<sub>2</sub> : ~0,3 Tonnen CO<sub>2</sub> (Energie ~60 %, Rohstoffe ~30 %, Transport ~10 %).
  - Nanopartikel (Kapitel 5.5): ~0,35 Tonnen CO<sub>2</sub> / Tonne (hoher Energieverbrauch).
  - Dünne Filme (Kapitel 5.2): ~0,4 Tonnen CO<sub>2</sub> / Tonne (CVD-Anlage).
- **Strategien zur Emissionsreduzierung** :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Energieoptimierung** : Erneuerbare Energien (Solar, ~50 %), ~25 % Reduzierung (~0,23 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne) .
- **Prozessverbesserung** : Mikrowellen-CVD (Kapitel 5.2 ) reduziert den Energieverbrauch um ~20 % (~400 kWh/Tonne).
- **Rohstoffsubstitution** : Durch das Recycling von Wolfram (Kapitel 16.3) werden die Kohlenstoffemissionen der Rohstoffe um ca. 30 % reduziert .
- **Transport** : Lokale Lieferketten (<500 km), ~10 % Reduzierung (~0,03 tCO<sub>2</sub> /Tonne).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 wurde die japanische Fabrik mit Solarenergie betrieben und der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von WB<sub>2</sub> wurde um ~20 % (~0,24 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne) reduziert.
- **Herausforderung** :
  - Die Investitionen in Technologien zur Emissionsreduzierung sind hoch (ca. 5 Millionen US-Dollar/Anlage).
  - Die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung in globalen Lieferketten erfolgt nicht einheitlich (Fehler ~20 %).

**Tabelle 16.5 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Emissionsreduzierung von Wolframborid**

Projekt	CO <sub>2</sub> -Fußabdruck (Tonnen CO <sub>2</sub> / Tonne)	Emissionsreduzierung (%)	Strategie	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Nanopartikel	0,35	20	Solar	investieren	5,5, 16,3
Film	0,4	25	Mikrowellen-CVD	Buchhaltung	5.2
gesamt	0,3	30	Recyclen	vereinheitlicht	16.4

## 16.6 Politische und marktbezogene Treiber für eine nachhaltige Entwicklung von Wolframborid

Richtlinien und Märkte sind die wichtigsten treibenden Kräfte für die nachhaltige Entwicklung von Wolframborid.

- **Politische Treiber** :

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **China** : Kohlenstoffneutralität (2060) subventioniert die umweltfreundliche Produktion (~5.000 USD/Tonne) und erfordert Kohlenstoffemissionen von < 0,3 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne (Kapitel 15, 15.2).
- **EU** : CBAM (2026, Kapitel XIV, 14.6) führt eine Kohlenstoffsteuer (~50 USD/Tonne) ein, um die Recyclingraten auf über 95 % zu steigern.
- **Vereinigte Staaten** : Inflation Reduction Act (2022) unterstützt nachhaltige Materialien, Investitionen von ca. 100 Millionen US-Dollar.
- **Markttreiber** :
  - **Nachfrage** : Der Markt für grüne Materialien wird jährlich um ca. 12 % wachsen und bis 2030 werden grüne Wolframboridprodukte ca. 50 % ausmachen (Kapitel 14, 14.6).
  - **Preis** : Green WB<sub>2</sub> Premium ~10 % (~220 USD/kg, Nanopartikel).
  - **Zertifizierung** : Die ISO 14001-Zertifizierung verbessert die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt und kostet ca. 10.000 USD.
- **Zukünftige Trends (2025–2030)** :
  - Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck wurde auf ~0,2 t CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert, mit einer Einhaltungsrate von >95 %.
  - Recyclingrate >90 %, Kostensenkung ~20 % (~80 USD/kg).
  - Durch die grüne Zertifizierung (Blockchain, Kapitel 17, 17.5) wird der Zyklus um ~30 % (~2 Monate) verkürzt.
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 bestand die Fabrik von EU WB<sub>2</sub> die ISO 14001-Zertifizierung und ihr Marktanteil stieg um ~10 %.
- **Herausforderung** :
  - Die Einhaltung der Richtlinien ist hoch (~100 USD/Tonne).
  - Kleine und mittlere Hersteller sind bei der Umstellung auf grüne Technologien langsam (~5 Jahre).

**Tabelle 16.6 Treiber und Trends der nachhaltigen Entwicklung von Wolframborid**

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziele für 2030	fahrend	Herausforderung	Verwandte Kapitel
CO <sub>2</sub> -Fußabdruck (Tonnen CO <sub>2</sub> / Tonne)	0,3	0,2	Politik	kosten	15.2, 14.6
Rückgewinnungsrate (%)	85	>90	Markt	Konvertierung	16.3

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Zertifizierungszeitraum (Monate)	6	2	Technologie	Kleine und mittlere Hersteller	17,5
----------------------------------	---	---	-------------	--------------------------------	------



## Kapitel 17 Intelligente und digitale Technologieanwendung von Wolframborid

Wolframborid (wie WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) wird aufgrund seiner hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften (Härte ~40 GPa, Kapitel 2 2,5; Leitfähigkeit ~ 10<sup>4</sup>S/cm, Kapitel 6 6,5; chemische Stabilität, Kapitel 7 7,5) häufig in der Elektronik (Kapitel 9), Katalyse (Kapitel 10), Biomedizin (Kapitel 11), Energie (Kapitel 12) und im Maschinenbau (Kapitel 13) verwendet. Intelligente und digitale Technologien (wie KI, IoT, Blockchain) können die Effizienz der Wolframborid-Industrie um ~20 % steigern und die Kosten um ~15 % (~85 USD/kg, 2024) senken, indem sie die Produktion (Kapitel 5), die Qualitätskontrolle (Kapitel 6) und die Lieferkette (Kapitel 14 14.3) optimieren. In diesem Kapitel werden KI-Optimierung, intelligente Sensoranwendungen, digitale Qualitätskontrolle, das Potenzial der Blockchain-Rückverfolgbarkeit, Fälle intelligenter Fertigung und zukünftige Trends in der Wolframborid-Produktion erörtert und technische Unterstützung für deren Industrialisierung (Kapitel 14 14.3) und grüne Entwicklung (Kapitel 16 16.6) bereitgestellt.

### 17.1 Künstliche Intelligenz-Optimierung in der Wolframborid-Produktion

Künstliche Intelligenz (KI) verbessert die Effizienz der Wolframborid-Produktion durch Optimierung der Prozessparameter und Leistungsvorhersage.

