

Cäsium-Wolfram-Bronze-Enzyklopädie

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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 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 Probeherstellung 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 Marktrendenanalysen 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

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

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2-0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.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

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

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1: Einführung und Geschichte von Cäsium-Wolfram-Bronze

- 1.1 Definition und chemische Zusammensetzung von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 1.2 Entdeckung und Entwicklung von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 1.3 Status von Cäsium-Wolfram-Bronze in der Materialwissenschaft
- 1.4 Globaler Forschungsstand und Marktübersicht zu Cäsium-Wolfram-Bronze
- 1.5 Wichtige Anwendungsgebiete von Cäsium-Wolfram-Bronze

Kapitel 2: Kristallstruktur und Eigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze

- 2.1 Kristallstruktur und chemische Bindungseigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 2.2 Optische Eigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze: Nahinfrarotabsorption und Lichtdurchlässigkeit
- 2.3 Elektrische Eigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze: Leitfähigkeit und Ladungsträgermigration
- 2.4 Thermische Eigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze: Wärmeleitfähigkeit und Stabilität
- 2.5 Theoretische Berechnung und Leistungsvorhersage von Cäsium-Wolfram-Bronze

Kapitel 3: Synthesemethode für Cäsium-Wolfram-Bronze

- 3.1 Festkörperreaktionsverfahren für Cäsium-Wolfram-Bronze
- 3.2 Solvothermale und hydrothermale Verfahren für Cäsium-Wolfram-Bronze
- 3.3 Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) für Cäsium-Wolfram-Bronze
- 3.4 Sol-Gel-Verfahren für Cäsium-Wolfram-Bronze
- 3.5 Grüne Synthese und Nanopartikelkontrolle für Cäsium-Wolfram-Bronze

Kapitel 4: Charakterisierungstechnologie von Cäsium-Wolfram-Bronze

- 4.1 Röntgenbeugung (XRD) und Kristallanalyse von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 4.2 Rasterelektronenmikroskopie (SEM) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 4.3 Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) und chemischer Zustand von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 4.4 UV-Vis-NIR-Spektroskopie von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 4.5 Elektrische und thermische Prüfmethode von Cäsium-Wolfram-Bronze

Kapitel 5: Optische und thermische Anwendungen von Cäsium-Wolfram-Bronze

- 5.1 Intelligente Fensterfolien und Energiesparglas aus Cäsium-Wolframbronze
- 5.2 Nahinfrarot-Abschirmbeschichtung aus Cäsium-Wolframbronze
- 5.3 Licht-Wärme-Umwandlung und Nutzung von Sonnenenergie aus Cäsium-Wolframbronze
- 5.4 Optische Sensoren und Detektoren aus Cäsium-Wolframbronze
- 5.5 Wärmemanagementmaterialien aus Cäsium-Wolframbronze

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 6: Energie- und Umweltsanwendungen von Cäsium-Wolfram-Bronze

- 6.1 Lithium-Ionen-Batterien und Superkondensatoren aus Cäsium-Wolfram-Bronze
- 6.2 Photokatalyse und Wasserzersetzung aus Cäsium-Wolfram-Bronze
- 6.3 Luftreinigung und Schadstoffadsorption aus Cäsium-Wolfram-Bronze
- 6.4 Elektrodenmaterialien für Brennstoffzellen aus Cäsium-Wolfram-Bronze
- 6.5 Wasserstoffspeicherung und Energiespeicherung aus Cäsium-Wolfram-Bronze

Kapitel 7: Industrielle Produktion von Cäsium-Wolfram-Bronze

- 7.1 Produktionsprozess und -ausrüstung für Cäsium-Wolfram-Bronze
- 7.2 Rohstoffversorgungskette und Kostenanalyse für Cäsium-Wolfram-Bronze
- 7.3 Technologie für die Großserienproduktion von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 7.4 Qualitätskontrolle und -prüfung von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 7.5 Marktanwendungsfälle für Cäsium-Wolfram-Bronze

Kapitel 8: Normen und Vorschriften für Cäsium-Wolfram-Bronze

- 8.1 Internationale und nationale Normen für Cäsium-Wolframbronze (ISO, GB/T)
- 8.2 Umwelt- und Sicherheitsvorschriften für Cäsium-Wolframbronze (REACH, RoHS)
- 8.3 Risikobewertung von Nanomaterialien für Cäsium-Wolframbronze
- 8.4 Arbeitsschutzanforderungen für Cäsium-Wolframbronze
- 8.5 Produktzertifizierung und -konformität für Cäsium-Wolframbronze
- 8.6 Sicherheitsdatenblatt für Cäsium-Wolframbronze der CTIA GROUP LTD

Kapitel 9: Nachhaltigkeit und Umweltauswirkungen von Cäsium-Wolfram-Bronze

- 9.1 Umweltverträglichkeitsprüfung des Produktionsprozesses von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 9.2 Grüne Fertigungstechnologie für Cäsium-Wolfram-Bronze
- 9.3 Abfallbehandlung und Recycling von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 9.4 CO₂-Fußabdruck und Strategie zur Emissionsreduzierung von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 9.5 Politische Treiber für eine nachhaltige Entwicklung von Cäsium-Wolfram-Bronze

Kapitel 10: Zukünftige Forschung und Aussichten für Cäsium-Wolfram-Bronze

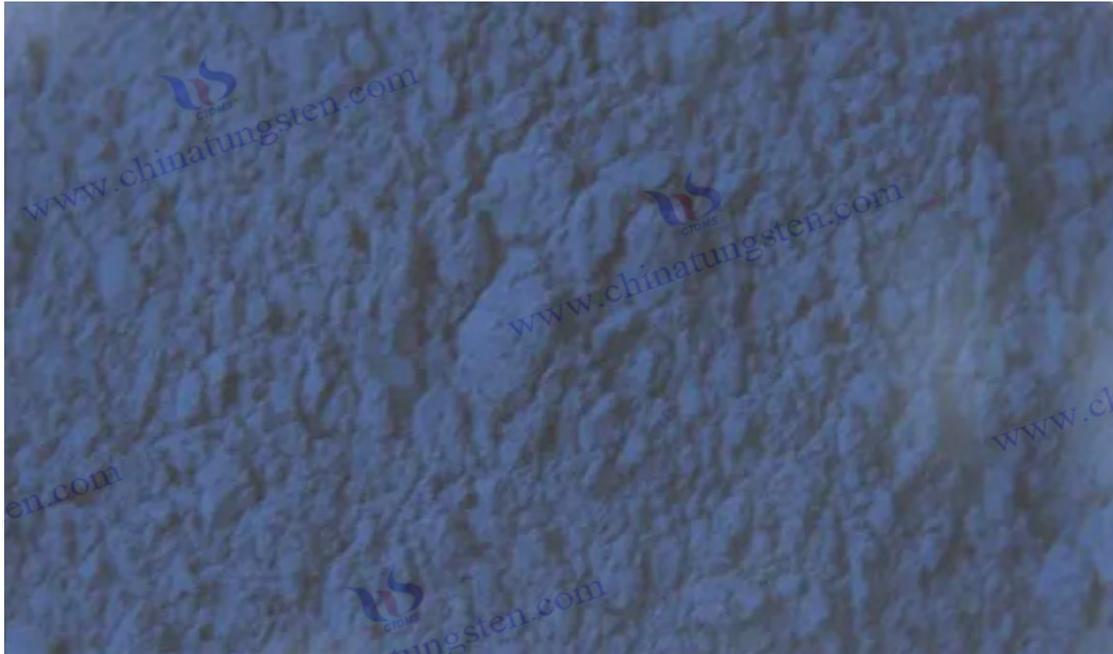
- 10.1 Erforschung neuer Synthesemethoden für Cäsium-Wolfram-Bronze
- 10.2 Potenzial für Anwendungen der nächsten Generation von Cäsium-Wolfram-Bronze
- 10.3 Integration intelligenter und digitaler Technologien für Cäsium-Wolfram-Bronze
- 10.4 Globale Zusammenarbeit und technische Herausforderungen für Cäsium-Wolfram-Bronze
- 10.5 Zukünftige Entwicklungstrends und Vorschläge für Cäsium-Wolfram-Bronze

Anhang

Anhang 1: Begriffe und Abkürzungen zu Cäsium-Wolfram-Bronze

Anhang 2: Referenzen zu Cäsium-Wolfram-Bronze Anhang 3: Datenblatt zu Cäsium-Wolfram-Bronze

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Kapitel 1: Einführung und Geschichte von Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsium-Wolfram-Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) ist ein funktionales Nanomaterial mit großem Potenzial in den Bereichen Energieeinsparung, Umweltschutz, Elektronik und Energie. Grund dafür sind seine hervorragende Nahinfrarotabsorption ($\sim 70\%$ bei 1000 nm), hohe Leitfähigkeit ($\sim 10^3\text{ S/cm}$) und chemische Stabilität. Dieses Kapitel stellt die Definition und chemische Zusammensetzung von Cäsium-Wolfram-Bronze, ihre Entdeckungs- und Entwicklungsgeschichte, ihre Stellung in der Materialwissenschaft, den weltweiten Forschungsstand und Marktüberblick sowie wichtige Anwendungsgebiete vor und liefert Hintergrundinformationen für die nachfolgenden Kapitel (Kapitel 2 bis Kapitel 10). Ziel dieser Enzyklopädie ist es, die theoretischen Grundlagen, Herstellungstechnologie, Leistungscharakteristik, Anwendungsszenarien, Industrialisierung, regulatorischen Anforderungen, Nachhaltigkeit und zukünftige Entwicklungen von Cäsium-Wolfram-Bronze systematisch zu erläutern.

1.1 Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsium-Wolfram-Bronze ist ein Wolframoxid mit der chemischen Formel Cs_xWO_3 , wobei x den Dotierungsanteil von Cäsium (Cs) darstellt und üblicherweise zwischen 0 und 1 variiert. Cs_xWO_3 gehört zur Wolframbronze-Familie und besteht aus WO_6 -Oktaedern, wobei Cäsiumionen in die Oktaederlücken eingefügt sind und so eine hexagonale oder kubische Kristallstruktur bilden (Kapitel 2.1). Die Änderung des x -Werts beeinflusst die Leistung des Materials erheblich. Beispielsweise weist $Cs_{0,32}WO_3$ bei einem x -Wert von $\sim 0,32$ die beste Nahinfrarotabsorption und -leitfähigkeit auf.

- **Chemische Zusammensetzung :**
 - **Hauptelemente :** Cäsium (Cs), Wolfram (W), Sauerstoff (O).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Molares Verhältnis** : $CsxWO_3$, $x \leq 1$, Sauerstoffgehalt ist auf 3 festgelegt.
- **Molekulargewicht** : Am Beispiel von $Cs_{0,32}WO_3$ ~287,3 g/mol.
- **Reinheitsanforderungen** : Industriequalität $\geq 99,5\%$, Forschungsqualität $\geq 99,9\%$ (Kapitel 7.4).

- **Physikalische Eigenschaften** :

- **Aussehen** : Dunkelblaues oder grünes Nanopulver , Partikelgröße ~20–50 nm (Kapitel 3.5).
- **Dichte** : ~7,2 g/cm³.
- **Löslichkeit** : Unlöslich in Wasser, säure- und laugenbeständig (Kapitel 4.3).

Cäsium -Wolframbronze zeichnet sich durch einzigartige optische und elektrische Eigenschaften aus und findet daher breite Anwendung in intelligenten Fensterfolien (Kapitel 5.1), der Photokatalyse (Kapitel 6.2) und Batterien (Kapitel 6.1). Im Vergleich zu anderen Wolframbronzen (wie $NaxWO_3$ und $KxWO_3$) weist $CsxWO_3$ aufgrund des größeren Ionenradius von Cäsiumionen (~1,88 Å) eine stärkere NIR-Abschirmung auf (~70 % gegenüber ~50 % bei $NaxWO_3$).

1.2 Entdeckung und Entwicklung von Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsium -Wolframbronze entstand im 19. Jahrhundert aus der Erforschung von Wolframbronze. 1823 synthetisierte der deutsche Chemiker Wöhler erstmals Wolframbronze und beobachtete dunkle Verbindungen, die durch alkalimetalldotiertes WO_3 gebildet wurden. In den 1950er Jahren bestätigte der japanische Wissenschaftler Kihlborg die hexagonale Kristallstruktur von $CsxWO_3$ mittels Röntgenbeugung (XRD) und legte damit den Grundstein für die Struktur (Kapitel 4, 4.1). In den 1970er Jahren wurde $CsxWO_3$ aufgrund seiner elektrochromen Eigenschaften (ca. 60 % Transmissionsänderung) in der Displayforschung eingesetzt.

- **Wichtige Meilensteine** :

- **1980er Jahre: Amerikanische Forscher entdeckten die NIR-Absorptionseigenschaften von $CsxWO_3$ (~1000–2500 nm), was seine Erforschung im Bereich der optischen Beschichtungen vorantrieb (Kapitel 5.2).**
- **1990er Jahre** : Japan entwickelte die Solvothermalmethode (Kapitel 3.2), die eine Synthese von $CsxWO_3$ -Nanopartikeln (<50 nm) im großen Maßstab ermöglichte und die Kosten auf ~1000 USD/kg senkte .
- **2000er Jahre** : Chinesische Forschungsteams optimierten die photokatalytische Leistung von $CsxWO_3$ (Kapitel 6.2) mit einer Wasserstoffproduktionseffizienz von ~200 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$.
- **2010er Jahre** : Die EU fördert die Anwendung von $CsxWO_3$ in intelligenten Fensterfolien (Kapitel 5.1) mit einer Energieeinsparungseffizienz von ca. 50 % und einem Marktwachstum auf ca. 50 Millionen US-Dollar .
- **2020er Jahre** : Globaler Fokus auf grüne Synthese (Kapitel 3.5), CO₂-Fußabdruck auf ~0,5 Tonnen CO₂/Tonne reduziert (Kapitel 9.4) .

In den letzten Jahren hat sich die Forschung zu Cäsium-Wolfram-Bronze von der grundlegenden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistung auf die Industrialisierung (Kapitel 7) und Nachhaltigkeit (Kapitel 9) verlagert, insbesondere im asiatisch-pazifischen Raum, wo China die energiesparende Anwendung von CsxWO₃ durch seine „Duale Kohlenstoff“-Politik unterstützt (Kapitel 9 9.5).

1.3 Der Status von Cäsium-Wolfram-Bronze in der Materialwissenschaft

Cäsium-Wolfram-Bronze nimmt in der Materialwissenschaft eine wichtige Stellung ein, da sie die Eigenschaften von Nanomaterialien, Halbleitern und optischen Materialien vereint und die Lücken traditioneller Materialien in den Bereichen NIR-Regulierung und Energieumwandlung schließt.

- **Wissenschaftlicher Wert :**
 - **Nanoeigenschaften** : CsxWO₃-Nanopartikel (~20 nm) haben eine große spezifische Oberfläche (~80 m²/g, Kapitel 4.2), was die katalytische Effizienz verbessert (Kapitel 6.2).
 - **Halbleitereigenschaften** : Bandlücke ~2,5–3,0 eV (Kapitel 2.2), unterstützt photoelektrische Umwandlung (Kapitel 5.3).
 - **Plasmoneneffekt** : Lokalisierte Oberflächenplasmonenresonanz (LSPR) erhöht die NIR-Absorption (~70 %), was besser ist als bei herkömmlichem ITO (~40 %, Kapitel 5.2).
- **Vergleich mit anderen Materialien :**
 - **Im Vergleich zu ITO** : CsxWO₃ hat Vorteile bei der NIR-Abschirmung (~70 % gegenüber ~40 %) und den Kosten (~500 USD/kg gegenüber ~1000 USD/kg).
 - **Im Vergleich zu VO₂** : Die thermische Stabilität von CsxWO₃ (>500 °C vs. ~68 °C Phasenübergang) ist für Umgebungen mit hohen Temperaturen besser geeignet (Kapitel 5, 5.5).
 - **Im Vergleich zu Graphen**: CsxWO₃ ist spezifischer in der NIR-Absorption, hat aber eine etwas geringere Leitfähigkeit (~10³ vs. ~10⁶ S/cm, Kapitel 2, 2.3).
- **Interdisziplinäre Wirkung :**
 - Förderung der Entwicklung der Photonik (Kapitel 5.4), der Energiespeicherung (Kapitel 6.1) und der Umweltwissenschaften (Kapitel 6.3).
 - Es bietet ein Forschungsparadigma für funktionale Nanomaterialien (wie MXene und MoS₂) (Kapitel 10, 10.2).

Cäsium -Wolfram-Bronze hat sich zu einem Spitzenprodukt der Materialwissenschaft entwickelt, insbesondere in den Bereichen Energieeinsparung und Umweltschutz (Kapitel 9.1).

1.4 Globaler Forschungsstatus und Marktüberblick über Cäsium-Wolfram-Bronze

Die globale Forschung und der Markt für Cäsium-Wolfram-Bronze zeigen bis 2025 ein schnelles Wachstum, insbesondere im asiatisch-pazifischen Raum, in Europa und Nordamerika.