- **Anwendungsszenarien :**

- **CVD-Optimierung (Kapitel 5.2) :** Durch AI wurde die WF<sub>6</sub>/B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>-Flussrate angepasst (Fehler <1 %), die Abscheidungsrate erhöhte sich um ~15 % (~1,4 μm /h) und die Gleichmäßigkeit lag bei >95 %.
- **Sol-Gel (Kapitel 5.5) :** Maschinelles Lernen sagt die Partikelgröße voraus (<50 nm) und die Ausbeute steigt um ~20 % (~550 kg/Charge).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Sintern (Kapitel 5.1)** : Temperatur ( $2000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ ) und Druck ( $30\text{ MPa}$ ) wurden durch ein neuronales Netzwerk optimiert, die Dichte wurde um  $\sim 0,5\%$  ( $>99\%$ ) erhöht.
- **KI-Technologie** :
  - **Überwachtes Lernen: Vorhersage** der  $\text{WB}_2$ -Reinheit ( $>99,9\%$ ) anhand historischer Daten (Kapitel 6.1).
  - **Reinforcement Learning** : Die Echtzeitanpassung des CVD-Gasflusses reduziert die HF-Emissionen um  $\sim 10\%$  ( $<0,9\text{ ppm}$ , Kapitel 16.3).
  - **Digitaler Zwilling** : Simulieren Sie die Produktion und reduzieren Sie die Versuchskosten um ca.  $30\%$  (ca.  $5.000\text{ USD/Zeit}$ ).
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 wird KI den CVD-Prozess optimieren (Kapitel 12.5) und den Energieverbrauch um  $\sim 15\%$  ( $\sim 425\text{ kWh/Tonne}$ ) senken.
- **Herausforderung** :
  - Das Training eines KI-Modells erfordert große Datenmengen ( $>10^4$  Stichproben) und kostet ca.  $100.000\text{ USD}$ .
  - Für Echtzeit-Computing sind leistungsstarke GPUs erforderlich ( $\sim 50.000\text{ USD/GPU}$ ).

**Tabelle 17.1 AI-Optimierungsparameter für die Wolframboridproduktion**

Technologie	KI-Technologie	fördern( %)	Kosten ( USD)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Herz-Kreislauf-Erkrankungen</b>	Bestärkendes Lernen	15	100.000	Daten	5.2, 16.3
<b>Sol-Gel</b>	Überwachtes Lernen	20	50.000	berechnen	5.5
<b>Sintern</b>	Digitaler Zwilling	0,5	5000	Hardware	5.1

## 17.2 Anwendung von Wolframborid in intelligenten Sensoren

Wolframborid eignet sich aufgrund seiner hohen Leitfähigkeit und Stabilität für intelligente Sensoren und unterstützt IoT und Industrie 4.0.

- **Anwendungsszenarien** :
  - **Drucksensor (Kapitel 9.2)** :  $\text{WB}_2$ -Film (Dicke  $\sim 100\text{ nm}$ , Kapitel 5.2), Empfindlichkeit  $\sim 10\text{ mV/MPa}$ , Reaktionszeit  $<1\text{ ms}$ .
  - **Gassensoren (Kapitel 10.3)** :  $\text{WB}_2$ -Nanopartikel ( $<50\text{ nm}$ ), Detektion von  $\text{H}_2$  ( $<100\text{ ppm}$ ), Selektivität  $>90\%$ .
  - **Biosensor (Kapitel 11.3)** :  $\text{WB}_2$ -Elektrode (Oberfläche  $\sim 60\text{ m}^2/\text{g}$ ), Erkennung von Glukose ( $<1\text{ mM}$ ), Linearität  $>95\%$ .
- **Technische Anforderungen** :
  - **Leitfähigkeit** :  $>10^4\text{ S/cm}$  (Kapitel 6.5).
  - **Stabilität** :  $>5000$  Stunden (Kapitel 7.5).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Empfindlichkeit** : >5 mV/Einheit (Kapitel 9.2).
- **Intelligente Funktionen** :
  - **Datenerfassung** : In IoT integrierte Sensoren, Übertragungsrate ~1 Mbit/s .
  - **KI- Analyse** : Edge Computing verarbeitet Signale mit einer Falschalarmrate von <1 %.
  - **Selbstkalibrierung** : KI passt die Basislinie an und verbessert die Genauigkeit um ca. 10 % .
- **Beispiele** :
  - Im Jahr 2024 werden WB<sub>2</sub>-Gassensoren zur Überwachung der Wasserstoffenergie eingesetzt (Kapitel 12.4) und die Erkennungseffizienz wird um ~15 % steigen.
- **Herausforderung** :
  - Die Agglomeration von Nanopartikeln (Kapitel 5.3) verringert die Empfindlichkeit und erfordert eine Oberflächenmodifizierung (PVP, <0,1 Gew. %).
  - Die Kosten für die Miniaturisierung des Sensors sind hoch (~500 USD/Einheit).

**Tabelle 17.2 Anwendung des intelligenten Wolframboridsensors**

Typ	Parameter	Leistungsverbesserung (%)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Druck</b>	10 mV/MPa	10	Wiedervereinigung	9.2, 5.2
<b>Gas</b>	H <sub>2</sub> <100 ppm	15	kosten	10.3, 12.4
<b>Biologie</b>	Glukose <1 mM	10	Miniaturisierung	11.3

### 17.3 Digitale Qualitätskontrolltechnologie von Wolframborid

Die digitale Technologie verbessert die Qualitätskontrolle von Wolframborid durch Echtzeitüberwachung und Datenanalyse.

- **Technologietyp** :
  - **Online- Überwachung** : XPS (Kapitel 6.1) Echtzeiterkennung der WB<sub>2</sub>-Reinheit (>99,9 %) mit einem Fehler von <0,1 %.
  - **Bildanalyse** : KI verarbeitet SEM-Bilder (Kapitel 6.2 ) und identifiziert Körner (<20 nm) mit einer Genauigkeitsrate von >95 %.
  - **Blockchain -Aufzeichnungen** : Hochwertige Daten sind in der Kette, manipulationssicher und die Abfrageeffizienz beträgt ~1 Sekunde.
- **Anwendungsszenarien** :
  - **CVD (Kapitel 5.2)** : Filmdicke überwachen (~2 μ m ) , Gleichmäßigkeit >95 %.
  - **Sintern (Kapitel 5.1)** : Dichte (>99%) und Porosität <1% prüfen.
  - **Nanopartikel (Kapitel 5.5)** : Kontrollierte Partikelgrößenverteilung (<10 nm), Konsistenz >90 %.
- **Vorteile** :
  - Die Erkennungseffizienz wurde um ca. 30 % erhöht (ca. 100 Proben/Stunde).
  - Die Ausfallrate sank um ~50 % (<0,5 %).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 nutzen chinesische Fabriken KI-basierte Bildanalysen (Kapitel 6.2), wodurch die Kosten für die Qualitätsprüfung um ca. 20 % (ca. 400 USD/Charge) gesenkt werden.
- **Herausforderung :**
  - Hohe Ausrüstungsinvestition (XPS ~ 500.000 USD).
  - Datensicherheit erfordert Verschlüsselung (Kosten ~10.000 USD/Jahr).

**Tabelle 17.3 Digitale Qualitätskontrolle von Wolframborid**

Technologie	Parameter	fördern( %)	Kosten ( USD)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
XPS	Reinheit >99,9 %	30	500.000	investieren	6.1, 5.2
Bildanalyse	Körnung <20 nm	20	10.000	Sicherheit	6.2, 5.5
Blockchain	Abfrage ~1 s	50	5000	Verschlüsselung	14.3

#### 17.4 Potenzial von Wolframborid in der Blockchain-Rückverfolgbarkeit

Die Blockchain-Technologie sorgt für Transparenz und Rückverfolgbarkeit in der Wolframborid-Lieferkette.

- **Anwendungsszenarien :**
  - **Rückverfolgbarkeit der Rohstoffe :** Erfassung der Quelle von Wolframpulver und Borsäure (Kapitel 14, 14.2), Transparenz > 99 %.
  - **Produktionsaufzeichnungen :** CVD-Prozessparameter (Kapitel 5.2) werden mit einer Verifizierungsrate von >95 % in die Kette hochgeladen .
  - **Produktzertifizierung :** WB<sub>2</sub>-Qualitätsdaten (Kapitel 6, 6.1) werden gemäß GB/T 26037-2020 (Kapitel 15, 15.1) gespeichert .
- **Technische Merkmale :**
  - **Dezentralisierung :** Multi-Node-Speicher, Manipulationskosten > 10<sup>6</sup> USD.
  - **Intelligente Verträge :** Automatische Überprüfung der Reinheit (> 99,9 %), Effizienzsteigerung um ~30 %.
  - **Verschlüsselung :** SHA-256-Algorithmus, Datenleckrate <0,01 %.
- **Vorteile :**
  - Zertifizierungszyklus um ~30 % verkürzt (~2 Monate, Kapitel 15, 15.6).
  - Das Kundenvertrauen stieg um ~20 %.
- **Beispiele :**
  - Im Jahr 2024 wird die EU-WB<sub>2</sub>-Beschichtung (Kapitel 13.1) Blockchain zur Rückverfolgbarkeit verwenden, wodurch die Zertifizierungskosten um ~15 % (~17.000 USD) gesenkt werden.
- **Herausforderung :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Blockchain-Bereitstellung ist teuer (~100.000 USD/System).
- Die Daten-Upload-Geschwindigkeit ist langsam (~10 tx /s).

**Tabelle 17.4 Anwendung zur Rückverfolgbarkeit von Wolframborid-Blockchains**

Szenario	Parameter	fördern(%)	Kosten (USD)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>Rückverfolgbarkeit der Rohstoffe</b>	Transparenz >99 %	20	100.000	einsetzen	14.2
<b>Produktionsaufzeichnungen</b>	Verifizierungsrate >95 %	30	50.000	Geschwindigkeit	5.2, 15.1
<b>Zertifizierung</b>	Zeitraum ~ 2 Monate	15	17.000	kosten	13.1

### 17.5 Fallstudie zur intelligenten Herstellung von Wolframborid

Intelligente Fertigung kombiniert KI, IoT und digitale Technologien, um die Produktionseffizienz und -qualität von Wolframborid zu verbessern.

- **Fallbeschreibung :**
  - **Fabriken: Chinesische Fabriken produzieren** im Jahr 2024 WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (Kapitel 5.5).
  - **Technologie :**
    - **KI -Optimierung :** Maschinelles Lernen steuert die Partikelgröße (<50 nm) und erhöht die Ausbeute um ~20 % (~550 kg/Charge).
    - **IoT- Überwachung :** Der Sensor erfasst die Temperatur in Echtzeit (500 °C ± 5 °C) mit einer Daten-Upload-Rate von ~1 Mbit/s.
    - **Blockchain- Rückverfolgbarkeit :** Qualitätsdaten werden gemäß REACH (Kapitel 15, 15.2) in die Kette hochgeladen.
  - **Ergebnisse :**
    - Kostensenkung ~15 % (~85 USD/kg).
    - Die Kohlenstoffemissionen sanken um ~10 % (~0,27 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne, Kapitel 16.5).
    - Die Qualitätsausfallrate liegt bei <0,5 %.
- **Technischer Beitrag :**
  - **KI :** trägt zu ca. 50 % der Effizienzsteigerung bei.
  - **IoT :** macht ca. 30 % der Datenerfassung aus.
  - **Blockchain :** ~20 % Vertrauen.
- **Fallaufklärung :**
  - CTIA GROUP LTD hat seine Produktionseffizienz um ca. 25 % gesteigert und damit einen Maßstab für die Branche gesetzt.
- **Herausforderung :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Technologieintegration erfordert hohe Investitionen (ca. 20 Millionen US-Dollar).
- Die Kosten für die Weiterbildung der Arbeitnehmer betragen ca. 50.000 USD/Jahr.

**Tabelle 17.5 Intelligente Herstellungsfälle von Wolframborid**

Technologie	Parameter	fördern( %)	Kosten ( USD)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
<b>KI</b>	Ausbeute ~550 kg/Charge	20	100.000	investieren	5,5, 16,5
<b>IoT</b>	Daten ~1 Mbit/s	30	50.000	Ausbildung	15.2
<b>Blockchain</b>	Unqualifizierter Satz <0,5 %	20	100.000	Integration	15.1

### 17.6 Zukünftige Trends der Intelligensierung und Digitalisierung von Wolframborid

Die Intelligenz und Digitalisierung von Wolframborid wird die industrielle Modernisierung und nachhaltige Entwicklung fördern.

- **Zukünftige Trends (2025–2030) :**
  - **Verbreitung von KI :** 90 % der Fabriken nutzen KI-Optimierung, die Effizienz steigt um ca. 30 %, die Kosten sinken um ca. 20 % (ca. 80 USD/kg).
  - **6G- Sensor :** Der WB<sub>2</sub>-Sensor (Kapitel 9.6) hat eine Übertragungsrate von ~10 Gbit/s und wird in 6G-Netzwerken verwendet.
  - **Blockchain- Standardisierung :** Abdeckung der globalen Lieferkettenrückverfolgbarkeit >95 %, Zertifizierungszyklus ~1 Monat.
  - **Grüne, intelligente Fertigung :** Die Kohlenstoffemissionen werden auf ~0,2 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne reduziert (Kapitel 16.6) und die Recyclingrate liegt bei >90 %.
- **Treiber :**
  - **Richtlinie :** Chinas Industrie 4.0-Plan (Kapitel 15.2) Subvention ~10 Millionen USD/Fabrik.
  - **Markt :** Die Nachfrage nach intelligenten Materialien wächst um ~15 % pro Jahr (Kapitel 14, 14.6).
  - **Technologie :** Die Rechenleistung der KI stieg um ca. 50 % pro Jahr, die Kosten sanken um ca. 30 %.
- **Fallvorhersage :**
  - Bis 2030 werden intelligente WB<sub>2</sub>-Sensoren (Kapitel 12.2) etwa 20 % des Wasserstoffenergiemarktes ausmachen und die Effizienz um etwa 25 % steigern.
- **Herausforderung :**
  - Die Standardisierung der Technologie hinkt hinterher (~5 Jahre).
  - Cybersicherheitsrisiko (Angriffskosten < 10.000 \$).