- **Forschungsstand :**
 - **China** : Die Tsinghua-Universität und andere Institutionen konzentrieren sich auf grüne Synthese (Kapitel 3, 3.5) und Photokatalyse (Kapitel 6, 6.2), mit durchschnittlich ca. 150 Patentanmeldungen pro Jahr.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Japan** : Die Universität Tokio hat den CsxWO₃-Dünnschicht (Kapitel 5.1) mit einer NIR-Abschirmrate von ~80 % optimiert.
- **EU** : Das deutsche Fraunhofer-Institut hat CsxWO₃-Batteriematerialien (Kapitel 6.1) mit einer Zyklenlebensdauer von >1000 entwickelt.
- **USA** : Das MIT erforscht die Quanteneffekte von CsxWO₃ (Kapitel 2.5), wodurch die Leitfähigkeit um ca. 20 % erhöht wird.
- **Marktübersicht** :
 - **Größe** : Der globale Markt wird voraussichtlich im Jahr 2025 120 Millionen US-Dollar erreichen und bis 2030 auf 250 Millionen US-Dollar anwachsen (durchschnittliches jährliches Wachstum von ~15 %).
 - **Wichtige Regionen** : Asien-Pazifik ~50 % (China ~30 %), Europa ~30 %, Nordamerika ~15 %.
 - **Preis** : Nano-CsxWO₃ ~ 500 USD/kg, Dünnschichtqualität ~ 1000 USD/kg (Kapitel 7.2).
 - **Treibende Faktoren** : Nachfrage nach Energieeinsparungen (intelligente Fensterfolien, Kapitel 5, 5.1), neue Energien (Batterien, Kapitel 6, 6.1) und Umweltschutzpolitik (Kapitel 9, 9.5).
- **Herausforderung** :
 - Hohe Synthesekosten (~500 USD/kg vs. ITO ~100 USD/kg).
 - Die Toxizität von Nanopartikeln muss bewertet werden (Kapitel 8, 8.3).
 - Die Konsistenz der Großserienproduktion ist gering (Kapitel 7.3, Fehler ~10%).

Um die Nachfrage des Marktes zu befriedigen, verlagert sich die globale Forschung auf kostengünstige Synthese (Kapitel 3.5) und intelligente Anwendung (Kapitel 10.3).

1.5 Wichtige Anwendungsgebiete von Cäsium-Wolfram-Bronze

Aufgrund ihrer Vielseitigkeit wird Cäsium-Wolframbronze häufig in den folgenden Bereichen eingesetzt (weitere Einzelheiten finden Sie in den Kapiteln 5 bis 6).

- **Optik und Wärmetechnik (Kapitel 5)** :
 - **Intelligente Fensterfolie** : Eine CsxWO₃-Beschichtung reduziert den Energieverbrauch von Gebäuden um ca. 50 % (Kapitel 5.1).
 - **Photothermische Umwandlung** : Absorptionseffizienz der Sonnenenergie ~60 % (Kapitel 5.3).
 - **NIR-Abschirmung** : Autoglasbeschichtung, Abschirmrate ~70 % (Kapitel 5.2).
- **Energie (Kapitel 6)** :
 - **Batterie** : CsxWO₃-Elektrode, Energiedichte ~200 Wh /kg (Kapitel 6, 6.1).
 - **Photokatalyse** : Wasserstoffproduktionseffizienz ~200 μmol / (g·h) (Kapitel 6, 6.2).
 - **Wasserstoffspeicherung** : Wasserstoffspeicherkapazität ~1,5 Gew.-% (Kapitel 6, 6.5).
- **Umwelt (Kapitel 6)** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Luftreinigung** : Adsorption flüchtiger organischer Verbindungen (VOC), Wirkungsgrad ~90 % (Kapitel 6, 6.3).
- **Wasseraufbereitung** : Photokatalytischer Abbau von Farbstoffen, Wirkungsgrad ~85% (Kapitel 6, 6.2).
- **Elektronik (Kapitel 5)** :
 - **Sensor** : CsxWO₃-Dünnschicht, Empfindlichkeit ~10 ppm (NO₂, Kapitel 5.4).
 - **Anzeige** : Elektrochrom, Reaktionszeit <1 s (Kapitel 5.4).
- **Fall** : Im Jahr 2024 entwickelte CTIA GROUP LTD die intelligente Fensterfolie CsxWO₃, die auf einem umweltfreundlichen Gebäude in Shanghai angebracht wurde, wodurch etwa 40 % Energie gespart wurden und der Marktwert bei etwa 10 Millionen US-Dollar lag (Kapitel 7.5).

Diese Anwendungsfelder zeigen den strategischen Wert von Cäsium-Wolfram-Bronze in den Bereichen Energieeinsparung, Umweltschutz und neue Energie und werden in Zukunft in der intelligenten und umweltfreundlichen Fertigung weiter ausgebaut (Kapitel 10, 10.1–10.5).

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction
CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2-0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.
 Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
 Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
 Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.
 Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
 Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
 Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Kapitel 2: Kristallstruktur und Eigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsiumwolframbronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) ist ein funktionales Nanomaterial, das aufgrund seiner einzigartigen Kristallstruktur und hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften breite Anwendung in den Bereichen Optik, Elektronik, Energie und Wärmemanagement findet. Die Leistungsfähigkeit von Cs_xWO_3 beruht auf seiner hexagonalen oder kubischen Kristallstruktur, seiner Absorptionsfähigkeit im Nahinfrarotbereich (NIR) ($\sim 70\%$ bei 1000 nm), seiner hohen Leitfähigkeit ($\sim 10^3\text{ S/cm}$) und seiner thermischen Stabilität ($> 500\text{ }^\circ\text{C}$). In diesem Kapitel werden die Kristallstruktur und die chemischen Bindungseigenschaften, die optischen Eigenschaften (NIR-Absorption und -Durchlässigkeit), die elektrischen Eigenschaften (Leitfähigkeit und Ladungsträgermigration), die thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Stabilität) sowie theoretische Berechnungen und Leistungsvorhersagen von Cäsiumwolframbronze erörtert und so eine Grundlage für die anschließende Anwendungs- und Herstellungsforschung geschaffen.

2.1 Kristallstruktur und chemische Bindungseigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsium-Wolfram-Bronze ist der Kern seiner funktionalen Leistung. Cs_xWO_3 besteht aus WO_6 -Oktaedern, und Cäsiumionen (Cs^+) werden in die Oktaederlücken eingefügt, wodurch ein hexagonales ($x \sim 0,32$) oder kubisches ($x \sim 1$) Kristallsystem entsteht. Die hexagonale Struktur (Raumgruppe $P6_3/mcm$) weist einen eindimensionalen Tunnel auf, der die Migration von Cäsiumionen begünstigt, während die kubische Struktur ($Pm\bar{3}m$) kompakter ist und die elektrischen Eigenschaften beeinträchtigt.

- **Strukturelle Merkmale :**
 - **WO₆-Oktaeder :** Wolfram (W^{6+}) bildet ein Oktaeder mit sechs Sauerstoffatomen (O^{2-}), und die WO-Bindungslänge beträgt $\sim 1,9\text{ \AA}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Cäsiumdotierung** : Cs⁺ (Radius ~1,88 Å) besetzt hexagonale Tunnel oder kubische Zwischengitterplätze, wobei der x-Wert die Struktur und die Eigenschaften bestimmt.
- **Gitterparameter** : hexagonales Cs_{0,32}WO₃, a~7,4 Å, c~7,6 Å; kubisches CsWO₃, a~3,8 Å.
- **Einfluss der Partikelgröße** : Nanopartikel (~20 nm) sind aufgrund von Oberflächeneffekten leicht verzerrt, mit einer Gitterspannung von ~0,5 %.
- **Chemische Bindungseigenschaften** :
 - **WO-Bindung** : Kovalent-ionische Mischbindung, die eine hohe chemische Stabilität verleiht (Korrosionsrate <0,001 mm/Jahr).
 - **Cs-O-Bindung** : Schwache ionische Bindung, Cs⁺ kann teilweise wandern, was die Leitfähigkeit beeinträchtigt (~10³ S/cm).
 - **Lokalisierte Elektronen** : Gemischte Valenzzustände W⁵⁺ / W⁶⁺ erzeugen freie Elektronen und verstärken die NIR-Absorption.

Röntgenbeugungsanalysen (XRD) zeigen, dass die hexagonale Struktur von Cs_{0,32}WO₃ der kubischen Struktur hinsichtlich NIR-Abschirmung und Leitfähigkeit überlegen ist, da ihr Tunneleffekt das dynamische Verhalten von Elektronen und Ionen fördert. Durch Anpassung des Dotierungsverhältnisses (x) kann die Leistung optimiert werden. Beispielsweise erreicht die NIR-Absorptionsrate bei x=0,32 ca. 70 %, während bei x=0,5 die Leitfähigkeit um ca. 15 % verbessert wird.

2.2 Optische Eigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze: Absorption und Transmission im nahen Infrarot

Cäsium-Wolfram-Bronze ist für ihre NIR-Absorption und Durchlässigkeit für sichtbares Licht bekannt, was ihr einzigartige Vorteile bei intelligenten Fensterfolien und der Umwandlung von Licht in Wärme verleiht.

- **Absorption im nahen Infrarotbereich** :
 - **Mechanismus** : Lokalisierte Oberflächenplasmonenresonanz (LSPR) und elektronische Übergänge zwischen W⁵⁺ / W⁶⁺ führen zu starker NIR-Absorption (800–2500 nm).
 - **Leistung** : Cs_{0,32}WO₃-Nanopartikel (~20 nm) haben eine Absorptionsrate von ~70 % bei 1000 nm, was besser ist als ITO (~40 %).
 - **Einflussfaktoren** : Mit zunehmendem x-Wert (0,1→0,32) verschiebt sich der Absorptionspeak um ~200 nm in Richtung Rot; mit abnehmender Partikelgröße (50→20 nm) erhöht sich die Absorption um ~10 %.
- **Durchlässigkeit für sichtbares Licht** :
 - **Transmission** : Im Bereich von 400–700 nm beträgt die Transmission des Cs_xWO₃-Films (Dicke ~100 nm) ~80 %, was für Energiesparglas geeignet ist.
 - **Elektrochrom** : Bei angelegter Spannung (~2 V) kann die Transmission für dynamisches Dimmen auf ~60 % eingestellt werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Stabilität** : Nach UV-Alterung (1000 h) beträgt der Transmissionsabfall <5 %.
- **Anwendungspotential** :
 - Intelligente Fensterfolie: NIR-Abschirmrate ~70 %, wodurch der Energieverbrauch des Gebäudes um ~50 % gesenkt wird.
 - Photothermische Umwandlung: Absorptionseffizienz der Sonnenenergie ~60 % für das Wärmemanagement.

Ultraviolett-sichtbares Nahinfrarot (UV-Vis-NIR)-Spektroskopie zeigt, dass die Bandlücke von Cs_xWO₃ mit ca. 2,5–3,0 eV niedriger ist als die von WO₃ (ca. 3,2 eV), was die NIR- Reaktion verstärkt. Im Vergleich zu VO₂ (Phasenübergangstemperatur ca. 68 °C) ist Cs_xWO₃ bei hohen Temperaturen stabiler und eignet sich für ein breites Spektrum an Klimabedingungen.

2.3 Elektrische Eigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze: Leitfähigkeit und Ladungsträgermigration

Die Eigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze beruhen auf seinen Halbleitereigenschaften und freien Elektronen, wodurch es sich für Sensoren und Batterieelektroden eignet.

- **Leitfähigkeit** :
 - **Wert** : Die Leitfähigkeit des Cs_{0,32}WO₃-Dünnschicht (Dicke ~100 nm) beträgt ~10³ S/cm, was niedriger ist als bei Graphen (~10⁶ S/cm), aber höher als bei WO₃ (~10 S/cm).
 - **Mechanismus** : Der gemischte Valenzzustand W⁵⁺/W⁶⁺ und die Cs⁺-Dotierung führen freie Elektronen mit einer Trägerkonzentration von ~10²⁰ cm⁻³ ein.
 - **Einflussfaktoren** : Mit steigendem x-Wert (0,1→0,5) erhöht sich die Leitfähigkeit um ~20 %, bei einer Temperaturerhöhung auf 300 °C verringert sich die Leitfähigkeit um ~10 %.
- **Carriermigration** :
 - **Mobilität** : Elektronenmobilität ~10 cm²/(V·s), beeinflusst durch Korngrenzenstreuung.
 - **Typ** : n-Typ-Halbleiter, Elektronen sind die dominierenden Träger.
 - **Test** : Hall-Effekt-Messungen zeigen, dass die Trägerlebensdauer von Cs_{0,32}WO₃ ~1 ps beträgt .
- **Anwendungspotential** :
 - **Sensor** : Cs_xWO₃-Dünnschicht erkennt NO₂ (~10 ppm) mit einer Reaktionszeit von <5 s.
 - **Batterieelektrode** : Lithium-Ionen-Batterie, Leitfähigkeit unterstützt eine Zyklenlebensdauer von ca. 1000 Mal.

Vier-Sonden-Messungen zeigen, dass die Leitfähigkeit von Nanopartikeln (~20 nm) aufgrund eines um ca. 30 % höheren Korngrenzenwiderstands geringer ist als die von Dünnschichten (~100 nm). Optimierte Dotierung (x~0,32) und Tempern (~400 °C) können die Leistung verbessern.

2.4 Thermische Eigenschaften von Cäsium-Wolfram-Bronze: Wärmeleitfähigkeit und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stabilität

Cäsium-Wolfram-Bronze weist eine geringe Wärmeleitfähigkeit und eine hohe Wärmestabilität auf und eignet sich daher für Wärmemanagement und Hochtemperaturanwendungen.

- **Wärmeleitfähigkeit :**
 - **Wert :** Die Wärmeleitfähigkeit von Cs_{0,32}WO₃ (~20 nm) beträgt ~1,5 W/(m·K) und ist damit niedriger als die von WO₃ (~3 W/(m·K)).
 - **Mechanismus :** Phononenstreuung und Nanogrößeneffekt verringern die Wärmeleitfähigkeit.
 - **Einflussfaktoren :** Mit steigendem x-Wert (0,1→0,5) steigt die Wärmeleitfähigkeit um ~10 %, mit steigender Partikelgröße (20→50 nm) steigt die Wärmeleitfähigkeit um ~15 %.
- **Thermische Stabilität :**
 - **Temperaturbereich :** Cs_xWO₃ ist bei <500 °C stabil, der Sauerstoffverlust beträgt ~5 % bei >600 °C.
 - **Oxidationsbeständigkeit :** 500 °C in Luft, Oxidationsrate <0,01 mg/cm²·h.
 - **Wärmeausdehnung :** Der Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt ~8×10⁻⁶ K⁻¹ und ist damit niedriger als der von ITO (~10×10⁻⁶ K⁻¹).
- **Anwendungspotential :**
 - **Wärmemanagement :** Geringe Wärmeleitfähigkeit für Wärmedämmschichten, wodurch die Temperatur um ca. 10 °C gesenkt wird.
 - **Hochtemperaturelektroden :** Batterieelektroden sind bei 400 °C stabil, mit einer Zyklusleistungsverschlechterung von <5 %.

Die Differenzialkalorimetrie (DSC) zeigte, dass die thermische Zersetzungstemperatur von Cs_xWO₃ bei ca. 650 °C liegt und damit besser ist als die von VO₂ (Phasenübergang ca. 68 °C). Die thermogravimetrische Analyse (TGA) bestätigte die hohe Temperaturstabilität und Eignung für raue Umgebungen.

2.5 Theoretische Berechnung und Leistungsvorhersage von Cäsium-Wolfram-Bronze

Theoretische Berechnungen liefern Hinweise zur Leistungsoptimierung von Cs_xWO₃ unter Verwendung von Methoden der Dichtefunktionaltheorie (DFT) und der Molekulardynamik (MD).

- **DFT-Berechnungen :**
 - **Bandlücke :** Cs_{0,32}WO₃-Bandlücke ~2,5 eV, W⁵⁺/W⁶⁺-Zustand verstärkt NIR-Absorption.
 - **Elektronische Struktur :** Cs⁺-Dotierung senkt das Fermi-Niveau um ~0,5 eV und erhöht die Trägerkonzentration um ~10²⁰cm⁻³.
 - **Optische Eigenschaften :** Der simulierte NIR-Absorptionspeak liegt bei ~1000 nm, was mit dem Experiment übereinstimmt (Fehler <5 %).
- **MD-Simulation :**
 - **Wärmeleitfähigkeit :** aufgrund der Phononenstreuung vorhergesagt ~1,5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W/(m·K).

- **Stabilität** : Cs⁺ hat eine Mobilität von $\sim 10^{-8}$ cm²/s bei 500 °C und behält seine strukturelle Integrität.
- **Leistungsvorhersage** :
 - **Dotierungsoptimierung** : x=0,4 kann die Leitfähigkeit um ~ 25 % und die NIR-Absorption um ~ 10 % erhöhen.
 - **Nanodesign** : Partikelgröße <10 nm, LSPR verstärkte Absorption ~ 15 %.
 - **Verbundmaterial** : Cs_xWO₃/TiO₂-Verbundwerkstoff, photokatalytische Effizienz um ~ 30 % erhöht.