**Tabelle 17.6 Intelligensierungs- und Digitalisierungstrends von Wolframborid**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Projekt	Aktueller Stand im Jahr 2024	Ziele für 2030	fahren	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Effizienzsteigerung (%)	20	30	Politik	Standardisierung	14.3, 15.2
Kosten (USD/kg)	85	80	Markt	Sicherheit	14.2, 16.6
Kohlenstoffemissionen (Tonnen CO <sub>2</sub> / Tonne)	0,3	0,2	Technologie	Risiko	16,5

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



## Kapitel 18 Zukünftige Forschungsrichtungen und Technologieausblick für Wolframborid

Wolframborid (wie WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) hat aufgrund seiner hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften (Härte ~40 GPa, Kapitel 2 2,5; Leitfähigkeit ~10<sup>4</sup>S/cm, Kapitel 6 6,5; thermische Stabilität >2000 °C, Kapitel 8 8,1) großes Potenzial in den Bereichen Elektronik (Kapitel 9), Katalyse (Kapitel 10), Biomedizin (Kapitel 11), Energie (Kapitel 12), Maschinenbau (Kapitel 13) und anderen Bereichen. Zukünftige Forschungen konzentrieren sich auf neue Synthesen (Kapitel 5), Anwendungen der nächsten Generation (Kapitel 9 bis 13), Intelligenz (Kapitel 17) und umweltfreundliche Fertigung (Kapitel 16). Es wird erwartet, dass der Markt im Jahr 2030 ein Volumen von 350 Millionen US-Dollar erreichen wird (Kapitel 14.6) und die Kohlenstoffemissionen auf ca. 0,2 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne sinken (Kapitel 16.6). Dieses Kapitel befasst sich mit neuen Synthesemethoden für Wolframborid, dem Potenzial für elektronische Geräte der nächsten Generation, bahnbrechenden Entwicklungen in den Bereichen Katalyse und Energie, biomedizinischen Innovationen, den Grenzen intelligenter und umweltfreundlicher Fertigung sowie der globalen Zusammenarbeit und technologischen Herausforderungen und gibt die Richtung für die Industrialisierung (Kapitel 14, 14.3) und nachhaltige Entwicklung (Kapitel 16) vor.

### 18.1 Erforschung einer neuen Synthesemethode für Wolframborid

Neuartige Synthesemethoden zielen darauf ab, die Kosten zu senken (<80 USD/kg), die Reinheit zu erhöhen (>99,99 %) und eine Kontrolle im Nanobereich (<10 nm) zu erreichen.

- **Forschungsrichtung :**
  - **Laserunterstützte Synthese :** Femtosekundenlaser (<100 fs) Dampfabcheidung von WB<sub>2</sub> mit einer Rate von ~2 μm/h und einer Reinheit von >99,99 % (Kapitel 5.2).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Elektrochemische Synthese** : Elektrolyse von Natriumborat und Natriumwolframat (<0,1 M) zur Herstellung von WB<sub>2</sub>-Nanopartikeln (<10 nm) mit einem Energieverbrauch von ~200 kWh/Tonne.
- **Biotemplate-Methode** : Protein-gesteuertes WB<sub>2</sub>-Kristallwachstum (Partikelgröße <5 nm), grün und ohne Nebenprodukte (Kapitel 16, 16.2).
- **Plasmaspritzen** : W+B-Plasma (>10.000 ° C) erzeugt WB<sub>2</sub>-Dünnschichten (Dicke ~50 nm) mit >98 % Gleichmäßigkeit.
- **Erwartete Ergebnisse** :
  - Kostensenkung ~30 % (~70 USD/kg, Nanopartikel).
  - Der Energieverbrauch wurde um ca. 40 % (ca. 300 kWh/Tonne) gesenkt.
  - Die Kohlenstoffemissionen sanken um ~20 % (~0,24 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne, Kapitel 16.5).
- **Fallvorhersage** :
  - Bis 2026 werden die Kosten für lasersynthetisierte WB<sub>2</sub>-Dünnschichten (Kapitel 9.1) um ~20 % (~240 USD/kg) sinken.
- **Herausforderung** :
  - Hohe Gerätekosten (Laser ca. 10 Millionen US-Dollar).
  - Die Kontrollstabilität im Nanometerbereich ist gering (Fehler ~10 %).

**Tabelle 18.1 Neues Syntheseverfahren für Wolframborid**

Verfahren	Parameter	Kostensenkung (%)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Lasersynthese	Reinheit >99,99 %	20	Gerätekosten	5.2, 9.1
Elektrochemie	Partikelgröße <10 nm	30	Stabilität	5,5, 16,2
Biologische Vorlage	Keine Nebenprodukte	40	Skala	16.2

## 18.2 Potenzial von Wolframborid in elektronischen Geräten der nächsten Generation

Wolframborid hat bahnbrechendes Potenzial in den Bereichen 6G, Quantencomputer und flexible Elektronik.

- **Forschungsrichtung** :
  - **6G-Antenne (Kapitel 9, 9.6)** : WB<sub>2</sub>-Film (Dicke ~50 nm, Kapitel 5, 5.2), Leitfähigkeit ~10<sup>5</sup> S/cm, Übertragungsrate ~10 Gbps.
  - **Quantencomputing** : WB<sub>2</sub>-supraleitende Elektrode (T<sub>c</sub>~10 K, Kapitel 3, 3.4), Quantenbit-Lebensdauer > 100 μs.
  - **Flexible Elektronik** : WB<sub>2</sub>-Nanodrähte (Durchmesser <20 nm) mit Biegedehnung <5 % für tragbare Geräte (Kapitel 9.4).
  - **Neuromorphes Computing** : WB<sub>2</sub>-Memristoren (Ein/Aus-Verhältnis ~10<sup>3</sup>) mit Stromverbrauch <1 pJ/Vorgang.
- **Erwartete Ergebnisse** :

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Geräteeffizienz wurde um ~30 % gesteigert (6G-Antennenbandbreite ~100 GHz).
- Reduzierung der Herstellungskosten um ~25 % (~200 USD/kg, Folie).
- Marktanteil ~10% (2030, Kapitel 14, 14.4).
- **Fallvorhersage :**
  - Im Jahr 2028 werden flexible WB<sub>2</sub>-Sensoren (Kapitel 9.2) in Smart Skin verwendet und der Markt wird ca. 20 Millionen US-Dollar erreichen.
- **Herausforderung :**
  - Die supraleitende T<sub>c</sub> muss erhöht werden (>20 K).
  - Schlechte Kompatibilität mit flexiblen Substraten (Fehlanpassung der thermischen Ausdehnung ~10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>, Kapitel 8, 8.3).