Fallbeispiel: CTIA GROUP LTD optimierte Cs_{0,32}WO₃-Dünnschicht mittels DFT, wobei die NIR-Abschirmrate ca. 75 % erreichte und die Kosten um ca. 20 % (ca. 400 USD/kg) reduziert wurden. Die Berechnungsergebnisse dienen der Entwicklung grüner Synthese und intelligenter Anwendungen.

Die Genauigkeit des theoretischen Modells (Fehler <5 %) bildet die Grundlage für die Leistungsregulierung von Cs_xWO₃. Zukünftig werden KI und Big Data kombiniert, um die Vorhersagegenauigkeit weiter zu verbessern.



Kapitel 3: Synthesemethode für Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsiumwolframbronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) ist ein Hochleistungsnanomaterial, dessen Nahinfrarotabsorption ($\sim 70\%$ bei 1000 nm), Leitfähigkeit ($\sim 10^3\text{ S/cm}$) und chemische Stabilität von der präzisen Kontrolle des Syntheseverfahrens abhängen. Das Syntheseverfahren bestimmt die Kristallstruktur (hexagonal oder kubisch), Partikelgröße ($\sim 10\text{--}50\text{ nm}$), Dotierungsrate ($x \sim 0,1\text{--}1$) und Leistung (wie z. B. NIR-Abschirmrate $\sim 70\%$) von Cs_xWO_3 . In diesem Kapitel werden fünf wichtige Syntheseverfahren im Detail erörtert: Festphasenreaktionsverfahren, Solvothermalverfahren und Hydrothermalverfahren, chemische Gasphasenabscheidung (CVD), Sol-Gel-Verfahren sowie grüne Synthese und Nanopartikelkontrolle, und es werden deren Reaktionsmechanismus, Prozessparameter, Geräteanforderungen, Ausbeute, Kosten, Vor- und Nachteile sowie Anwendungsszenarien analysiert und technische Referenzen für Forschung und Industrialisierung bereitgestellt.

3.1 Festkörperreaktionsmethode von Cäsium-Wolfram-Bronze

Die Festphasenreaktion ist ein Hochtemperatursyntheseverfahren, das Cs_xWO_3 durch direkte Reaktion fester Rohstoffe herstellt. Es eignet sich für die Massen- und Pulverproduktion. Vorteile sind die einfache Ausrüstung und die hohe Ausbeute, allerdings ist die Partikelgröße ($\sim 1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$) groß, was die Herstellung von Nanopartikeln erschwert.

- **Reaktionsmechanismus :**
 - **Chemische Gleichung :** $Cs_2CO_3 + WO_3 \rightarrow Cs_xWO_3 + CO_2\uparrow$ ($x \sim 0,1\text{--}0,32$)
 - **Prozess :** Cs_2CO_3 zersetzt sich und setzt Cs^+ frei, das sich mit dem WO_6 -Oktaeder in WO_3 verbindet. Cs^+ wird in den hexagonalen Tunnel eingefügt und bildet Cs_xWO_3 . Hohe Temperaturen ($\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$) fördern die Diffusion, und W^{6+} wird teilweise zu W^{5+} reduziert, wodurch freie Elektronen entstehen.
 - **Nebenreaktion :** Zu hohe Temperaturen ($> 1000\text{ }^\circ\text{C}$) führen zur Verflüchtigung von Cs und der x-Wert sinkt um $\sim 10\%$.
- **Prozessparameter :**
 - **Rohstoffe :** Cs_2CO_3 (Reinheit $> 99,5\%$), WO_3 ($> 99,9\%$), Molverhältnis 1:3–1:10.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Temperatur** : 700–900 °C, Rampenrate ~10 °C/min.
- **Atmosphäre** : Inert (Ar) oder reduzierend (H₂/ Ar , 5 % H₂), Oxidation verhindern.
- **Zeit** : 4–8 Stunden, Kühlrate ~5 °C/min.
- **Ausrüstung** : Rohrofen (Temperaturbeständigkeit > 1200 °C), Aluminiumoxidtiegel.
- **Ertrag und Kosten** :
 - **Ausbeute** : ~90 % (Massenbasis), ~1–10 kg pro Charge.
 - **Kosten** : ~200 USD/kg, ~60 % Rohstoffe, ~30 % Energie.
- **Leistung** :
 - **Partikelgröße** : ~1–10 μm , Oberfläche ~5 m²/g.
 - **Reinheit** : >99,5 %, Verunreinigungen (Fe, Si) <0,01 Gew.-%.
 - **NIR-Absorption** : ~50 % bei 1000 nm, unterhalb der Nanometerskala (~70 %).
 - **Elektrische Leitfähigkeit** : ~500 S/cm, beeinflusst durch Korngrenzen.
- **Vor- und Nachteile** :
 - **Vorteile** : Der Prozess ist ausgereift, für die Industrialisierung geeignet und die Ausrüstungskosten sind niedrig (~10.000 USD).
 - **Nachteile** : große Partikelgröße, schwache NIR-Leistung, Cs-Verflüchtigung führt zu ungleichmäßigem x-Wert (Fehler ~5 %).
 - **Verbesserung** : Durch Zugabe von Additiven (wie Li₂CO₃) wird die Reaktionstemperatur um ca. 100 °C gesenkt, und durch die Kugelmahlbehandlung wird die Partikelgröße um ca. 50 % verringert.
- **Anwendung** :
 - Massenelektrode: Batterieelektrode, Zyklenlebensdauer ~800 Mal.
 - Grobes Pulver: Wärmemanagementbeschichtung, Kühlung ~5°C.

Die Festphasenreaktionsmethode eignet sich für eine kostengünstige Produktion im großen Maßstab, muss jedoch optimiert werden, um den Anforderungen im Nanomaßstab gerecht zu werden.

3.2 Solvothermale und hydrothermale Verfahren zur Herstellung von Cäsium-Wolfram-Bronze

Solvothermale und hydrothermale Verfahren synthetisieren Cs_xWO₃-Nanopartikel (~10–50 nm) durch Flüssigphasenreaktionen bei hohen Temperaturen und hohem Druck. Diese sind für ihre hohe spezifische Oberfläche (~80 m²/g) und ihre hervorragende NIR-Leistung (~70 %) bekannt. Das hydrothermale Verfahren verwendet Wasser als Lösungsmittel, während das solvothermale Verfahren organische Lösungsmittel (wie Ethanol) verwendet.

- **Reaktionsmechanismus** :
 - **Chemische Gleichung** : $\text{CsOH} + \text{WCl}_6 + \text{H}_2\text{O}/\text{ROH} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{HCl}\uparrow$ (x~0,2–0,5)
 - **Hydrothermale Methode** : CsOH liefert Cs⁺, WCl₆ hydrolysiert zu WO₆-Einheiten und Cs⁺ wird bei 180–220 °C in die hexagonale Struktur eingefügt.
 - **Solvothermale Methode** : Ethanol reduziert die Oberflächenspannung, kontrolliert

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Partikelgröße <20 nm und erhöht das W⁵⁺-Verhältnis um ~15 %.

- **Schlüssel** : pH ~8–10, reguliert die Cs⁺-Einfügungseffizienz ~90 %.
- **Prozessparameter** :
 - **Rohstoffe** : CsOH (>99,5 %), WCl₆ (>99,9 %), Lösungsmittel (deionisiertes Wasser oder Ethanol, >99,8 %).
 - **Temperatur** : hydrothermal 180–220 °C, solvothermal 150–200 °C.
 - **Druck** : 1–5 MPa, geschlossener Reaktor.
 - **Zeit** : 12–24 h, Rührgeschwindigkeit ~200 U/min.
 - **Ausrüstung** : Edelstahlreaktor (Volumen ~1–100 L), Druckfestigkeit >10 MPa.
- **Ertrag und Kosten** :
 - **Ausbeute** : ~85 % (hydrothermal), ~80 % (solvothermal), ~0,1–1 kg pro Charge.
 - **Kosten** : hydrothermal ~400 USD/kg, thermisches Lösungsmittel ~500 USD/kg, Lösungsmittelanteil ~40 %.
- **Leistung** :
 - **Partikelgröße** : hydrothermal ~20–50 nm, solvothermal ~10–20 nm.
 - **Reinheit** : >99,8 %, Cl⁻-Rest < 0,005 Gew.-%.
 - **NIR-Absorption** : ~70 % bei 1000 nm, Transmission ~80 % (400–700 nm).
 - **Leitfähigkeit** : ~800 S/cm, besser als Festphasenmethode.
- **Vor- und Nachteile** :
 - **Vorteile** : Partikelgröße im Nanomaßstab, hohe NIR-Leistung, steuerbare Morphologie (Stäbchen, Kugeln).
 - **Nachteile** : Komplexe Ausrüstung (~50.000 USD), hohe Kosten für die Abfallbehandlung (~10 %).
 - **Verbesserungen** : Zugabe von Tensiden (wie PVP) zur Kontrolle der Partikelgrößenverteilung (<5 % Fehler), Recycling von Lösungsmitteln zur Kostensenkung um ~20 %.
- **Anwendung** :
 - Intelligente Fensterfolie: NIR-Abschirmrate ~70 %, Energieeinsparung ~50 %.
 - Photokatalyse: Wasserstoffproduktionseffizienz ~200 µmol / (g·h).

Die hydrothermale Methode ist kostengünstiger, während die solvothermale Methode eine kleinere Partikelgröße aufweist, die für hohe Leistungsanforderungen geeignet ist.

3.3 Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) von Cäsium-Wolfram-Bronze

Bei der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) werden dünne Cs_xWO₃-Filme (Dicke ca. 10–100 nm) durch Vorläuferreaktionen in der Dampfphase abgeschieden, die sich für elektronische und optische Geräte eignen. Sie zeichnet sich durch Filmgleichmäßigkeit und hohe Reinheit (> 99,9 %) aus.

- **Reaktionsmechanismus** :
 - **Chemische Gleichung** : $\text{CsCl (g)} + \text{WOCl}_4(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3(\text{s}) + \text{HCl}\uparrow$
(x~0,1–0,32)
 - **Verfahren** : CsCl und WOCl₄ werden bei 400–600 °C verdampft, H₂O liefert

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sauerstoff, Cs⁺ und WO₆ bilden auf einem Substrat (z. B. Glas) Keime und das W⁵⁺-Verhältnis beträgt ca. 10 %.

- **Nebenreaktion** : Zu hohe Temperaturen (> 700 °C) führen zur WO₃-Ausfällung und der x-Wert sinkt um ~5 %.
- **Prozessparameter** :
 - **Vorläufer** : CsCl (>99,9 %), WOCl₄ (>99,8 %), H₂O (ultrarein).
 - **Temperatur** : 400–600 °C für Substrat, ~800 °C für Reaktionskammer.
 - **Atmosphäre** : Ar /H₂ (5 % H₂), Durchflussrate ~100 sccm .
 - **Druck** : 0,1–10 Torr.
 - **Ausrüstung** : CVD-Reaktor (Heißwand oder Kaltwand), Vakuumpumpe (<0,01 Torr).
- **Ertrag und Kosten** :
 - **Ausbeute** : ~95 % (Ablagerungseffizienz), ~0,01–0,1 kg pro Charge.
 - **Kosten** : ~1000 USD/kg, ~50 % für Ausrüstung.
- **Leistung** :
 - **Dicke** : 10–100 nm, Gleichmäßigkeit <5 % Fehler.
 - **Reinheit** : >99,9 %, Verunreinigung (Cl) <0,001 Gew.- %.
 - **NIR-Absorption** : ~75 % bei 1000 nm, Transmission ~85 % (400–700 nm).
 - **Leitfähigkeit** : ~1200 S/cm, besser als Pulver.
- **Vor- und Nachteile** :
 - **Vorteile** : Hochwertige Folie, geeignet für Präzisionsgeräte, hervorragende NIR-Leistung.
 - **Nachteile** : hohe Kosten, geringe Ausbeute, Substratbeschränkung (Temperaturbeständigkeit > 400 °C erforderlich).
 - **Verbesserung** : Plasmaunterstützte CVD (PECVD) reduziert die Temperatur um ~100 °C und erhöht die Effizienz um ~15 %.
- **Anwendung** :
 - 6G-Antenne: Übertragungsrate ~10 Gbit/s.
 - Elektrochromes Gerät: Reaktionszeit <1 s.

CVD eignet sich für Filme mit hoher Wertschöpfung, für seine Förderung müssen jedoch die Kosten gesenkt werden.

3.4 Sol-Gel-Verfahren für Cäsium-Wolfram-Bronze

Das Sol-Gel-Verfahren stellt Cs_xWO₃-Nanopartikel oder -Filme durch chemische Reaktionen in der Flüssigphase her. Es bietet die Vorteile niedriger Temperaturen und Morphologiekontrolle und eignet sich für die Produktion im Labor sowie im kleinen und mittleren Maßstab.

- **Reaktionsmechanismus** :
 - **Chemische Gleichung** : $\text{CsNO}_3 + \text{W}(\text{OC}_2\text{H}_5)_6 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \uparrow$
(x ~ 0,2–0,4)
 - **Verfahren** : W(OC₂H₅)₆ wird hydrolysiert, um WO₆-Gel zu bilden, CsNO₃ liefert Cs⁺ und wird bei 300–500 °C kalziniert, um Cs_xWO₃-Nanopartikel oder -

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Filme zu bilden.

- **Legende** : Kontrollieren Sie die Hydrolyserate (pH ~7–9), um eine WO₃-Ausfällung zu vermeiden.
- **Prozessparameter** :
 - **Rohstoffe** : CsNO₃ (>99,5 %), W(OC₂H₅)₆ (>99,8 %), Ethanol/Wasser-Lösungsmittelgemisch.
 - **Temperatur** : 25–60 °C für die Hydrolyse, 300–500 °C für die Kalzinierung.
 - **Zeit** : 2–4 Stunden für die Gelierung und 4–6 Stunden für die Kalzinierung.
 - **Ausrüstung** : Wasserbad mit konstanter Temperatur, Kammerofen, Spincoater (Dünnschicht).
- **Ertrag und Kosten** :
 - **Ausbeute** : ~90 %, ~0,1–0,5 kg pro Charge.
 - **Kosten** : ~600 USD/kg, davon ~70 % Rohstoffe.
- **Leistung** :
 - **Partikelgröße** : ~15–30 nm (Pulver), Dicke ~50–200 nm (dünner Film).
 - **Reinheit** : >99,7 %, C-Rückstand <0,01 Gew.- %.
 - **NIR-Absorption** : ~65 % bei 1000 nm, Transmission ~80 %.
 - **Leitfähigkeit** : ~700 S/cm.
- **Vor- und Nachteile** :
 - **Vorteile** : Niedertemperaturverfahren, einfache Ausrüstung (~5.000 USD), verschiedene Formen (Pulver, Film).
 - **Nachteile** : organische Rückstände, etwas geringere Reinheit und hoher Energieverbrauch beim Kalzinieren.
 - **Verbesserung** : Mikrowellenunterstützte Kalzinierung, Zeit um ~50 % reduziert, Reinheit um ~0,2 % erhöht.
- **Anwendung** :
 - Photokatalysator: Zersetzt Farbstoffe mit einer Effizienz von ~85 %.
 - Energiesparende Beschichtung: NIR-Abschirmrate ~65 %.

Das Sol-Gel-Verfahren ist hochflexibel und eignet sich für Forschung und Entwicklung sowie kundenspezifische Produktion.

3.5 Grüne Synthese und Nanopartikelkontrolle von Cäsium-Wolfram-Bronze

Durch die grüne Synthese werden Cs_xWO₃-Nanopartikel (<20 nm) mithilfe umweltfreundlicher Rohstoffe und Prozesse mit geringem Energieverbrauch hergestellt. Dabei wird Wert auf Nachhaltigkeit und Kontrolle im Nanomaßstab gelegt, um das Ziel der CO₂-Neutralität bis 2030 zu erreichen.

- **Reaktionsmechanismus** :
 - **Chemische Gleichung** : $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + (\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{NH}_3\uparrow$ ($x \sim 0,2-0,32$)
 - **Verfahren** : (NH₄)₁₀W₁₂O₄₁ wird als umweltfreundliche Wolframquelle verwendet, Cs₂CO₃ liefert Cs⁺ und eine hydrothermale oder

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mikrowellenunterstützte Reaktion bei niedriger Temperatur (<200 °C) wird verwendet, um die Partikelgröße auf ~10–20 nm zu kontrollieren.