**Tabelle 18.2 Potenzial von Wolframborid in elektronischen Geräten der nächsten Generation**

Anwendung	Parameter	fördern(%)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
6G-Antenne	10 Gbit/s	30	T <sub>c</sub>	9,6, 3,4
Quantencomputing	Lebensdauer >10 <sup>0</sup> μs	20	Kompatibilität	9.1
Flexible Elektronik	Dehnung <5 %	25	Nichtübereinstimmung	9.4, 8.3

### 18.3 Durchbruchrichtungen der Wolframborid-Katalyse und Energietechnologie

Wolframborid wird die Entwicklung von Wasserstoffenergie und Festkörperbatterien in den Bereichen Katalyse und Energie fördern.

- **Forschungsrichtung :**
  - **Elektrokatalyse (Kapitel 10.1 ) :** WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (<10 nm), HER-Überspannung <50 mV, Stabilität >10.000 Stunden.
  - **Photokatalyse (Kapitel 10.2 ) :** WB<sub>2</sub> / TiO<sub>2</sub> -Komposit (spezifische Oberfläche ~80 m<sup>2</sup>/g), Wasserstoffproduktionseffizienz ~500 μmol / ( g · h ) .
  - **Festkörperbatterie (Kapitel 12.1 ) :** WB<sub>2</sub>-Festelektrolyt ( Ionenleitfähigkeit ~10<sup>-3</sup> S/cm), Zyklenlebensdauer >2000.
  - **Thermische Katalyse (Kapitel 10.5 ) :** WB<sub>2</sub> katalysiert die CO<sub>2</sub>-Umwandlung (Umwandlungsrate > 90 %) bei einer Temperatur < 400 °C.
- **Erwartete Ergebnisse :**
  - Die katalytische Effizienz wurde um ~40 % gesteigert (HER-Stromdichte ~100 mA/cm<sup>2</sup>).
  - Die Energiedichte der Batterie erreicht ~400 Wh /kg.
  - Die Kohlenstoffemissionen verringerten sich um ~ 0,5 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne Katalysator (Kapitel 16.4).
- **Fallvorhersage :**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- Im Jahr 2027 werden WB<sub>2</sub>-Elektrokatalysatoren (Kapitel 10.1) für grünen Wasserstoff einen Marktwert von ca. 30 Millionen US-Dollar erreichen.
- **Herausforderung :**
  - Durch die Agglomeration von Nanopartikeln (Kapitel 5.3) wird die Aktivität verringert.
  - Der Grenzflächenwiderstand des Festelektrolyten ist hoch (~100 Ω·cm<sup>2</sup>).

**Tabelle 18.3 Durchbrüche in der Wolframborid-Katalyse und Energietechnologie**

Anwendung	Parameter	fördern( %)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Elektrokatalyse	Überspannung <50 mV	40	Wiedervereinigung	10.1, 5.3
Photokatalyse	500 μmol / ( g · h )	30	kosten	10.2
Festkörperbatterie	400 Wh /kg	25	Widerstand	12.1

#### 18.4 Innovative Anwendungen von Wolframborid im biomedizinischen Bereich

Wolframborid verfügt über innovatives Potenzial in den Bereichen Präzisionsmedizin und intelligente Implantate.

- **Forschungsrichtung :**
  - **Arzneimittelverabreichung (Kapitel 11.2 ) :** WB<sub>2</sub>-Nanopartikel (<10 nm), Arzneimittelbeladungseffizienz ~50 %, Freisetzungzeit >48 Stunden.
  - **Photothermische Therapie (Kapitel 11.5 ) :** WB<sub>2</sub> absorbiert Nahinfrarot (808 nm) mit einer Umwandlungseffizienz von ~60 % und einer Tumorablationsrate von >90 %.
  - **Neuronale Schnittstelle :** WB<sub>2</sub>-Elektrode (Leitfähigkeit ~10<sup>4</sup> S/cm), Signalauflösung <10 μV , Implantatlebensdauer >5 Jahre.
  - **Antibakterielle Beschichtung (Kapitel 11.1 ) :** WB<sub>2</sub>-Film (Dicke ~50 nm), antibakterielle Rate >99,9% (Escherichia coli).
- **Erwartete Ergebnisse :**
  - Die Behandlungseffizienz wurde um ca. 30 % gesteigert (Genauigkeit der Arzneimittelverabreichung > 95 %).
  - Lebensdauer der Beschichtung > 10 Jahre (Verschleißrate < 10<sup>-7</sup> mm<sup>3</sup> / ( N · m)).
  - Marktanteil ~15% (2030, Kapitel 14, 14.4).
- **Fallvorhersage :**
  - Im Jahr 2029 werden WB<sub>2</sub>-Neuralschnittstellen (Kapitel 11.3) für Gehirn-Computer-Schnittstellen einen Marktwert von ca. 100 Millionen US-Dollar erreichen.
- **Herausforderung :**
  - Der Stoffwechselweg von Nanopartikeln ist unklar (Kapitel 15, 15.3).
  - Die langfristige Biokompatibilität (> 10 Jahre) muss nachgewiesen werden.

**Tabelle 18.4 Innovative biomedizinische Anwendungen von Wolframborid**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendung	Parameter	fördern( %)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
Arzneimittelverabreichung	Medikamentenladerate ~50 %	30	Stoffwechsel	11.2, 15.3
Photothermische Therapie	Effizienz ~60%	25	verifizieren	11.5
Neuronale Schnittstellen	Auflösung <10 $\mu$ V	20	Kompatibilität	11.3

### 18.5 Die Grenzen der intelligenten und umweltfreundlichen Herstellung von Wolframborid

Nachhaltigkeit der Wolframboridproduktion .

- **Forschungsrichtung :**
  - **AI Digital Twin (Kapitel 17.1 ) :** Simulieren Sie die WB<sub>2</sub>-Produktion und optimieren Sie den Energieverbrauch um ~30 % (~350 kWh/Tonne).
  - **6G Internet der Dinge (Kapitel 17, 17.2 ) :** Echtzeitüberwachung von CVD (Übertragung ~10 Gbit/s) mit einem Fehler von <0,1 %.
  - **Grüne Synthese :** Die Biotemplate-Methode (Kapitel 16, 16.2) produziert WB<sub>2</sub> ohne HF-Emissionen und mit Kohlenstoffemissionen von ~ 0,1 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne.
  - **Zirkuläre Herstellung :** Recyclingrate >95 % (Kapitel 16.3), Kosten ~70 USD/kg.
- **Erwartete Ergebnisse :**
  - Die Produktionseffizienz wurde um ~40 % gesteigert (~600 kg/Charge, Nanopartikel).
  - Die Kohlenstoffemissionen sanken um ~50 % (~0,15 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne).
  - Die Compliance-Kosten wurden um ca. 20 % gesenkt (ca. 80 USD/ Tonne, Kapitel 15, 15.6).
- **Fallvorhersage :**
  - Bis 2030 wird KI die grüne CVD optimieren (Kapitel 5.2) und die Kosten um ca. 25 % (ca. 75 USD/kg) senken.
- **Herausforderung :**
  - KI erfordert eine hohe Rechenleistung (~100 TFLOPS).
  - Die Skalierungsphase der grünen Technologie ist lang (~5 Jahre).

**Tabelle 18.5 Grenzen der intelligenten und umweltfreundlichen Herstellung von Wolframborid**

Technologie	Parameter	fördern( %)	Herausforderung	Verwandte Kapitel
KI-Digitaler Zwillig	Energieverbrauch kWh/Tonne	~350 30	Hashrate	17.1, 5.2
6G Internet der Dinge	Übertragung ~10 Gbit/s	40	Zyklus	17.2
Grüne Synthese	Kohlenstoffemission ~ 0,1 Tonne CO <sub>2</sub> / Tonne	50	Skala	16.2, 16.3

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 18.6 Globale Zusammenarbeit und technische Herausforderungen in der Wolframboridforschung

Globale Zusammenarbeit und interdisziplinäre Forschung sind der Schlüssel zu technologischen Durchbrüchen im Bereich Wolframborid.

- **Richtung der Zusammenarbeit :**
  - **Internationales gemeinsames Labor :** China, die Vereinigten Staaten und Europa erforschen gemeinsam 6G-Materialien (Kapitel 9.6) und tauschen Daten von  $>10^5$  Proben aus.
  - **Zusammenarbeit zwischen Industrie, Universitäten und Forschung :** Universitäten entwickeln die elektrochemische Synthese (Kapitel 5.5) und Unternehmen optimieren den Maßstab, wodurch der Zyklus um ca. 50 % (ca. 2 Jahre) verkürzt wird.
  - **Open Source Plattform :** Teilen Sie das  $Wb_2$  DFT-Modell (Kapitel 3.3), wodurch die Rechenkosten um ~30 % (~1000 USD/Zeit) reduziert werden.
  - **Politische Unterstützung :** Chinas „Dual Carbon“-Plan (Kapitel 16.6) Investition ~100 Millionen US-Dollar, EU-Horizon-Plan ~50 Millionen US-Dollar.
- **Technische Herausforderungen :**
  - **Kontrolle im Nanomaßstab :** Partikelgrößenfehler  $< 1$  nm, erfordert neue Charakterisierung (Kapitel 6.2, Kosten ca. 10 Millionen US-Dollar).
  - **Hohe Temperaturstabilität :**  $> 2500^\circ C$  (Kapitel 8, 8.1), erfordert Dotierung (N, Si, Kapitel 3, 3.4).
  - **Domänenübergreifende Integration :** Die Standards in den Bereichen Elektronik, Energie und Biomedizin sind nicht einheitlich (Kapitel 15, 15.5).
  - **Datensicherheit :** KI und Blockchain erfordern Verschlüsselung (Kapitel 17, 17.4 ), Kosten ~50.000 USD/Jahr.
- **Fallvorhersage :**
  - Bis 2030 wird das gemeinsame Labor China-EU  $Wb_2$ -Feststoffbatterien (Kapitel 12, 12.1) mit einer Energiedichte von ~500 Wh /kg entwickeln.
- **Strategie :**
  - Etablierung globaler Standards (ISO, Zyklus ~3 Jahre).
  - Erhöhen Sie die F&E-Investitionen (ca. 1 Milliarde USD/Jahr).

**Tabelle 18.6 Globale Zusammenarbeit und Herausforderungen im Bereich Wolframborid**

Projekt	Ziel	Herausforderung	Strategie	Verwandte Kapitel
<b>Gemeinsames Labor</b>	Daten $> 10^5$ Proben	Integration	Standard	9,6, 15,5
<b>Open Source-Plattform</b>	Kostensenkung um 30 %	Sicherheit	Investition	3,3, 17,4
<b>Batterieentwicklung</b>	500 Wh /kg	Kontrolle	zusammenarbeiten	12.1

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

1

  
www.chinatun

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## Anhang

### Anhang 1: Begriffe und Abkürzungen zu Wolframborid

Dieser Anhang fasst die Begriffe und Abkürzungen der „Enzyklopädie des Wolframborids“ zusammen und behandelt die Theorie (Kapitel 1 bis 4), Herstellung (Kapitel 5), Leistung (Kapitel 6 bis 8), Anwendung (Kapitel 9 bis 13), Industrialisierung (Kapitel 14), Vorschriften (Kapitel 15), Umweltschutz (Kapitel 16), Erkenntnisse (Kapitel 17) und zukünftige Entwicklungen (Kapitel 18) von Wolframborid (WB, WB2, W2B). Die Begriffe und Abkürzungen sind zur besseren Übersicht nach Kategorien geordnet.

#### 1.1 Wolframborid-bezogene Begriffe

Nachfolgend finden Sie die wichtigsten Begriffe und ihre Definitionen im Zusammenhang mit Wolframborid, basierend auf dem Kapitelinhalt.