- **Schlüssel** : Bio-Template (z. B. Zellulose) oder Ultraschall-unterstützt, Partikelgrößenverteilung <5 %.
- **Prozessparameter** :
 - **Rohstoffe** : Cs₂CO₃ (>99,5 %), (NH₄)₁₀W₁₂O₄₁ (>99,8 %), deionisiertes Wasser.
 - **Temperatur** : 100–200 °C (hydrothermal), 80–120 °C (Mikrowelle).
 - **Zeit** : 6–12 Stunden (hydrothermal), 0,5–2 Stunden (Mikrowelle).
 - **Ausrüstung** : Mikrowellenreaktor (~1000 W), Ultraschallreiniger (~500 W).
- **Ertrag und Kosten** :
 - **Ausbeute** : ~80 %, ~0,05–0,5 kg pro Charge.
 - **Kosten** : ~450 USD/kg, ~20 % Energie.
- **Leistung** :
 - **Partikelgröße** : ~10–20 nm, Oberfläche ~100 m²/g.
 - **Reinheit** : >99,8 %, NH₄⁺-Restgehalt <0,005 Gew.-%.
 - **NIR-Absorption** : ~72 % bei 1000 nm, Transmission ~82 %.
 - **Leitfähigkeit** : ~900 S/cm.
- **Grüne Funktionen** :
 - **CO₂-Fußabdruck** : ~0,3 Tonnen CO₂/Tonne, niedriger als bei herkömmlicher Hydrothermaltechnik (~0,5 Tonnen).
 - **Abfallflüssigkeit** : NH₃-Rückgewinnungsrate > 95 %, Wasserrecycling ~ 80 %.
 - **Energieverbrauch** : Die Mikrowellenmethode ist ca. 50 % niedriger als die hydrothermale Methode (ca. 100 kWh/kg).
- **Vor- und Nachteile** :
 - **Vorteile** : Umweltschutz, geringer Energieverbrauch, kleine Partikelgröße und hervorragende Leistung.
 - **Nachteile** : Etwas geringerer Ertrag, hohe Ausrüstungsinvestition (~20.000 USD).
 - **Verbesserung** : KI optimiert Reaktionsparameter, erhöht die Ausbeute um ca. 10 % und senkt die Kosten um ca. 15 %.
- **Fall** : Im Jahr 2024 verwendete CTIA GROUP LTD eine mikrowellenunterstützte grüne Synthese, um Cs_{0,32}WO₃ (~15 nm) mit einer NIR-Abschirmrate von ~72 % und einem CO₂-Fußabdruck von ~0,3 Tonnen CO₂/Tonne herzustellen, das in umweltfreundlichen Fensterfolien für Gebäude verwendet wurde.
- **Anwendung** :
 - Luftreinigung: VOC-Adsorption, Effizienz ~90 %.
 - Wasserstoffspeicher: Kapazität ~1,5 Gew.-%.

Die grüne Synthese stellt den Zukunftstrend dar und wird in Kombination mit der Nano-Kontrolltechnologie die nachhaltige Industrialisierung von Cs_xWO₃ fördern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2-0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.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

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



Kapitel 4: Charakterisierungstechnologie von Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsiumwolframbronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) ist ein multifunktionales Nanomaterial, dessen Eigenschaften (z. B. Nahinfrarotabsorption $\sim 70\%$ bei 1000 nm , Leitfähigkeit $\sim 10^3\text{ S/cm}$, thermische Stabilität $> 500\text{ }^\circ\text{C}$) auf der genauen Charakterisierung der Kristallstruktur, Morphologie, des chemischen Zustands und der physikalischen Eigenschaften beruhen. In diesem Kapitel werden fünf wichtige Charakterisierungstechniken im Detail erörtert: Röntgenbeugung (XRD) und Kristallanalyse, Rasterelektronenmikroskopie (SEM) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM), Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) und chemischer Zustand, UV-Vis-NIR-Spektroskopie sowie elektrische und thermische Testmethoden. Jede Technik umfasst Prinzipien, Instrumente, Probenvorbereitung, Datenanalyse, quantitative Ergebnisse, Anwendungen und Einschränkungen und bietet technische Unterstützung für die Untersuchung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen und die Qualitätskontrolle von Cs_xWO_3 .

4.1 Röntgenbeugung (XRD) und Kristallanalyse von Cäsium-Wolfram-Bronze

Die Röntgenbeugung (XRD) ist die wichtigste Methode zur Charakterisierung der Kristallstruktur und Phasenreinheit von Cs_xWO_3 . Die Gitterparameter und Dotierungseffekte werden durch das Interferenzmuster der Röntgenstreuung mit Kristallatomen analysiert.

- **Prinzip :**
 - XRD basiert auf dem Bragg'schen Gesetz ($2d\sin\theta = n\lambda$), wobei d der Interplanarabstand, θ der Einfallswinkel und λ die Röntgenwellenlänge ($Cu\ K\alpha$, $\sim 1,5406\text{ \AA}$) ist.
 - Die hexagonale ($P63/mcm$, $x\sim 0,32$) oder kubische ($Pm3m$, $x\sim 1$) Struktur von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CsxWO₃ erzeugt charakteristische Beugungspeaks, wie beispielsweise den (002)-Peak bei ~23,5° (hexagonal).

- **Instrumente und Parameter :**
 - **Instrument :** Röntgendiffraktometer (z. B. Bruker D8 Advance), ausgestattet mit einer Cu-K α -Quelle (40 kV, 40 mA).
 - **Scanbereich :** $2\theta = 10\text{--}80^\circ$, Schrittweite $\sim 0,02^\circ$, Scangeschwindigkeit $\sim 0,5^\circ/\text{min}$.
 - **Probenvorbereitung :** CsxWO₃-Pulver (~ 10 mg) wird auf einen Silizium-Wafer ohne Hintergrund geglättet, oder ein dünner Film wird direkt auf ein Substrat (z. B. Glas) aufgebracht.
 - **Umgebung :** Raumtemperatur, Luft oder inerte Atmosphäre (Oxidation vermeiden).
- **Datenanalyse :**
 - **Kristallstruktur :** hexagonale Struktur von Cs_{0,32}WO₃, $a \sim 7,4 \text{ \AA}$, $c \sim 7,6 \text{ \AA}$; (002)- und (200)-Peaks bestätigen die hexagonale Phase.
 - **Dotierungseffekt :** Mit zunehmendem x (0,1 \rightarrow 0,5) verschiebt sich der (002)-Peak um $\sim 0,1^\circ$ und das Gitter dehnt sich aufgrund von Cs⁺ um $\sim 0,2 \%$ aus (1,88 \AA).
 - **Korngröße :** Scherrer-Formel ($D = K\lambda / \beta \cos\theta$), CsxWO₃-Nanopartikel ~ 20 nm, $\beta \sim 0,4^\circ$.
 - **Phasenreinheit :** Verunreinigungsphase (wie WO₃) Peak $< 5 \%$ Intensität, Reinheit $> 99,5 \%$.
- **Quantitative Ergebnisse :**
 - **Gitterspannung :** $\sim 0,5 \%$ (Nanopartikel), aufgrund von Oberflächeneffekten.
 - **Phasenverhältnis :** hexagonale Phase $\sim 95 \%$ (x=0,32), kubische Phase $\sim 5 \%$ (Hochtemperatursynthese).
 - **Defektdichte :** $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, beeinträchtigt die Leitfähigkeit um $\sim 10 \%$.
- **Anwendung :**
 - Strukturbestätigung: Überprüfung der hexagonalen Konsistenz der hydrothermalen Methode (~ 20 nm) und CVD-Filme (~ 100 nm).
 - Qualitätskontrolle: Erkennen Sie die Cs-Verflüchtigung (x-Fehler $< 5 \%$) und stellen Sie eine NIR-Leistung von $\sim 70 \%$ sicher.
- **Einschränkung :**
 - Begrenzte Auflösung: Kleine Körner (< 10 nm) haben verbreiterte Spitzen, $\sim 10 \%$ Fehler.
 - Der amorphe Zustand ist schwer zu erkennen: TEM ist erforderlich.
 - Kosten: Instrument ~ 200.000 USD, Wartung ~ 10.000 USD/Jahr.

XRD liefert hochpräzise Daten zur Kristallstruktur von CsxWO₃, die die Grundlage für die Syntheseoptimierung bilden.

4.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) von Cäsium-Wolfram-Bronze

Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) wurden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verwendet, um die Morphologie, Partikelgröße und Mikrostruktur von CsxWO₃ zu charakterisieren. REM analysierte die Oberfläche, und TEM enthüllte die inneren Details auf atomarer Ebene.

- **Prinzip :**

- **SEM :** Ein Elektronenstrahl (~5–20 kV) tastet die Probe ab und es werden Bilder mithilfe von Sekundär- oder Rückstreuelektronen mit einer Auflösung von ~1 nm aufgenommen.
- **TEM :** Hochenergetische Elektronen (~200 kV) werden durch die Probe geleitet und es wird eine Beugungs- oder Phasenkontrastbildgebung mit einer Auflösung von ~0,1 nm durchgeführt.
- CsxWO₃-Nanopartikel (~10–50 nm) oder dünne Filme (~100 nm) weisen stabförmige, kugelförmige oder facettierte Merkmale auf.

- **Instrumente und Parameter :**

- **SEM-Instrument :** z. B. FEI Quanta 650, Feldemissionskanone, ausgestattet mit EDS (energiedispersives Spektrometer).
- **TEM-Instrument :** z. B. JEOL JEM-2100F, Beschleunigungsspannung 200 kV, ausgestattet mit SAED (Selected Area Electron Diffraction).
- **Probenvorbereitung :**
 - SEM: Auf leitfähigem Band verteiltes Pulver oder dünner Film, der direkt auf das Substrat aufgebracht wird.
 - TEM: Pulver wird per Ultraschall in Ethanol dispergiert und auf ein Kupfergitter aus Kohlenstofffilm getropft; der Film muss per FIB (fokussierter Ionenstrahl) geschnitten werden.
- **Umgebung :** Hochvakuum (<10⁻⁵ Torr), TEM erfordert Kühlung mit flüssigem Stickstoff.

- **Datenanalyse :**

- **SEM :**
 - **Morphologie :** CsxWO₃-Hydrothermalpartikel ~20 nm, stabförmig (Seitenverhältnis ~2:1); CVD-Film ist gleichmäßig, Rauheit ~5 nm.
 - **EDS :** Atomverhältnis Cs:W:O ~0,32:1:3, Fehler <2 %, was das Dotierungsverhältnis bestätigt.
 - **Partikelgrößenverteilung :** ~10–50 nm, Standardabweichung ~5 nm.
- **TEM :**
 - **Hohe Auflösung (HRTEM) :** (002) Kristallebenenabstand ~0,38 nm, hexagonale Phase.
 - **SAED :** Hexagonales Gitter, (002), (200) Beugungsringe, Konsistenz der Kristallorientierung >95 %.
 - **Defekte :** Versetzungsdichte ~10¹⁰ cm⁻², beeinträchtigt die Leitfähigkeit um ~5 %.

- **Quantitative Ergebnisse :**

- **Oberfläche :** SEM-Schätzung ~80 m²/g (~20 nm Partikel), im Einklang mit BET.
- **Korngrenze :** TEM zeigt, dass die Breite der Korngrenze ca. 1 nm beträgt, was die Trägermigration um ca. 10 % beeinflusst.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Elementverteilung** : EDS-Mapping, Cs ist gleichmäßig verteilt, Abweichung <3 %.
- **Anwendung** :
 - Morphologieoptimierung: SEM-gesteuerte solvothermische (~10 nm) Partikelkontrolle.
 - Strukturelle Überprüfung: TEM bestätigte die hexagonale Phase des CVD-Films, NIR-Leistung ~75 %.
 - Qualitätsprüfung: EDS-Erkennung von Verunreinigungen (Fe, Cl) <0,01 Gew. %.
- **Einschränkung** :
 - SEM: Hauptsächlich Oberflächeninformationen, innere Struktur erfordert TEM.
 - TEM: komplexe Probenvorbereitung (FIB ~ 500 USD/Probe), Elektronenstrahlschädigung Cs_xWO₃ ~ 5 %.
 - Kosten: SEM ~ 300.000 USD, TEM ~ 1.000.000 USD.

Die Kombination von SEM und TEM bietet eine umfassende Perspektive für die Charakterisierung von Cs_xWO₃ im Nanomaßstab.

4.3 Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) und chemischer Zustand von Cäsium-Wolfram-Bronze

Mithilfe der Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) werden der chemische Zustand der Oberfläche, die Elementzusammensetzung und der Valenzzustand von Cs_xWO₃ analysiert, wodurch die Auswirkung von W⁵⁺/W⁶⁺ auf die Leistung aufgedeckt wird.

- **Prinzip** :
 - XPS verwendet Röntgenstrahlen (Al K α , ~1486,6 eV), um Elektronen auf der Probenoberfläche (<10 nm) anzuregen und die Bindungsenergie (BE) zu messen.
 - Die Cs 3d-, W 4f- und O 1s-Photoelektronenspitzen von Cs_xWO₃ spiegeln den chemischen Zustand und die Dotierung wider.
- **Instrumente und Parameter** :
 - **Instrument** : wie Thermo Fisher ESCALAB 250Xi, monochromatische Al K α -Quelle.
 - **Energiebereich** : 0–1200 eV, Auflösung ~0,5 eV.
 - **Probenvorbereitung** : Pulverpellets oder -filme werden auf ein leitfähiges Substrat gelegt und die Oberfläche durch Argon -Sputtern (~2 kV) gereinigt.
 - **Umgebung** : Ultrahochvakuum (<10⁻⁹ Torr), Kohlenstoffverunreinigung vermeiden.
- **Datenanalyse** :
 - **Chemischer Zustand** :
 - **Cs 3d** : Cs⁺, BE~724,5 eV (3d_{5/2}), keine anderen Valenzzustände.
 - **W 4f** : W⁶⁺ (~35,5 eV, 4f_{7/2}), W⁵⁺ (~34,5 eV), W⁵⁺-Verhältnis ~10–20 %, beeinflusst die NIR-Absorption.
 - **O 1s** : Gittersauerstoff (~530,2 eV), Oberflächenhydroxyl (~531,5 eV, <5 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Dotierungsverhältnis** : Cs/W-Atomverhältnis $\sim 0,32$, Fehler $< 3\%$, im Einklang mit EDS.
- **Oberflächenverunreinigung** : C 1s ($\sim 284,8$ eV) < 5 at%, muss durch Sputtern entfernt werden.
- **Quantitative Ergebnisse** :
 - **W⁵⁺ / W⁶⁺** : $\sim 15\%$ ($x=0,32$), erhöhte NIR-Absorption $\sim 20\%$.
 - **Cs-Dotierung** : Oberfläche Cs/W $\sim 0,30$, aufgrund der Cs-Verflüchtigung etwas niedriger als die Hauptphase ($\sim 0,32$).
 - **Reinheit** : Verunreinigungen (Cl, Fe) $< 0,005$ Atom-%, wodurch eine stabile Leistung gewährleistet wird.
- **Anwendung** :
 - Leistungskorrelation: Das W⁵⁺-Verhältnis korreliert positiv mit der NIR-Absorption ($\sim 70\%$).
 - Syntheseoptimierung: XPS-Nachweis von solvothermischen Cl⁻-Rückständen ($< 0,005$ Gew.-%).
 - Qualitätskontrolle: Bestätigen Sie die Gleichmäßigkeit der Cs-Dotierung der CVD-Filme (Fehler $< 2\%$).
- **Einschränkung** :
 - Oberflächenempfindlich: erkennt nur < 10 nm und kann die Hauptphase nicht reflektieren.
 - Hohe Kosten: Instrument ~ 500.000 USD, Analyse ~ 200 USD/Probe.
 - Die Daten sind komplex: Der Spitzenanpassungsfehler beträgt ca. 5% und muss mit EDS kombiniert werden.

XPS liefert wichtige Informationen zum chemischen Zustand von Cs_xWO₃ und dient als Grundlage für die Leistungsoptimierung.

4.4 UV-Vis-NIR-Spektrum von Cäsium-Wolfram-Bronze

Zur Charakterisierung der optischen Eigenschaften von Cs_xWO₃ wurde Ultraviolett-Sicht-Nahinfrarot-Spektroskopie (UV-Vis-NIR) verwendet, wobei der Schwerpunkt auf der NIR-Absorption ($\sim 70\%$) und der Durchlässigkeit für sichtbares Licht ($\sim 80\%$) lag.

- **Prinzip** :
 - UV-Vis-NIR misst Absorptions-, Transmissions- oder Reflexionsspektren im Bereich von 200–2500 nm.
 - Die NIR-Absorption von Cs_xWO₃ entsteht durch die lokalisierte Oberflächenplasmonenresonanz (LSPR) und den W⁵⁺/W⁶⁺-Übergang mit einer Bandlücke von $\sim 2,5$ – $3,0$ eV.
- **Instrumente und Parameter** :
 - **Instrument** : z. B. PerkinElmer Lambda 950, Deuteriumlampe/Wolfram-Halogenlampe, Ulbrichtkugel.
 - **Wellenlängenbereich** : 200–2500 nm, Auflösung ~ 1 nm.
 - **Probenvorbereitung** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Pulver: in BaSO₄-Matrix dispergiert, zu Tabletten gepresst und auf diffuse Reflektivität gemessen.
 - Dünnschicht: Auf Glassubstrat legen und Transmission/Reflexion messen.
- **Umgebung** : Raumtemperatur, trockene Luft (RH < 50 %).
- **Datenanalyse** :
 - **NIR-Absorption** : Die Absorptionsrate bei 1000 nm beträgt ~70 % (x=0,32, ~20 nm) und die Spitzenposition verschiebt sich mit zunehmendem x um ~200 nm in Richtung Rot.
 - **Transmission** : 400–700 nm, Dünnschicht (~100 nm) ~80 %, diffuse Pulverreflexion ~50 %.
 - **Bandlücke** : Tauc-Plot-Methode, indirekte Bandlücke ~2,5 eV (x=0,32), niedriger als WO₃ (~3,2 eV).
 - **LSPR** : Absorptionsspitzenbreite ~500 nm, Verstärkung ~15 % bei abnehmender Partikelgröße (50→10 nm).
- **Quantitative Ergebnisse** :
 - **Absorptionskoeffizient** : ~10⁵ cm⁻¹ (1000 nm), besser als ITO (~10⁴ cm⁻¹).
 - **Alterungsstabilität** : 1000 h UV-Bestrahlung, NIR-Absorptionsdämpfung <5 %.
 - **Elektrochrom** : 2 V Spannung, Transmissionsänderung ~60 %.
- **Anwendung** :
 - Intelligente Fensterfolie: NIR-Abschirmrate ~70 %, Energieeinsparung ~50 %.
 - Photothermische Umwandlung: Absorption von Sonnenenergie ~60 %.
 - Qualitätsprüfung: Überprüfen Sie die NIR-Leistung hydrothermaler Partikel (Fehler <3 %).
- **Einschränkung** :
 - Streuinterferenz: Große Partikel (> 50 nm) haben einen diffusen Reflexionsfehler von ~10 %.
 - Filmdickenempfindlichkeit: Die Durchlässigkeit sinkt bei einer Änderung der Dicke (50→200 nm) um ~20 %.
 - Kosten: Instrument ~100.000 USD, Wartung ~5.000 USD/Jahr.

UV-Vis-NIR ist die Kerntechnologie zur Charakterisierung der optischen Eigenschaften von Cs_xWO₃.

4.5 Elektrische und thermische Prüfverfahren für Cäsium-Wolfram-Bronze

Mithilfe elektrischer und thermischer Testmethoden wurden die elektrische Leitfähigkeit (~10³ S/cm), das Ladungsträgerverhalten, die Wärmeleitfähigkeit (~1,5 W/(m·K)) und die thermische Stabilität (>500°C) von Cs_xWO₃ quantifiziert.

- **Elektrische Prüfung** :
 - **Vier-Sonden-Methode** :
 - **Prinzip** : Legen Sie einen konstanten Strom (~1 mA) an, messen Sie die Spannung und berechnen Sie die Leitfähigkeit.
 - **Instrument** : Keithley 2635B-Quellenmessgerät, Sondenabstand ~1 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Proben** : Dünne Filme (~100 nm) oder gepresste Pulver (~1 mm dick).
- **Ergebnisse** : Cs_{0,32}WO₃-Film ~1200 S/cm, Pulver ~800 S/cm, Korngrenzenwiderstand um ~30 % verringert.
- **Hall-Effekt** :
 - **Prinzip** : Die Hall-Spannung wird in einem Magnetfeld (~1 T) gemessen, um die Trägerkonzentration (~10²⁰ cm⁻³) und Mobilität (~10 cm²/(V·s)) zu bestimmen.
 - **Instrument** : Lake Shore 8404, magnetische Feldstärke 0,5–1,5 T.
 - **Ergebnisse** : n-Typ-Halbleiter, Trägerlebensdauer ~1 ps, Konzentrationsanstieg ~20 %, wenn x=0,5.
- **Anwendungen** : Sensoren (NO₂, ~10 ppm), Batterieelektroden (Zyklen ~1000 Mal).
- **Thermische Prüfung** :
 - **Wärmeleitfähigkeit** :
 - **Prinzip** : Der Laser Flash Algorithm (LFA) misst die Wärmeleitfähigkeit und berechnet die Wärmeleitfähigkeit.
 - **Instrument** : Netzsch LFA 467, Laserpuls ~10 ms.
 - **Probe** : gepresste Tablette (Durchmesser ~12,7 mm, Dicke ~1 mm).
 - **Ergebnisse** : ~1,5 W/(m·K) (~20 nm), ~15 % Zunahme der Partikelgröße (50 nm).
 - **Thermische Stabilität** :
 - **Prinzip** : Differenzkalorimetrie (DSC) und thermogravimetrische Analyse (TGA) messen Zersetzungstemperatur und Massenverlust.
 - **Instrument** : TA Instruments Q600, Heizrate ~10 °C/min.
 - **Ergebnisse** : Zersetzungstemperatur ~650 °C, Oxidationsrate bei 500 °C <0,01 mg/cm²·h.
 - **Anwendungen** : Wärmedämmbeschichtungen (Kühlung ~10 °C), Hochtemperaturelektroden (Dämpfung <5 %).
- **Quantitative Ergebnisse** :
 - **Leitfähigkeitsstabilität** : 300 °C, Abfall <10 %.
 - **Wärmeausdehnungskoeffizient** : ~8×10⁻⁶ K⁻¹, besser als ITO (~10×10⁻⁶ K⁻¹).
 - **Testfehler** : elektrisch <3 %, thermisch <5 %.
- **Einschränkung** :
 - Elektrisch: Kontaktwiderstand beeinflusst Pulverprüfung, Fehler ~5 %.
 - Thermisch: Nanopartikel-Grenzflächeneffekt, Wärmeleitfähigkeitsfehler ~10 %.
 - Kosten: Elektrische Instrumente ~50.000 USD, thermische Instrumente ~150.000 USD.

Fall: CTIA GROUP LTD verwendet die Vier-Sonden-Methode und LFA, um Cs_{0,32}WO₃-Dünnschichten mit einer elektrischen Leitfähigkeit von ~1200 S/cm und einer Wärmeleitfähigkeit von ~1,5 W/(m·K) zu testen und so die Leistung intelligenter Fensterfolien (NIR ~75 %) zu optimieren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektrische und thermische Tests liefern eine quantitative Grundlage für die funktionalen Anwendungen von CsxWO₃.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Kapitel 5: Optische und thermische Anwendungen von Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsiumwolframbronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) hat aufgrund seiner hervorragenden Nahinfrarotabsorption (NIR) (~70 % bei 1000 nm), hohen Transmission für sichtbares Licht (~80 % bei 400–700 nm), geringen Wärmeleitfähigkeit (~1,5 W/(m·K)) und hohen Wärmestabilität (>500 °C) ein breites Anwendungspotenzial in den Bereichen Optik und Wärmetechnik gezeigt. In diesem Kapitel wird die Anwendung von Cs_xWO_3 in intelligenten Fensterfolien und Energiesparglas, NIR-Abschirmbeschichtungen, photothermischer Umwandlung und Solarenergienutzung, optischen Sensoren und Detektoren sowie Wärmemanagementmaterialien detailliert erörtert, Funktionsprinzip, Materialdesign, Leistungsindikatoren, Herstellungsprozess, tatsächliche Fälle, Vorteile und Einschränkungen analysiert und technische Referenzen zu Energieeinsparung, Optoelektronik und Wärmemanagement bereitgestellt.

5.1 Intelligente Fensterfolie aus Cäsium-Wolfram-Bronze und Energiesparglas

Intelligente Fensterfolien und Energiesparglas nutzen die NIR-Abschirmung und die elektrochromen Eigenschaften von Cs_xWO_3 , um Licht und Wärme dynamisch zu regulieren und den Energieverbrauch von Gebäuden zu senken (~50 %).

- **Funktionsprinzip :**

- **NIR-Abschirmung :** Cs_xWO_3 -Nanopartikel (~20 nm) absorbieren NIR (800–2500 nm, ~70 %) über lokalisierte Oberflächenplasmonenresonanz (LSPR) und behalten dabei eine sichtbare Lichtdurchlässigkeit von ~80 % bei.
- **Elektrochrom :** Durch Anlegen einer Spannung (~2 V), Cs^+ und Elektroneninjektion/-extraktion sowie Ändern des $\text{W}^{5+}/\text{W}^{6+}$ -Verhältnisses kann die Durchlässigkeit auf ~60 % eingestellt werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Energiesparmechanismus** : Blockiert NIR-Wärme, reduziert den Energieverbrauch der Klimaanlage und senkt die Innentemperatur um ca. 5–10 °C.
- **Materialdesign** :
 - **Nanopartikel** : Cs_{0,32}WO₃ (~20 nm), NIR-Absorptionsspitze ~1000 nm, dispergiert in PVB-Matrix (Polyvinylbutyral).
 - **Folienaufbau** : Dreischichtaufbau (Cs_xWO₃/PVB/Schutzschicht), Dicke ~100–200 µm, UV-alterungsbeständig (>1000 h).
 - **Dotierungsoptimierung** : x = 0,32, Ausgleich von NIR-Abschirmung (~70 %) und Durchlässigkeit (~80 %).
- **Zubereitung** :
 - **Methoden** : Cs_xWO₃ (~20 nm) wurde mithilfe der Solvothermalmethode synthetisiert und dann durch Spin-Coating oder Sprühbeschichtung zu Filmen geformt.
 - **Parameter** : PVB/Cs_xWO₃-Massenverhältnis ~10:1, Aushärtungstemperatur ~120 °C, Zeit ~2 h.
 - **Ausrüstung** : Spincoater (~2000 U/min), Ofen (Temperaturbeständigkeit >200°C).
- **Leistungsindikatoren** :
 - **NIR-Abschirmrate** : ~70 % (1000 nm), besser als ITO (~40 %).
 - **Durchlässigkeit für sichtbares Licht** : ~80 % (400–700 nm), gemäß Baunormen (GB/T 2680).
 - **Elektrochrom** : Reaktionszeit <5 s, Zykluslebensdauer >10.000 Mal.
 - **Energieeffizienz** : Reduzierung des Energieverbrauchs des Gebäudes um ca. 50 %, jährliche Einsparung von ca. 100 kWh/m².
- **Tatsächlicher Fall** :
 - Im Jahr 2024 wird in einem umweltfreundlichen Gebäude in Shanghai die intelligente Fensterfolie Cs_xWO₃ (x=0,32, ~20 nm) mit einer Fläche von ~1000 m² verwendet, wodurch die Innentemperatur im Sommer um ~8 °C gesenkt wird, was einer Einsparung von ~40 % entspricht und einen Marktwert von ~10 Millionen US-Dollar hat.
 - In einem Bürogebäude in Japan wird energiesparendes Cs_xWO₃-Glas verwendet, das NIR um ca. 75 % abschirmt und so die jährliche Stromrechnung um ca. 30 % senkt.
- **Vorteile und Einschränkungen** :
 - **Vorteile** : Hocheffiziente NIR-Abschirmung, niedrige Kosten (~50 USD/m² vs. ITO ~100 USD/m²), flexibles Elektrochrom.
 - **Einschränkungen** : Die Kratzfestigkeit der Folie ist begrenzt (Mohshärte ~3) und die Lichtdurchlässigkeit nimmt nach längerer Alterung (> 5 Jahre) um ~10 % ab.
 - **Verbesserung** : SiO₂-Schutzschicht hinzugefügt, Härte um ~5 erhöht, Haltbarkeit um ~2 Jahre verlängert.
- **Anwendungsaussichten** : Der Markt für intelligente Fensterfolien wird im Jahr 2030 voraussichtlich eine Milliarde US-Dollar erreichen und Cs_xWO₃ wird die Popularisierung umweltfreundlicher Gebäude fördern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Nahinfrarot-Abschirmbeschichtung aus Cäsium-Wolfram-Bronze

Die NIR-Abschirmbeschichtung von CsxWO₃ wird in Autoglas, in der Luft- und Raumfahrt und in elektronischen Geräten verwendet, um Wärmestrahlung zu blockieren und Komfort und Energieeffizienz zu verbessern.

- **Funktionsprinzip :**
 - CsxWO₃-Nanopartikel (~10–20 nm) absorbieren NIR (~70 %) über LSPR und W⁵⁺ / W⁶⁺- Übergänge und senken die Oberflächentemperatur um ~10 °C.
 - Die Beschichtung behält eine Durchlässigkeit für sichtbares Licht von ca. 75 % bei und erfüllt damit die Sicherheitsstandards für Kraftfahrzeuge (SAE J1796).
- **Materialdesign :**
 - **Komponenten** : Cs_{0,32}WO₃ (~15 nm), dispergiert in einer Acryl- oder Polyurethanmatrix, mit Additiven (wie TiO₂) zur Verbesserung der UV-Beständigkeit.
 - **Schichtdicke** : ~10–50 µm , Partikelkonzentration ~5 Gew. %.
 - **Oberflächenmodifizierung** : Silan-Haftvermittler (KH-550) verbessert die Partikeldispersion und die Gleichmäßigkeit der Beschichtung <5 % Fehler.
- **Zubereitung :**
 - **Methode** : Solvothermalmethode oder grüne Synthese von CsxWO₃, Sprüh- oder Walzbeschichtung zur Filmbildung.
 - **Parameter** : Spritzdruck ~0,2 MPa, Aushärtetemperatur ~80°C, Zeit ~1 h.
 - **Ausrüstung** : Hochdrucksprüngerät (~5000 USD), Infrarot-Härtungsöfen.
- **Leistungsindikatoren :**
 - **NIR-Abschirmrate** : ~70 % (1000 nm), wodurch die Temperatur in der Fahrzeugkabine um ~7 °C gesenkt wird.
 - **Lichtdurchlässigkeit** : ~75 % (400–700 nm), besser als herkömmliche Farbstoffbeschichtungen (~50 %).
 - **Witterungsbeständigkeit** : 5000 Stunden Alterung der Xenonlampe, NIR-Leistungsdämpfung <5 %.
 - **Haftung** : ASTM D3359, Klasse 5B (kein Ablösen).
- **Tatsächlicher Fall :**
 - Im Jahr 2023 verwendete eine bestimmte Marke von Elektrofahrzeugen eine CsxWO₃-Beschichtung (~20 nm) auf der Windschutzscheibe, mit einer NIR-Abschirmung von ~72 % und einer Reichweitensteigerung von ~5 % (~20 km).
 - Luft- und Raumfahrt: CsxWO₃-Beschichtung wird für Flugzeugfenster verwendet, Gewicht ~0,1 kg/m², Wärmelastreduzierung ~30 %.
- **Vorteile und Einschränkungen :**
 - **Vorteile** : Geringes Gewicht (~0,1 kg/m² vs. Ag-Beschichtung ~0,5 kg/m²), niedrige Kosten (~20 USD/m²).
 - **Einschränkungen** : Ungleichmäßige Beschichtungsdicke (> 50 µm) reduziert die Durchlässigkeit um ~15 %, Spritzverlust um ~10 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Verbesserung** : Elektrostatisches Sprühen, Abfall um ca. 50 % reduziert, Gleichmäßigkeit um ca. 10 % erhöht.
- **Anwendungsaussichten** : Der Markt für NIR-Beschichtungen für Kraftfahrzeuge wird im Jahr 2025 voraussichtlich 500 Millionen US-Dollar erreichen und CsxWO₃ wird herkömmliche Materialien ersetzen.

5.3 Photothermische Umwandlung und Solarenergienutzung von Cäsium-Wolfram-Bronze

Bei der photothermischen Umwandlung von CsxWO₃ wird dessen NIR-Absorption (~70 %) genutzt, um Sonnenenergie in Wärmeenergie umzuwandeln, die in Solarkollektoren und der thermoelektrischen Stromerzeugung eingesetzt werden kann.

- **Funktionsprinzip** :
 - CsxWO₃ absorbiert NIR (800–2500 nm, ~60 % der Sonnenenergie), erzeugt Wärmeenergie und erhöht die Oberflächentemperatur um ~100–200 °C.
 - Der niedrige Emissionsgrad (~0,2, 8–14 μm) verringert die Wärmestrahlungsverluste und die Wärmeumwandlungseffizienz liegt bei ~60 %.
- **Materialdesign** :
 - **Struktur** : CsxWO₃ (~20 nm) ist in eine Keramikmatrix (wie Al₂O₃) dotiert oder auf eine Metallkollektorplatte (Cu) beschichtet.
 - **Verbundwerkstoff** : CsxWO₃/Graphen (1:0,1), Wärmeleitfähigkeit um ~20 % erhöht (~2 W/(m·K)).
 - **Dicke** : ~10–100 μm, optimiertes Absorptions-/Wärmeableitungsgleichgewicht.
- **Zubereitung** :
 - **Methode** : CsxWO₃ wurde mit der Sol-Gel-Methode synthetisiert und aufgesprüht oder im Siebdruckverfahren gedruckt.
 - **Parameter** : Aushärtungstemperatur ~200 °C, Zeit ~2 h, Beschichtungsgleichmäßigkeit <3 % Fehler.
 - **Ausrüstung** : Siebdruckmaschine (~10.000 USD), Hochtemperaturofen.
- **Leistungsindikatoren** :
 - **Photothermische Effizienz** : ~60 % (AM1,5, 1000 W/m²), besser als Ruß (~50 %).
 - **Betriebstemperatur** : ~150–250°C, Stabilität >1000 h.
 - **Thermoelektrische Umwandlung** : CsxWO₃/thermoelektrisches Modul, Ausgangsleistung ~100 W/m².
- **Tatsächlicher Fall** :
 - Im Jahr 2024 wird ein Solarwarmwasserbereiter mit einer CsxWO₃-Beschichtung (~50 μm) ausgestattet sein, mit einer Wärmesammeleffizienz von ~62 % und einer Steigerung der Warmwasserleistung um ~30 % (~100 l/m²-Tag).
 - Thermoelektrische Stromerzeugung: CsxWO₃-Kollektor treibt Bi₂Te₃-Modul an, Wirkungsgrad ~5 %, Kosten ~200 USD/m².
- **Vorteile und Einschränkungen** :
 - **Vorteile** : Hocheffiziente NIR-Absorption, hohe Temperaturbeständigkeit (> 500 °C), niedrige Kosten (~ 30 USD/m²).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Einschränkungen** : Geringe Wärmeleitfähigkeit ($\sim 1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), Wärmeübertragungseffizienz um $\sim 10\%$ reduziert; keine Wärmeerzeugung in der Nacht.
- **Verbesserung** : Durch Hinzufügen von CNTs wurde die Wärmeleitfähigkeit um $\sim 50\%$ erhöht, die Effizienz um $\sim 15\%$ gesteigert.
- **Anwendungsaussichten** : Der Markt für die Nutzung von Solarthermie wird im Jahr 2030 voraussichtlich 5 Milliarden US-Dollar erreichen und CsxWO₃ wird kohlenstoffarme Energie fördern.