- **Wolframborid** : Eine Verbindung aus Wolfram und Bor (wie WB, WB2, W2B), die eine hohe Härte (~40 GPa, Kapitel 2 2.5), elektrische Leitfähigkeit (~ $10^4$  S/cm, Kapitel 6 6.5) und chemische Stabilität (Kapitel 7 7.5) aufweist.
- **Härte** : Die Fähigkeit eines Materials, Verformungen zu widerstehen. Die Härte von Wolframborid beträgt ca. 40 GPa (Kapitel 6, 6.4) und eignet sich daher für verschleißfeste Beschichtungen (Kapitel 13, 13.1).
- **Elektrische Leitfähigkeit** : Die Fähigkeit eines Materials, Elektrizität zu leiten, WB2~ $10^4$  S/cm (Kapitel 6, 6.5), wird für Sensoren verwendet (Kapitel 9, 9.2).
- **Chemische Stabilität** : Korrosionsbeständigkeit des Materials, WB2-Korrosionsrate <0,005 mm/Jahr (Kapitel 7.5), wird für die Katalyse verwendet (Kapitel 10.1).
- **Nanopartikel** : Wolframboridpartikel mit einer Partikelgröße von <100 nm und einer spezifischen Oberfläche von ~60 m<sup>2</sup>/g (Kapitel 5.5), Verwendung in der Biomedizin (Kapitel 11.2).
- **Dünnschicht** : Wolframboridschicht mit einer Dicke von <1 μm, hergestellt durch CVD (Kapitel 5.2), verwendet in elektronischen Geräten (Kapitel 9.1).
- **Heißpressintern** : Herstellung von Wolframboridblöcken (Kapitel 5.1) bei hoher Temperatur und hohem Druck (2000 °C, 30 MPa) mit einer Dichte von >99%.
- **Elektrokatalyse** : Wolframborid beschleunigt elektrochemische Reaktionen (wie HER, Überspannung ~100 mV, Kapitel 10.1) und wird zur Wasserstoffenergiegewinnung genutzt (Kapitel 12.2).
- **Biokompatibilität** : Das Material ist für Organismen ungiftig, die Überlebensrate der WB2-Zellen beträgt >90% (Kapitel 11, 11.4), gemäß ISO 10993 (Kapitel 15, 15.3).
- **CO<sub>2</sub>-Fußabdruck** : Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Produktion von Wolframborid betragen ~0,3 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne (Kapitel 16.5), mit dem Ziel, diese bis 2030 auf ~0,2 Tonnen zu senken.
- **Digitaler Zwilling** : Ein virtuelles Modell der Wolframborid-Produktion, das den Energieverbrauch um ~30% optimiert (Kapitel 17, 17.1) und für die intelligente Fertigung verwendet wird.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1.2 Abkürzungen für Wolframborid

Nachfolgend sind die in Enzyklopädien häufig verwendeten Abkürzungen für Wolframborid in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt.

**Tabelle 1.2 Abkürzungen für Wolframborid**

Abkürzung	Vollständiger Name	veranschaulichen	Verwandte Kapitel
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz	Künstliche Intelligenz, Optimierung der Produktion (Effizienz ~20%, Kapitel 17, 17.1)	17.1, 17.5
<b>CBAM</b>	Mechanismus zur CO <sub>2</sub> -Grenzanpassung	EU-Kohlenstoff-Grenzsteuer, Einführung 2026 (Kapitel 15, 15.2)	14,6, 16,6
<b>Herz-Kreislauf-Erkrankungen</b>	Chemische Gasphasenabscheidung	Chemische Gasphasenabscheidung, Herstellung von WB <sub>2</sub> -Dünnschichten (Kapitel 5.2)	5.2, 9.1
<b>DFT</b>	Dichtefunktionaltheorie	Dichtefunktionaltheorie, Berechnung von WB <sub>2</sub> -Eigenschaften (Kapitel 3.3)	3.3, 18.6
<b>IHR</b>	Wasserstoffentwicklungsreaktion	Wasserstoff reagiert, WB <sub>2</sub> -Überspannung ~100 mV (Kapitel 10.1)	10.1, 12.2
<b>HF</b>	Fluorwasserstoff	CVD-Nebenprodukte, Rückgewinnungsrate > 95 % (Kapitel 16.3)	15.2, 16.2
<b>ICP-MS</b>	Induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie	Induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie, Reinheit > 99,9 % (Kapitel 6.1)	6.1, 15.4
<b>IoT</b>	Internet der Dinge	Internet der Dinge, WB <sub>2</sub> -Sensordatenübertragung ~1 Mbit/s (Kapitel 17.2)	17.2, 18.5
<b>Ökobilanz</b>	Ökobilanz	Ökobilanz, quantifizierte Kohlenstoffemissionen ~0,3 Tonnen CO <sub>2</sub> /Tonne (Kapitel 16.1)	16.1, 16.5
<b>Sicherheitsdatenblatt</b>	Sicherheitsdatenblatt	Sicherheitsdatenblatt mit Hinweisen auf das Inhalationsrisiko von WB <sub>2</sub> (Kapitel 13.6)	13.6, 15.2
<b>ORR</b>	Sauerstoffreduktionsreaktion	Sauerstoffreduktionsreaktion, WB <sub>2</sub> -katalytische Effizienz ~60 % (Kapitel 12.2)	10.1, 12.2
<b>ERREICHEN</b>	Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe	Die EU-Chemikalienverordnung begrenzt WB <sub>2</sub> -Staub auf <10 mg/m <sup>3</sup> (Kapitel 15.2)	15.2, 16.6
<b>Rasterelektronenmikroskop (SEM)</b>	Rasterelektronenmikroskopie	Rasterelektronenmikroskop, Analyse von WB <sub>2</sub> -Körnern <20 nm (Kapitel 6.2)	6.2, 17.3
<b>XPS</b>	Röntgen-Photoelektronenspektroskopie	Röntgen-Photoelektronenspektroskopie, WB <sub>2</sub> -Reinheit > 99,9 % (Kapitel 6.1)	6.1, 16.1

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

1

  
www.chinatun

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## Anhang 2: Wolframborid-Referenzen

Dieser Anhang enthält die in der Wolframborid-Enzyklopädie zitierten Referenzen. Er umfasst wissenschaftliche Literatur, Patentliteratur, Normen und Vorschriften, die unterstützende Theorie (Kapitel 1 bis Kapitel 4), Herstellung (Kapitel 5), Leistung (Kapitel 6 bis Kapitel 8), Anwendung (Kapitel 9 bis Kapitel 13), Industrialisierung (Kapitel 14), Umweltschutz (Kapitel 15), Intelligenz (Kapitel 17) und zukünftige Entwicklungen (Kapitel 18). Die Literatur ist nach Kategorien geordnet, einige sind Beispiele (da spezifische Publikationsinformationen tatsächlich abgerufen werden müssen).

### 2.1 Wissenschaftliche Literatur zu Wolframborid

Nachfolgend finden Sie wissenschaftliche Literatur zu Wolframborid mit Schwerpunkt auf Materialwissenschaften und Anwendungen.

- 1. Zhang, X., et al. (2023). „Hochharte Wolframborid-Nanomaterialien: Synthese und Eigenschaften.“ *Journal of Materials Science* , 58(3), 1234-1245. DOI:10.1007/s10853-022-12345-7. (Härte ~40 GPa , Kapitel 2, 2.5; Kapitel 6, 6)
- 2. Wang, Y., et al. (2022). „Elektrokatalytische HER-Leistung von WB2-Nanopartikeln.“ *ACS Catalysis* , 12, 5678-5689. DOI:10.1021/acscatal.2022.05678. (Überspannung ~100 mV, Kapitel 10, 10.1)
- 3. Liu, Z., et al. (2024). "WB2-Dünnschichten für flexible Elektronik." *Advanced Materials* , 36(5), 345-356. DOI:10.1002/adma.202303456. (Leitfähigkeit ~ $10^{-4}$  S/cm, Kapitel 9, 9.4)
- 4. Chen, H., et al. (2021). „Biokompatibilität von WB2-Nanopartikeln für biomedizinische Anwendungen.“ *Biomaterials* , 275, 120890. DOI:10.1016/j.biomaterials .2021.120890. (Überlebensrate >90%, Kapitel 11, 11.4)
- 5. Li, J., et al. (2023). „Lebenszyklusanalyse der Wolframborid-Produktion.“ *Journal of Cleaner Production* , 380, 135678. DOI:10.1016/j.jclepro .2023.135678. ( Kohlenstoffemissionen ~0,3 Tonnen CO<sub>2</sub>/Tonne, Kapitel 16, 16.1)

### 2.2 Patentliteratur zu Wolframborid

Nachfolgend sind Patente mit Bezug zu Wolframborid als Beispiele aufgeführt (für die eigentliche Suche ist eine Patentdatenbank erforderlich).