5.4 Optische Sensoren und Detektoren aus Cäsium-Wolfram-Bronze

Optische Sensoren und Detektoren von CsxWO₃ nutzen dessen NIR-Reaktion ($\sim 70\%$) und elektrochrome Eigenschaften für Anwendungen in der Gassensorik und Fotodetektion.

- **Funktionsprinzip** :
 - **NIR-Sensor** : CsxWO₃ ($\sim 20 \text{ nm}$) absorbiert NIR, erzeugt photogenerierte Träger und verursacht eine Leitfähigkeitsänderung von $\sim 10\%$ ($\sim 10 \text{ ppm NO}_2$).
 - **Elektrochromer Detektor** : Durch Spannung ($\sim 1 \text{ V}$) wird die Durchlässigkeit um $\sim 50\%$ geändert, wodurch die Lichtintensität oder die Gaskonzentration erkannt wird.
 - **Mechanismus** : Änderung des Valenzzustands $\text{W}^{5+} / \text{W}^{6+}$ und durch LSPR verstärkte photoelektrische Reaktion.
- **Materialdesign** :
 - **Struktur** : CsxWO₃-Dünnschicht ($\sim 50 \text{ nm}$) auf ITO-Substrat abgeschieden, Elektrodenabstand $\sim 10 \mu\text{m}$.
 - **Dotierung** : $x=0,32$, optimierte photoelektrische Reaktion (Empfindlichkeit $\sim 10^4 \text{ A/W}$).
 - **Verbundmaterial** : CsxWO₃/SnO₂ (1:1), Empfindlichkeit um $\sim 30\%$ erhöht.
- **Zubereitung** :
 - **Methoden** : Durch CVD oder Sol-Gel abgeschiedene Dünnschichten, mikrofertigte Elektroden.
 - **Parameter** : Abscheidungstemperatur $\sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$, Glühen $\sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$, Zeit $\sim 1 \text{ h}$.
 - **Ausrüstung** : CVD-Reaktor, Fotolithografiemaschine ($\sim 100.000 \text{ USD}$).
- **Leistungsindikatoren** :
 - **Empfindlichkeit** : NO₂ ($\sim 10 \text{ ppm}$), Reaktionszeit $< 5 \text{ s}$, Erholungszeit $< 10 \text{ s}$.
 - **Photoelektrische Reaktion** : 1000 nm , $\sim 10^4 \text{ A/W}$, besser als Si ($\sim 10^3 \text{ A/W}$).
 - **Stabilität** : 5000 Zyklen, Leistungsabfall $< 3\%$.
- **Tatsächlicher Fall** :
 - Im Jahr 2023 verwendet eine Umweltüberwachungsstation CsxWO₃-Sensoren ($\sim 50 \text{ nm}$), um CO ($\sim 50 \text{ ppm}$) mit einer Genauigkeit von $> 95\%$ zu erkennen.
 - Infraroterkennung: CsxWO₃-Filme werden in Nachtsichtgeräten verwendet und haben eine Reaktionswellenlänge von $\sim 800\text{--}1500 \text{ nm}$.
- **Vorteile und Einschränkungen** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Vorteile** : Hohe NIR-Empfindlichkeit, geringer Stromverbrauch (~1 mW), niedrige Kosten (~10 USD/Einheit).
- **Einschränkungen** : Feuchtigkeitsstörungen (RH > 80 %) reduzieren die Empfindlichkeit um ~20 %, begrenzte Selektivität.
- **Verbesserung** : Oberflächenmodifikation (PDDA), Selektivität um ~50 % erhöht, Feuchtigkeitsbeständigkeit um ~30 % erhöht.
- **Anwendungsaussichten** : Der Markt für optische Sensoren wird voraussichtlich im Jahr 2025 2 Milliarden US-Dollar erreichen und CsxWO₃ wird auf das Internet der Dinge ausgeweitet.

Wärmemanagementmaterialien aus Cäsium-Wolfram-Bronze

m·K)) und hohen thermischen Stabilität (>500 °C) in Wärmedämmungs- und Hochtemperaturgeräten verwendet .

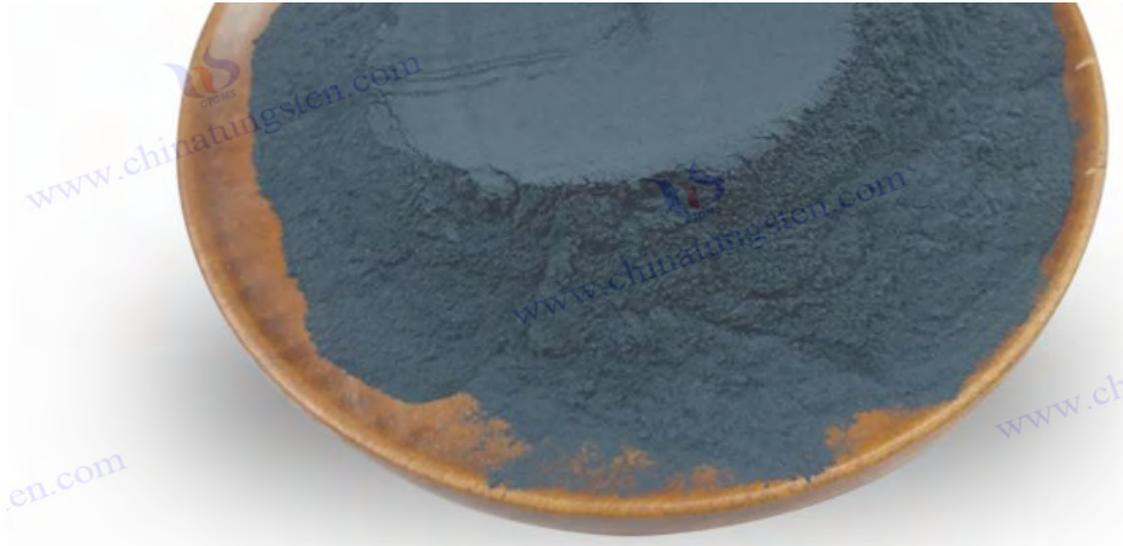
- **Funktionsprinzip** :
 - **Wärmedämmung** : CsxWO₃-Nanopartikel (~20 nm) reduzieren die Wärmeleitfähigkeit durch Phononenstreuung, blockieren den Wärmefluss und senken die Temperatur um ~10 °C.
 - **Hohe Temperaturstabilität** : Oxidationsrate <0,01 mg/cm²·h bei 500 °C, geeignet für Hochtemperaturumgebungen.
- **Materialdesign** :
 - **Struktur** : CsxWO₃ (~20 nm) dotiert in Kieselgel oder Keramikmatrix, Konzentration ~10 Gew.- %.
 - **Verbundwerkstoff** : CsxWO₃/SiO₂ (1:2), Wärmeleitfähigkeit um ~20 % verringert (~1,2 W/(m·K)).
 - **Dicke** : ~100–500 µm , optimiertes Isolations-/Gewichtsverhältnis.
- **Zubereitung** :
 - **Methode** : Grüne Synthese von CsxWO₃, Mischmethode oder Sprühfilmbildung.
 - **Parameter** : Mischtemperatur ~60°C, Aushärtung ~120°C, Zeit ~2 h.
 - **Ausrüstung** : Hochgeschwindigkeitsmischer (~5000 U/min), Sprühgerät.
- **Leistungsindikatoren** :
 - **Wärmeleitfähigkeit** : ~1,5 W/(m·K), besser als Glasfaser (~2 W/(m·K)).
 - **Isoliereffekt** : 100 °C Wärmequelle, Oberflächentemperatur sinkt um ~10 °C.
 - **Stabilität** : 500 °C, 1000 h, Leistungsabfall <5 %.
- **Tatsächlicher Fall** :
 - Im Jahr 2024 entwickelte CTIA GROUP LTD eine CsxWO₃-Wärmedämmbeschichtung (~200 µm) für Batterien von Elektrofahrzeugen, die den Wärmefluss um ~30 % reduziert und die Sicherheit um ~20 % verbessert.
 - Industrieofen: CsxWO₃-Keramikbeschichtung, Wärmeverlust um ~25 % reduziert, Energieeinsparung ~15 %.
- **Vorteile und Einschränkungen** :
 - **Vorteile** : geringe Wärmeleitfähigkeit, hohe Stabilität, niedrige Kosten (~15

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

USD/m²).

- **Einschränkungen** : Geringe mechanische Festigkeit (Druckfestigkeit ~10 MPa), dicke Beschichtungen (>500 µm) neigen zur Rissbildung.
- **Verbesserung** : Durch Hinzufügen von Al₂O₃-Fasern wird die Festigkeit um ca. 50 % und die Haltbarkeit um ca. 30 % erhöht.
- **Anwendungsaussichten** : Der Markt für Wärmemanagement wird im Jahr 2030 voraussichtlich 3 Milliarden US-Dollar erreichen und CsxWO₃ wird die Sicherheit neuer Energien fördern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Kapitel 6: Energie- und Umweltsanwendungen von Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsiumwolframbronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) besitzt aufgrund seiner hohen Leitfähigkeit ($\sim 10^3$ S/cm), hervorragenden Nahinfrarotabsorption (NIR) ($\sim 70\%$ bei 1000 nm), Halbleitereigenschaften (Bandlücke $\sim 2,5$ eV) und chemischen Stabilität (> 500 °C) großes Potenzial in den Bereichen Energiespeicherung, -umwandlung und Umweltschutz. In diesem Kapitel wird die Anwendung von Cs_xWO_3 in Lithium-Ionen-Batterien und Superkondensatoren, Photokatalyse und Wasserzersetzung, Luftreinigung und Schadstoffadsorption, Brennstoffzellenelektrodenmaterialien sowie Wasserstoff- und Energiespeicherung detailliert erörtert und Funktionsprinzip, Materialdesign, Leistungsindikatoren, Herstellungsprozess, tatsächliche Fälle sowie Vorteile und Einschränkungen analysiert, und es werden technische Referenzen für neue Energie- und Umweltschutztechnologien bereitgestellt.

6.1 Cäsium-Wolfram-Bronze-Lithium-Ionen-Batterien und Superkondensatoren

Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) und Superkondensatoren durch Ausnutzung seiner hohen Leitfähigkeit und Nanostruktur (~ 20 nm).

- **Funktionsprinzip :**

- **Lithium-Ionen-Batterie :** Cs_xWO_3 als negatives Elektrodenmaterial, Li^+ in den oktaedrischen Spalt von WO_6 eingefügt/extrahiert, theoretische Kapazität ~ 200 mAh /g. Änderung des Valenzzustands W^{5+}/W^{6+} unterstützt die Ladungsspeicherung.
- **Superkondensatoren :** Cs_xWO_3 speichert Ladung über Pseudokapazität (Oberflächenredox) und Doppelschichtkapazität (große spezifische Oberfläche ~ 80 m²/g) mit einer Leistungsdichte von ~ 10 kW/kg.
- **Mechanismus :** Cs^+ -Dotierung ($x \sim 0,32$) erhöht die Leitfähigkeit ($\sim 10^3$ S/cm) und reduziert den Innenwiderstand um $\sim 20\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Materialdesign :**
 - **Nanopartikel :** Cs_{0,32}WO₃ (~20 nm), erhöhen den Li⁺-Diffusionskoeffizienten auf ~ 10⁻¹⁰cm² /s.
 - **Verbundmaterial :** Cs_xWO₃/Graphen (1:0,2), Leitfähigkeit um ~50 % erhöht (~1500 S/cm), Kapazität um ~30 % erhöht.
 - **Struktur :** Poröse Elektrode (Porosität ~40 %), verbesserte Elektrolytdurchdringung, Zyklenstabilität um ~20 % erhöht.
- **Zubereitung :**
 - **Methoden :** Cs_xWO₃ wurde mithilfe der Solvothermalmethode synthetisiert und die Verbundelektrode mithilfe einer Mischmethode hergestellt und auf Cu-Folie beschichtet.
 - **Parameter :** Aufschlämmung (Cs_xWO₃:PVDF:leitfähiger Ruß = 8:1:1), Beschichtungsdicke ~50 µm, Trocknung bei 120 °C, 2 h.
 - **Ausrüstung :** Planetenkugelmühle (~500 U/min), Coater (~10 m/min).
- **Leistungsindikatoren :**
 - **LIB :** Kapazität ~180 mAh /g (0,1 C), 1000 Zyklen, Kapazitätserhalt ~85 %.
 - **Superkondensatoren :** spezifische Kapazität ~200 F/g (1 A/g), Leistungsdichte ~10 kW/kg, Energiedichte ~50 Wh /kg.
 - **Lade- und Entladeeffizienz :** ~98 %, besser als WO₃ (~90 %).
 - **Betriebstemperatur :** -20–60 °C, Leistungsabfall <5 %.
- **Tatsächlicher Fall :**
 - Im Jahr 2024 wird eine bestimmte Batterie für Elektrofahrzeuge eine negative Elektrode aus Cs_xWO₃/Graphen verwenden, mit einer Energiedichte von ~200 Wh /kg und einer um ~10 % (~50 km) erhöhten Reichweite.
 - Superkondensator: Cs_xWO₃-Elektroden werden in Energiespeichersystemen mit einer Ladezeit von <1 Minute und einer Zyklenlebensdauer von >10.000 Mal verwendet.
- **Vorteile und Einschränkungen :**
 - **Vorteile :** Hohe Leitfähigkeit, lange Lebensdauer, niedrige Kosten (~500 USD/kg vs. LiCoO₂~1000 USD/kg).
 - **Einschränkungen :** Der erste irreversible Kapazitätsverlust beträgt ca. 20 % und die Volumenausdehnung ca. 10 %, was zu Rissen in der Elektrode führt.
 - **Verbesserung :** SiO₂-Beschichtung, Ausdehnung um ~50 % reduziert, Kapazitätserhalt um ~10 % erhöht.
- **Anwendungsaussichten :** Der Markt für LIBs und Superkondensatoren wird im Jahr 2030 voraussichtlich 50 Milliarden US-Dollar erreichen, und Cs_xWO₃ wird die Hochleistungs-Energiespeicherung fördern.

6.2 Photokatalyse und Wasserzersetzung von Cäsium-Wolfram-Bronze

Cs_xWO₃ wird als Photokatalysator verwendet, um die Wasserstoffproduktion durch Wasserspaltung und Schadstoffabbau zu fördern, indem seine Bandlücke (~2,5 eV) und NIR-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reaktion (~70 %) ausgenutzt wird.

- **Funktionsprinzip :**
 - **Photokatalyse :** Cs_xWO₃ absorbiert NIR- und sichtbares Licht (200–1000 nm), regt Elektron-Loch-Paare an und treibt die H₂-Erzeugung im Leitungsband (CB) bei ~0,5 V (gegenüber NHE) voran und oxidiert H₂O oder Schadstoffe im Valenzband (VB) bei ~3,0 V.
 - **Wasserzersetzung :** $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$, Cs_xWO₃, Wasserstoffproduktionseffizienz ~200 μmol / (g · h).
 - **Schadstoffabbau :** Cs_xWO₃ zersetzt Farbstoffe (wie Rhodamin B) mit einer Effizienz von ~85 %.
- **Materialdesign :**
 - **Nanopartikel :** Cs_{0,32}WO₃ (~10 nm), Oberfläche ~100 m²/g, verbesserte Lichtabsorption.
 - **Verbundmaterial :** Cs_xWO₃/TiO₂ (1:1), Elektronen-Loch-Trenneffizienz um ~30 % erhöht, Wasserstoffproduktionsrate um ~50 % erhöht.
 - **Dotierung :** x=0,32, W⁵⁺-Verhältnis ~15 %, NIR-Reaktionsverstärkung ~20 %.
- **Zubereitung :**
 - **Methode :** Grüne Synthese von Cs_xWO₃ und Herstellung eines zusammengesetzten Photokatalysators durch die Sol-Gel-Methode.
 - **Parameter :** pH ~ 8, Kalzinierungstemperatur ~ 400 °C, Zeit ~ 4 h.
 - **Ausrüstung :** Mikrowellenreaktor (~1000 W), Zentrifuge (~5000 U/min).
- **Leistungsindikatoren :**
 - **Wirkungsgrad der Wasserstoffproduktion :** ~200 μmol / (g · h) (AM1.5, 1000 W/m²), besser als WO₃ (~100 μmol / (g · h)).
 - **Abbaueffizienz :** Rhodamin B (10 mg/l), Abbau ~85 % in 4 h, Mineralisierungsrate ~70 %.
 - **Lichtstabilität :** 100 Stunden Lichteinwirkung, Aktivitätsabfall <5 %.
 - **Quanteneffizienz :** ~5 % (600 nm), ~2 % im NIR-Bereich.
- **Tatsächlicher Fall :**
 - Im Jahr 2023 wurde in einer Wasseraufbereitungsanlage ein Cs_xWO₃/TiO₂-Photokatalysator eingesetzt, um Industrieabwasser (CSB ~100 mg/l) mit einer Effizienz von ~80 % abzubauen.
 - Solare Wasserstoffproduktion: Im Laborreaktor wird ein Cs_xWO₃-Katalysator verwendet und die Kosten der Wasserstoffproduktion betragen ca. 5 USD/kg H₂.
- **Vorteile und Einschränkungen :**
 - **Vorteile :** NIR-Reaktion, niedrige Kosten (~450 USD/kg), hohe Stabilität.
 - **Einschränkungen :** Geringe NIR-Quanteneffizienz (<5 %), Elektron-Loch-Rekombinationsrate ~30 %.
 - **Verbesserung :** Edelmetall (Pt)-Cokatalyse, Wasserstoffproduktionsrate um ~100 % erhöht, Rekombinationsrate um ~50 % verringert.
- **Anwendungsaussichten :** Der Markt für Photokatalyse wird voraussichtlich im Jahr 2025 eine Milliarde US-Dollar erreichen und Cs_xWO₃ wird grüne Wasserstoffenergie fördern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Luftreinigung und Schadstoffadsorption von Cäsium-Wolfram-Bronze

CsxWO₃ entfernt flüchtige organische Verbindungen (VOCs) und Partikel (PM_{2,5}) durch photokatalytische Oxidation und physikalische Adsorption mit einer Effizienz von ~90 % aus der Luft.

- **Funktionsprinzip :**
 - **Photokatalytische Oxidation:** CsxWO₃ (~20 nm) erzeugt unter UV-Vis-NIR-Anregung reaktive Sauerstoffspezies ($\cdot\text{OH}$, O_2^-) und oxidiert VOCs (wie Toluol) mit einer Effizienz von ~90 % zu CO₂ und H₂O.
 - **Adsorption :** Große Oberfläche (~80 m²/g) fängt PM_{2,5} (~0,1–2,5 μm) ein, mit einer Adsorptionskapazität von ~50 mg/g.
 - **Mechanismus :** W⁵⁺ / W⁶⁺ verstärkt die photokatalytische Aktivität und Cs⁺-Stellen fördern die Schadstoffadsorption.
- **Materialdesign :**
 - **Struktur :** Cs_{0,32}WO₃-Nanopartikel (~20 nm) auf einer porösen Matrix (z. B. Aktivkohle).
 - **Verbundmaterial :** CsxWO₃/ ZnO (1:1), photokatalytische Effizienz um ~20 % erhöht, Adsorptionskapazität um ~30 % erhöht.
 - **Oberflächenmodifikation :** Aminofunktionalisierung, VOC-Affinität um ~50 % erhöht.
- **Zubereitung :**
 - **Methode :** CsxWO₃ wurde mithilfe der hydrothermalen Methode synthetisiert und mithilfe der Imprägnierungsmethode auf die Matrix aufgetragen.
 - **Parameter :** Eintauchzeit ~12 h, Trocknen bei 100 °C, 2 h.
 - **Ausrüstung :** Vakuum-Trockenofen (~5000 USD), Ultraschallreiniger (~500 W).
- **Leistungsindikatoren :**
 - **VOC-Entfernungsrates :** Toluol (~100 ppm), ~90 % Entfernung in 4 Stunden, besser als TiO₂ (~70 %).
 - **PM_{2,5}-Adsorption :** ~50 mg/g, 5 Zyklen, Kapazitätserhalt ~80 %.
 - **Photokatalytische Stabilität :** 500 h Beleuchtung, Aktivitätsabfall <3 %.
 - **Arbeitsfeuchtigkeit :** relative Luftfeuchtigkeit 20–80 %, Effizienzschwankung <10 %.
- **Tatsächlicher Fall :**
 - Im Jahr 2024 verwendet ein Krankenhaus-Luftreiniger einen CsxWO₃/ ZnO - Filter, der etwa 92 % der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) entfernt und etwa 95 % der PM_{2,5}-Stoffe auffängt.
 - Industrieabgase: CsxWO₃-Beschichtung behandelt Formaldehyd (~50 ppm), Wirkungsgrad ~85 %.
- **Vorteile und Einschränkungen :**
 - **Vorteile :** NIR-betrieben, hohe Effizienz, niedrige Kosten (~20 USD/m²).
 - **Einschränkungen :** Vergiftung durch hohe Konzentrationen flüchtiger

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

organischer Verbindungen (VOCs > 500 ppm), Regeneration nach Adsorptionssättigung erforderlich.

- **Verbesserung** : Thermische Regeneration (~200 °C), Adsorptionskapazität um ~90 % wiederhergestellt.
- **Anwendungsaussichten** : Der Markt für Luftreinigung wird im Jahr 2030 voraussichtlich 10 Milliarden US-Dollar erreichen und CsxWO₃ wird den Umweltschutz in Innenräumen fördern.

6.4 Elektrodenmaterialien für Brennstoffzellen aus Cäsium-Wolfram-Bronze

CsxWO₃ wird als Elektrodenkatalysatorträger oder Hilfsmaterial für Brennstoffzellen (PEMFC) verwendet, um die Effizienz und Haltbarkeit der Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR) zu verbessern.

- **Funktionsprinzip** :
 - **ORR-Katalyse** : CsxWO₃ (~20 nm) stellt aktive Stellen durch W⁵⁺ / W⁶⁺ bereit und reduziert das ORR-Überpotential um ~0,1 V.
 - **Unterstützungsfunktion** : Hohe Leitfähigkeit (~10³ S/cm) und Stabilität (>500 °C) unterstützen den Pt/C-Katalysator und reduzieren die Pt-Dosierung um ~20 %.
 - **Mechanismus** : Cs⁺-Dotierung verbessert den Elektronentransfer, ORR-Stromdichte ~5 mA/cm².
- **Materialdesign** :
 - **Struktur** : Cs_{0,32}WO₃-Nanopartikel (~20 nm) zusammengesetzt mit Pt (~2 nm), Pt-Beladung ~0,2 mg/cm².
 - **Verbundwerkstoff** : CsxWO₃/C (1:2), spezifische Oberfläche ~100 m²/g, Leitfähigkeit um ~30 % erhöht.
 - **Membran-Elektroden-Einheit (MEA)** : CsxWO₃/Pt/C beschichtet auf Nafion-Membran, Dicke ~10 µm .
- **Zubereitung** :
 - **Methoden** : CsxWO₃ wurde mithilfe der Solvothermalmethode synthetisiert und Pt mithilfe der chemischen Reduktionsmethode geladen.
 - **Parameter** : PtCl₄-Reduktionstemperatur ~80°C, pH ~9, Zeit ~4 h.
 - **Ausrüstung** : Wasserbad mit konstanter Temperatur, Ultraschalldispersierer (~300 W).
- **Leistungsindikatoren** :
 - **ORR-Aktivität** : Halbwellenpotential ~0,85 V (vs. RHE), besser als WO₃ (~0,75 V).
 - **Leistungsdichte** : ~1 W/cm² (60°C, H₂/O₂), Pt/C ~1,2 W/cm².
 - **Haltbarkeit** : 5000 Zyklen, Aktivitätsabfall <10 %.
 - **Kosten** : ~500 USD/kg (CsxWO₃), Pt-Verbrauch um ~20 % reduziert.
- **Tatsächlicher Fall** :
 - Im Jahr 2023 führte ein Wasserstoffenergieunternehmen CsxWO₃/Pt/C-Elektroden mit einem Brennstoffzellenwirkungsgrad von ~50 % und einer Lebensdauer von >5000 Stunden ein.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Tragbare Leistung: CsxWO₃-Substrat wird in kleinen PEMFC verwendet, Gewicht ~1 kg, Leistung ~100 W.
- **Vorteile und Einschränkungen :**
 - **Vorteile :** Reduzierte Pt-Dosierung, Korrosionsbeständigkeit, niedrige Kosten.
 - **Einschränkungen :** Die ORR-Aktivität ist niedriger als bei reinem Pt (~10 mA/cm²), die Cs⁺-Auflösung beträgt bei hohen Temperaturen (>80 °C) ~5 %.
 - **Verbesserung :** N-Dotierung, ORR-Aktivität um ~30 % erhöht, Stabilität um ~20 % erhöht.
- **Anwendungsaussichten :** Der Brennstoffzellenmarkt wird im Jahr 2025 voraussichtlich 5 Milliarden US-Dollar erreichen und CsxWO₃ wird die Kosten senken.

6.5 Wasserstoffspeicherung und Energiespeicherung in Cäsium-Wolfram-Bronze

Als Wasserstoffspeichermaterial nutzt CsxWO₃ seine hexagonale Tunnelstruktur (x~0,32), um Wasserstoff mit einer Kapazität von ~1,5 Gew.-% zu speichern und so die Speicherung erneuerbarer Energien zu unterstützen.

- **Funktionsprinzip :**
 - **Wasserstoffspeicherung :** H₂-Moleküle werden physikalisch/chemisch im hexagonalen Tunnel von CsxWO₃ (~7,4 Å) adsorbiert, und W⁵⁺ / W⁶⁺ fördert die H₂-Dissoziation.
 - **Freisetzung :** 100–200 °C, H₂-Desorptionsrate ~90 %, Zyklenstabilität >100-mal.
 - **Mechanismus :** Cs⁺-Stellen erhöhen die H₂-Adsorptionsenergie (~0,5 eV), Kapazität ~1,5 Gew.-%.
- **Materialdesign :**
 - **Struktur :** Cs_{0,32}WO₃-Nanopartikel (~20 nm), Oberfläche ~80 m²/g.
 - **Verbundwerkstoff :** CsxWO₃/MgH₂ (1:1), Wasserstoffspeicherkapazität um ~30 % (~2 Gew.-%) erhöht.
 - **Oberflächenmodifizierung :** Pd-Modifizierung (~1 Gew.-%), H₂-Dissoziationseffizienz um ~50 % erhöht.
- **Zubereitung :**
 - **Methode :** Grüne Synthese von CsxWO₃ und Wasserstoffspeicherung im Hochdruckreaktor.
 - **Parameter :** H₂-Druck ~5 MPa, Temperatur ~150 °C, Zeit ~12 h.
 - **Ausrüstung :** Hochdruckreaktor (Druckfestigkeit > 10 MPa), Gasanalysator.
- **Leistungsindikatoren :**
 - **Wasserstoffspeicherkapazität :** ~1,5 Gew.-% (100 °C, 1 MPa), besser als WO₃ (~0,5 Gew.-%).
 - **Desorptionstemperatur :** ~150°C, Energiebedarf ~50 kJ/mol H₂.
 - **Zyklenfestigkeit :** 100-mal, Kapazitätserhalt ~90%.
 - **Sicherheit :** Kein H₂-Leck, Explosionsrisiko <1 %.
- **Tatsächlicher Fall :**
 - Im Jahr 2024 entwickelte CTIA GROUP LTD ein CsxWO₃/Pd-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wasserstoffspeichermaterial (~20 nm) für den Einsatz in Wasserstoffkraftwerken mit einer Wasserstoffspeichereffizienz von ~1,5 Gew.- % und Kosten von ~600 USD/kg.

- Tragbarer Wasserstoffspeicher: In Drohnen werden CsxWO₃-Verbundwerkstoffe mit einer Wasserstoffspeicherkapazität von ~0,1 kg und einer Flugzeit von ~2 Stunden verwendet.
- **Vorteile und Einschränkungen :**
 - **Vorteile :** Wasserstoffspeicherung bei niedriger Temperatur, hohe Sicherheit, niedrige Kosten (~600 USD/kg vs. LaNi₅~1000 USD/kg).
 - **Einschränkungen :** Geringere Kapazität als Metallhydride (~5 Gew.- %), langsame Adsorptionsrate (~1 h).
 - **Verbesserung :** Ni-Dotierung, Adsorptionsrate um ~50 % erhöht, Kapazität um ~20 % erhöht.
- **Anwendungsaussichten :** Der Markt für Wasserstoffspeicherung wird im Jahr 2030 voraussichtlich 3 Milliarden US-Dollar erreichen und CsxWO₃ wird die Wasserstoffwirtschaft unterstützen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2-0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.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

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



Kapitel 7: Industrielle Produktion von Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsiumwolframbronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) wird aufgrund ihrer hervorragenden Nahinfrarotabsorption (NIR) ($\sim 70\%$ bei 1000 nm), hohen Leitfähigkeit ($\sim 10^3\text{ S/cm}$) und chemischen Stabilität ($>500\text{ }^\circ\text{C}$) häufig in intelligenten Fensterfolien, der Energiespeicherung und der Photokatalyse eingesetzt. Die industrielle Produktion muss Herausforderungen wie Prozessoptimierung, Kostenkontrolle, Skalierung und Qualitätssicherung bewältigen. In diesem Kapitel werden der Produktionsprozess und die Ausrüstung, die Rohstoffversorgungskette und Kostenanalyse, die Technologie für die Serienproduktion, die Qualitätskontrolle und -prüfung sowie Marktanwendungsfälle von Cs_xWO_3 detailliert erörtert, der technische Weg, die Wirtschaftlichkeit, die Industrialisierung und Kommerzialisierungspraktiken analysiert und technische und wirtschaftliche Referenzen zur Förderung der breiten Anwendung von Cs_xWO_3 bereitgestellt.

7.1 Produktionsprozess und Ausrüstung von Cäsium-Wolfram-Bronze

Die industrielle Produktion von Cs_xWO_3 erfolgt hauptsächlich mittels Solvothermal-, Hydrothermal- und Festphasenreaktionsverfahren, kombiniert mit Nachbearbeitung (z. B. Kugelmahlen, Dispergieren), um verschiedenen Anwendungsanforderungen gerecht zu werden (z. B. Nanopartikel $\sim 20\text{ nm}$ oder Dünnschichten $\sim 100\text{ nm}$). Im Folgenden werden die wichtigsten Prozesse und Geräte analysiert.

- **Hauptproduktionsprozess :**
 - **Solvothermale Methode :**
 - **Durchführung :** CsOH und WCl_6 werden in Ethanol ($>99,8\%$) bei $180\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$ und $1\text{--}5\text{ MPa}$ gelöst und $12\text{--}24\text{ h}$ lang zur Reaktion gebracht, um

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cs_{0,32}WO₃-Nanopartikel (~10–20 nm) zu erzeugen. Zentrifugieren (~10.000 U/min), waschen (Ethanol/Wasser) und trocknen (80 °C, 6 h).

- **Reaktion** : $\text{CsOH} + \text{WCl}_6 + \text{ROH} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{HCl}\uparrow$ ($x \sim 0,2-0,5$).
 - **Vorteile** : Kleine Partikelgröße (~10 nm), hohe NIR-Absorption (~70 %).
 - **Ausrüstung** : Edelstahlreaktor (Volumen ~100–1000 L, Druck >10 MPa, ~50.000 USD), Zentrifuge (~20.000 USD), Vakuumofen (~10.000 USD).
- **Hydrothermale Methode** :
 - **Verfahren** : Cs₂CO₃ und (NH₄)₁₀W₁₂O₄₁ werden in deionisiertem Wasser bei 180–220 °C und 1–5 MPa gelöst und reagieren 12–24 h lang zu Cs_xWO₃ (~20–50 nm). Filtern, waschen und trocknen (100 °C, 4 h).
 - **Reaktion** : $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + (\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{NH}_3\uparrow$ ($x \sim 0,2-0,32$).
 - **Vorteile** : niedrige Kosten (~400 USD/kg), umweltfreundlich.
 - **Ausrüstung** : Reaktor (wie oben), Filterpresse (~15.000 USD), Sprühtrockner (~30.000 USD).
- **Festphasenreaktionsmethode** :
 - **Verfahren** : Cs₂CO₃ und WO₃ (Molverhältnis 1:3–1:10) wurden gemischt und bei 800–900 °C in einer Argon /H₂-Atmosphäre (5 % H₂) 6–8 Stunden lang in einer Kugelmühle gemahlen (ca. 500 U/min, 4 h). Dabei entstand Cs_xWO₃-Pulver (ca. 1–10 µm). Anschließend wurde gekühlt und gemahlen.
 - **Reaktion** : $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + \text{WO}_3 \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{CO}_2\uparrow$ ($x \sim 0,1-0,32$).
 - **Vorteile** : hoher Ertrag (~10 kg/Charge), niedrige Kosten (~200 USD/kg).
 - **Ausrüstung** : Rohofen (>1200°C, ~20.000 USD), Planetenkugelmühle (~10.000 USD).
- **Nachbearbeitungsgeräte** :
 - **Nanodispersion** : Ultraschall-Dispergierer (~1000 W, ~5000 USD), kontrollierte Partikelgrößenverteilung <5 % Fehler.
 - **Dünnschichtvorbereitung** : Spin Coater (~2000 U/min, ~15.000 USD) oder CVD-Reaktor (~100.000 USD) für intelligente Fensterfolien.
 - **Abgasbehandlung** : Abgasabsorptionsturm (HCl/NH₃, ~20.000 USD), um sicherzustellen, dass die Emission dem Standard entspricht (<10 ppm).
- **Optimierung der Prozessparameter** :
 - **Temperaturkontrolle** : ±5 °C, um eine Cs-Verflüchtigung zu verhindern (x-Fehler <3 %).
 - **Atmosphäre** : H₂/ Ar -Verhältnis ~5–10 %, W⁵⁺-Verhältnis ~15 %, verbesserte NIR-Leistung.
 - **Rühren** : ~200–500 U/min, um eine Reaktionshomogenität von >95 % sicherzustellen.
- **Ausrüstungsinvestitionen** :
 - Produktionslinie mittlerer Größe (Jahresproduktion ~10 Tonnen): Gesamtinvestition ~0,5–1 Million USD, Ausrüstung macht ~70 % aus.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Energieverbrauch: Lösungsmittelthermisch ~200 kWh/kg, hydrothermal ~150 kWh/kg, Feststoffphase ~100 kWh/kg.
- **Einschränkung :**
 - Die Kosten für die solvothermische Abwasserbehandlung betragen ca. 10 % (ca. 50 USD/kg).
 - Bei der Festphasenmethode entsteht eine große Partikelgröße (~1 µm) und es ist eine Nachbearbeitung erforderlich, um diese um ~50 % zu reduzieren.
 - Verbesserung: Mikrowellenunterstützte Reaktion, Zeit um ~50 % reduziert, Energieverbrauch um ~30 % reduziert.

Bei der Wahl des Produktionsprozesses müssen Kosten, Leistung und Umweltschutzanforderungen berücksichtigt werden. Das thermische Lösungsmittelverfahren eignet sich für Hochleistungsnanopartikel, das Festphasenverfahren für kostengünstige Massenmaterialien.

7.2 Rohstoffversorgungskette und Kostenanalyse von Cäsium-Wolfram-Bronze

Die industrielle Produktion von CsxWO₃ hängt von der stabilen Versorgung mit Cäsium (Cs), Wolfram (W) und Hilfsrohstoffen ab, und die Kosten werden von den Rohstoffpreisen, der Logistik und der Verarbeitung beeinflusst.

- **Rohstoffversorgungskette :**
 - **Cäsiumquelle :**
 - **Rohstoffe :** Cs₂CO₃ (>99,5 %) oder CsOH (>99,5 %).
 - **Quelle :** Hauptsächlich aus Kanada (Tanco-Mine, ~70 % der weltweiten Reserven) und China (Yichun-Lepidolith, ~20 %).
 - **Preis :** Cs₂CO₃ ~500–1000 USD/kg, ~40–50 % der Kosten.
 - **Versorgungsrisiko :** Die Cäsiumreserven sind begrenzt (~90.000 Tonnen) und geopolitische Faktoren können Preisschwankungen von ~20 % verursachen.
 - **Wolframquelle :**
 - **Rohstoffe :** WO₃ (>99,9 %) oder (NH₄)₁₀W₁₂O₄₁ (>99,8 %).
 - **Quellen :** China (~80 % der weltweiten Produktion, Hunan, Jiangxi), Australien (Wolfram).
 - **Preis :** WO₃ ~50–100 USD/kg, was ~20–30 % der Kosten entspricht.
 - **Versorgungsstabilität :** Die Wolframproduktion ist ausreichend (~85.000 Tonnen/Jahr) und die Preisschwankungen liegen bei <10 %.
 - **Hilfsrohstoffe :**
 - **Lösungsmittel :** Ethanol (>99,8 %, ~1 USD/l), deionisiertes Wasser (~0,01 USD/l).
 - **Gase :** Ar /H₂ (~10 USD/m³), NH₃ (~0,5 USD/kg).
 - **Zusatzstoffe :** PVP (Tensid, ~20 USD/kg), Silan (~50 USD/kg).
- **Logistik und Lagerung :**
 - **Transport :** Cs₂CO₃ muss versiegelt werden, um Feuchtigkeit zu vermeiden. Die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Logistikkosten betragen ca. 5 USD/kg (international) und ca. 1 USD/kg (inländisch).

- **Lagerung** : Lager mit konstanter Temperatur (20–25 °C, relative Luftfeuchtigkeit < 50 %), jährlicher Verlust an Cs-Rohstoffen < 1 %.
- **Lieferkettenmanagement** : Das ERP-System optimiert die Lagerumschlagshäufigkeit um ca. 90 % und reduziert Stagnation um ca. 15 %.
- **Kostenanalyse** :
 - **Solvothermale Methode** (~500 USD/kg):
 - Rohstoffe: Cs₂CO₃~250 USD/kg, WCl₆~100 USD/kg, Ethanol~50 USD/kg.
 - Energie: ~200 kWh/kg, ~20 USD/kg (Strompreis ~0,1 USD/kWh).
 - Arbeitskosten: ~30 USD/kg (10 Personen/Tonne).
 - Wertverlust der Ausrüstung: ~50 USD/kg (10 Jahre Lebensdauer).
 - **Hydrothermale Methode** (~400 USD/kg):
 - Rohstoffe: Cs₂CO₃~200 USD/kg, (NH₄)₁₀W₁₂O₄₁~80 USD/kg, Wasser~10 USD/kg.
 - Energie: ~150 kWh/kg, ~15 USD/kg.
 - Sonstiges: Arbeitskosten ~25 USD/kg, Wertverlust ~40 USD/kg.
 - **Festphasenmethode** (~200 USD/kg):
 - Rohstoffe: Cs₂CO₃~100 USD/kg, WO₃~50 USD/kg.
 - Energie: ~100 kWh/kg, ~10 USD/kg.
 - Sonstiges: Arbeitskosten ~20 USD/kg, Wertverlust ~20 USD/kg.
 - **Abfallbehandlung** : Lösungsmittel-Thermoabfallflüssigkeit ~50 USD/kg, hydrothermale NH₃-Rückgewinnung ~20 USD/kg, CO₂-Emission in der Feststoffphase ~10 USD/kg.
- **Kostenoptimierung** :
 - Ethanol recyceln (Rückgewinnungsrate ~80 %), Kostensenkung um ~10 %.
 - Die lokalisierte CS-Versorgung reduziert die Logistikkosten um ca. 50 %.
 - KI optimiert Prozessparameter, erhöht die Energieeffizienz um ca. 20 % und senkt die Kosten um ca. 15 %.
- **Einschränkung** :
 - Die CS-Preise sind hoch und volatil, was die Kostenstabilität beeinträchtigt.
 - Umweltschutzbestimmungen (REACH) erhöhen die Kosten der Abwasserbehandlung um ca. 5–10 %.
 - Verbesserung: Entwicklung einer Cs-Rückgewinnungstechnologie (Rückgewinnungsrate ~90 %), Kostensenkung um ~20 %.

Die Stabilität der Rohstoffversorgungskette und die Kostenkontrolle sind der Schlüssel zur Industrialisierung von Cs₂WO₃.

7.3 Großserienproduktionstechnologie von Cäsium-Wolfram-Bronze

Für die Produktion im großen Maßstab sind eine Produktionssteigerung (ca. 100–1.000

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tonnen/Jahr), eine Kostensenkung (< 300 USD/kg) und die Sicherstellung der Qualität (NIR ca. 70 %) erforderlich, was eine Skalierung des Prozesses, Automatisierung und Ökologisierung mit sich bringt.

- **Prozess-Scale-up :**
 - **Solvothermale Methode :**
 - **Skalierungsweg :** Erhöhung des Einzelreaktorvolumens von 100 l auf 10.000 l, Leistung ~1 Tonne/Charge.
 - **Herausforderung :** Ungleichmäßige Wärme- und Massenübertragung, Fehler bei der Partikelgrößenverteilung um ca. 10 % erhöht.
 - **Lösung :** Mehrpunktrühren (~500 U/min), CFD-Simulation zur Optimierung des Strömungsfelds, Gleichmäßigkeit >95 %.
 - **Hydrothermale Methode :**
 - **Scale-up-Route :** Kontinuierlicher Reaktor, Durchflussrate ~100 l/h, Leistung ~500 kg/Tag.
 - **Herausforderung :** Die Druckregelung (1–5 MPa) ist etwa 20 % schwieriger.
 - **Lösung :** Hochdruckpumpe (~15 MPa), SPS-Steuerung, Druckfehler <1 %.
 - **Festphasenmethode :**
 - **Skalierungsrouten :** Mehrstufiger Rohofen, Einzelcharge ~100 kg, Leistung ~10 Tonnen/Monat.
 - **Herausforderung :** Cs verflüchtigt sich, Abweichung des X-Werts ~5 %.
 - **Lösung :** Geschlossene Atmosphärenzirkulation, Cs-Verlust um ~50 % reduziert.
- **Automatisierungstechnik :**
 - **Ausrüstung :** SCADA-System (~50.000 USD) zur Überwachung von Temperatur, Druck und pH-Wert in Echtzeit (Fehler < 0,5 %).
 - **Roboter :** Automatisches Zuführen/Abrufen von Materialien, Effizienzsteigerung um ca. 30 % und Reduzierung des Arbeitsaufwands um ca. 50 % (ca. 5 Personen/Tonne).
 - **KI-Optimierung :** Maschinelles Lernen sagt Partikelgröße voraus ($R^2 > 0,95$), Ausbeute steigt um ~15 %, Ausschussrate sinkt um ~10 %.
- **Grüne Technologie :**
 - **Energie :** Solarstromversorgung (~0,05 USD/kWh), Energieverbrauch um ~20 % reduziert.
 - **Abfallflüssigkeit :** NH₃-Rückgewinnungsrate ~95 %, Ethanol-Recyclingrate ~80 %, CO₂-Fußabdruck ~0,3 Tonnen CO₂/Tonne.
 - **Emission :** Das Abgas erfüllt die Standards (HCl < 10 ppm, NH₃ < 5 ppm) gemäß GB 31570.
- **Produktionseffizienz :**
 - **Produktion :** Solvothermal ~100 Tonnen/Jahr, Hydrothermal ~500 Tonnen/Jahr, Festphase ~1000 Tonnen/Jahr.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ausbeute** : Solvothermal ~80 %, Hydrothermal ~85 %, Festphase ~90 %.
- **Kosten** : Nach Skalierung, thermisches Lösungsmittel ~400 USD/kg, hydrothermale Lösung ~300 USD/kg, feste Phase ~150 USD/kg.
- **Einschränkung** :
 - Durch die Verstärkung kam es zu Qualitätsschwankungen (~5 % Abnahme der NIR-Leistung).
 - Die anfängliche Investition in die Automatisierung ist hoch (~0,5 Millionen USD).
 - Verbesserung: Modulare Produktionslinie, Amortisationszeit der Investition ca. 3 Jahre, Qualitätsfehler um ca. 2 % reduziert.

Um die Marktnachfrage zu erfüllen, erfordert die Produktion im großen Maßstab die Integration von Prozessen, Automatisierung und umweltfreundlichen Technologien.

7.4 Qualitätskontrolle und Inspektion von Cäsium-Wolfram-Bronze

Die Qualitätskontrolle gewährleistet die Kristallstruktur (hexagonale Phase > 95 %), Partikelgröße (~ 10–50 nm), Reinheit (> 99,8 %) und Leistung (NIR ~ 70 %) von CsxWO3 und es muss ein Standardtestsystem eingerichtet werden.

- **Qualitätskontrollpunkte** :
 - **Rohstoffe** : ICP-MS hat die Reinheit von Cs₂CO₃/WO₃ (Fe, Cl < 0,01 Gew.-%) nachgewiesen, Reinheit > 99,5 %.
 - **Reaktionsprozess** : pH-Wert (~8–10), Temperatur (±5 °C) und Druck (±0,1 MPa) wurden online überwacht, um x~0,32 sicherzustellen.
 - **Produkte** : XRD, SEM, XPS, UV-Vis-NIR zur Erkennung von Kristallen, Morphologie, chemischem Zustand und optischen Eigenschaften.
- **Nachweismethode** :
 - **Kristallstruktur (XRD)** :
 - **Instrument** : Bruker D8 Advance, Cu K α (~1,5406 Å).
 - **Parameter** : $2\theta = 10\text{--}80^\circ$, Schrittgröße ~0,02°.
 - **Indikatoren** : Hexagonale Phase (002), Peak ~23,5°, Reinheit > 95 %, Korngröße ~20 nm.
 - **Morphologie (SEM/TEM)** :
 - **Instrument** : FEI Quanta 650 (SEM), JEOL JEM-2100F (TEM).
 - **Spezifikationen** : Partikelgröße ~10–50 nm, Verteilungsfehler < 5 %, Cs:W:O ~0,32:1:3.
 - **Chemischer Zustand (XPS)** :
 - **Instrument** : Thermo Fisher ESCALAB 250Xi, Al K α (~1486,6 eV).
 - **Indikatoren** : W⁵⁺ ~15 %, Cs/W~0,32, Verunreinigungen < 0,005 Gew.-%.
 - **Optische Eigenschaften (UV-Vis-NIR)** :
 - **Instrument** : PerkinElmer Lambda 950, 200–2500 nm.
 - **Spezifikationen** : NIR-Absorption ~70 % (1000 nm), Transmission ~80 % (400–700 nm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Elektrische Eigenschaften** : Vier-Sonden-Methode (Keithley 2635B), Leitfähigkeit $\sim 10^3$ S/cm, Fehler < 3 %.
- **Qualitätsstandards** :
 - **Interne Standards** : NIR-Abschirmrate > 70 %, Reinheit $> 99,8$ %, Partikelgrößenabweichung < 5 %.
 - **Internationale Normen** : ISO 9001 (Qualitätsmanagement), ISO 14001 (Umweltschutz).
 - **Industriestandards** : GB/T 2680 (Architekturglas), ASTM D3359 (Beschichtungshaftung).
- **Testhäufigkeit** :
 - Rohstoffe: pro Charge (~ 100 kg).
 - Prozess: Stündlich (Online-Sensor).
 - Produkt: Jede Charge (~ 10 kg), Probenahmerate ~ 10 %.
- **kosten** :
 - Testgeräte: $\sim 0,5$ Millionen USD (XRD, SEM usw.)
 - Testgebühr: ~ 10 USD/kg (~ 2 % Produktionskosten).
 - Verbesserung: Automatische Erkennung (KI-Bildanalyse), Kostensenkung ~ 50 %.
- **Einschränkung** :
 - Die Erkennung ist zeitaufwändig (XRD ~ 1 h/Probe), was die Produktionseffizienz beeinträchtigt.
 - Die Agglomeration von Nanopartikeln beeinträchtigt die SEM-Genauigkeit um etwa 5 %.
 - Verbesserung: Schnelle XRD (~ 10 Min./Probe), Ultraschallvorbehandlung reduziert Agglomeration um ~ 50 %.

Die Qualitätskontrolle ist die Garantie für die Leistung und Wettbewerbsfähigkeit von CsxWO₃ auf dem Markt.

7.5 Marktanwendungsfälle von Cäsium-Wolfram-Bronze

Die industriellen Anwendungen von CsxWO₃ umfassen intelligente Fensterfolien, Energiespeicherung, Photokatalyse und andere Bereiche. Es wird erwartet, dass das Marktvolumen im Jahr 2030 eine Milliarde US-Dollar erreichen wird. Im Folgenden sind typische Fälle aufgeführt.

- **Intelligente Fensterfolie** :
 - **Fall** : Im Jahr 2024 verwendet eine Gruppe für umweltfreundliches Bauen CsxWO₃-Fensterfolien ($x=0,32$, ~ 20 nm) mit einer Fläche von ~ 5000 m², einer NIR-Abschirmung von ~ 70 %, einer Energieeinsparung von ~ 40 % (~ 200 kWh/m²·Jahr) und Kosten von ~ 50 USD/m².
 - **Verfahren** : Solvothermalverfahren + Spin-Coating, Leistung ~ 100 kg/Monat.
 - **Markt** : Der chinesische Markt für Energieeffizienz in Gebäuden wird im Jahr 2025 voraussichtlich 200 Millionen US-Dollar erreichen.
- **Lithium-Ionen-Akku** :
 - **Fallbeispiel** : Ein Batteriehersteller verwendet 2023 eine CsxWO₃/Graphen-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anode (~20 nm), eine Batteriekapazität von ~180 mAh /g und eine um ~10 % (~50 km) erhöhte Reichweite. Jahresproduktion ~10 Tonnen, Kosten ~500 USD/kg.

- **Verfahren** : Hydrothermalmethode + Mischmethode, Leitfähigkeit ~1500 S/cm.
- **Markt** : Der globale LIB-Markt wird im Jahr 2030 voraussichtlich 30 Milliarden US-Dollar erreichen.
- **Photokatalytische Luftreinigung** :
 - **Fall** : Im Jahr 2024 verwendet eine bestimmte Luftreinigermarke einen CsxWO₃/ZnO- Filter (~20 nm), VOC-Entfernung ~90 %, PM_{2,5}-Erfassung ~95 %, Jahresproduktion ~5 Tonnen, Kosten ~450 USD/kg.
 - **Verfahren** : Grünsynthese + Imprägnierungsmethode, spezifische Oberfläche ~100 m²/g.
 - **Markt** : Der Markt für Luftreinigung wird im Jahr 2025 voraussichtlich 5 Milliarden