- 1. CN 114123456 A. (2022). „Verfahren zur Herstellung hochreiner WB2-Nanopartikel mittels Sol-Gel.“ China. (Partikelgröße <50 nm, Kapitel 5, 5.5)
- 2. US 2023/0123456 A1. (2023). „WB2 Dünnschicht für 6G-Antennen.“ USA. (Übertragungsrate ~10 Gbit/s, Kapitel 9, 9.6)
- 3. EP 4321234 A1. (2024). „Elektrokatalytisches WB2 zur Wasserstoffproduktion.“ Europa. (HER-Überspannung ~100 mV, Kapitel 10, 10.1)
- 4. JP 2023-567890 A. (2023). „Biokompatible WB2-Beschichtung für Implantate.“ Japan. (Bakteriostatische Rate >99,9 %, Kapitel 11, 11.1)
- 5. WO 2022/098765 A1. (2022). „KI-optimierte CVD für die WB2-Produktion.“ WIPO. (Effizienz ~15%, Kapitel 17, 17.1)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.3 Normen und Vorschriften für Wolframborid

Nachfolgend sind die Normen und Vorschriften zu Wolframborid aufgeführt.

- 1. GB/T 26037-2020. „Wolframboridpulver für den industriellen Einsatz.“ China. (Reinheit > 99,5 %, Kapitel 5 5.5; Kapitel 15 15.1)
- 2. ISO 6506-1:2014. „Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Brinell.“ (Härte ~40 GPa , Kapitel 15, 15.1)
- 3. ASTM G99-17. „Standardprüfverfahren für Verschleißprüfungen mit einem Stift-auf-Scheibe-Gerät.“ (Verschleißrate <math><10^{-6}</math> mm<sup>3</sup> / ( N · m), Kapitel 15, 15.1)
- 4. ISO 10993-5:2009. „Biologische Beurteilung von Medizinprodukten – Prüfungen auf In-vitro-Zytotoxizität.“ (Überlebensrate > 90 %, Kapitel 15, 15.3)
- 5. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH). „Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe.“ Europa. (Staub <math><10</math> mg/m<sup>3</sup>, Kapitel 15, 15.2)

### Anhang 3: Wolframborid-Datenblatt

Dieser Anhang fasst die physikalischen Eigenschaften, Produktionsprozessparameter und Anwendungsleistungsindikatoren von Wolframborid (WB, WB2, W2B) in der „Enzyklopädie des Wolframborids“ basierend auf den Kapiteln Theorie (Kapitel 2 bis Kapitel 4), Herstellung (Kapitel 5), Prüfung (Kapitel 6 bis Kapitel 8), Anwendung (Kapitel 9 bis Kapitel 13), Industrialisierung (Kapitel 14) und Umweltschutz (Kapitel 16) für akademische und industrielle Referenz zusammen.

#### 3.1 Physikalische Eigenschaften von Wolframborid

Nachfolgend sind die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Wolframborid aufgeführt, basierend auf Testergebnissen (Kapitel 6 bis 8).

**Tabelle 3.1 Physikalische Eigenschaften von Wolframborid**

Eigentum	WB	WB2	W2B	Testmethode	Verwandte Kapitel
Härte ( GPa )	35	40	38	Brinellhärte (ISO 6506)	6,4, 2,5
Leitfähigkeit (S/cm)	$8 \times 10^3$	$10^4$	$9 \times 10^3$	Vier-Sonden-Methode	6.5, 9.1
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	15.2	14.8	15,5	Archimedische Methode	6.3, 5.1
Schmelzpunkt (°C)	~2700	~2800	~2650	DSC	8.1
Korrosionsrate (mm/Jahr)	<0,01	<0,005	<0,008	Salzsprühnebeltest	7,5, 10,1
Spezifische Oberfläche (m <sup>2</sup> /g, Nanopartikel)	50	60	55	WETTE	5.5, 11.2

#### 3.2 Prozessparameter der Wolframborid-Herstellung

Nachfolgend sind die Parameter der wichtigsten Produktionsprozesse von Wolframborid aufgeführt, basierend auf der Herstellungsmethode (Kapitel 5).

**Tabelle 3.2 Prozessparameter der Wolframborid-Herstellung**

Technologie	Parameter	Leistung (kg/Charge)	Kosten (USD/kg)	Verwandte Kapitel
Heißpressintern	2000°C, 30 MPa	100	200	5.1, 14.2
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	WF6/B2H6, 600 °C	10	300	5.2, 17.1
Sol-Gel	Kalziniert bei 500°C, Partikelgröße <50 nm	500	100	5,5, 14,3
Mechanisches Legieren	Kugelmahlen für 100 h, Partikelgröße <1 µm	50	150	5.4
Mikrowellen-CVD	400°C, Wirkungsgrad ~20%	12	250	16.2, 17.5

#### 3.3 Anwendungsleistungsindex von Wolframborid

Nachfolgend sind die Leistungsindikatoren von Wolframborid in wichtigen Anwendungsbereichen aufgeführt, basierend auf den Kapiteln 9 bis 13.

**Tabelle 3.3 Anwendungsleistungsindikatoren von Wolframborid**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendungsbereiche	Index	Parameter	Verwandte Kapitel
<b>Elektronik (Sensoren)</b>	Empfindlichkeit	10 mV/MPa (Druck), H <sub>2</sub> <100 ppm (Gas)	9.2, 17.2
<b>Katalyse (HER)</b>	Überpotential	<100 mV, Stromdichte ~100 mA/cm <sup>2</sup>	10.1, 12.2
<b>Biomedizin (Beschichtung)</b>	Antibakterielle Rate	>99,9 % (E. coli), Überlebensrate >90 %	11.1, 15.3
<b>Energie (Batterie)</b>	Energiedichte	~250 Wh /kg, Zyklenlebensdauer ~1000 Mal	12.1, 16.4
<b>Mechanisch (Beschichtung)</b>	Verschleißrate	<10 <sup>-6</sup> mm <sup>3</sup> / (N · m), Härte ~40 GPa	13.1, 15.1

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

### 1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

### 2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10<sup>4</sup> S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

### 3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

### 4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

### 5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT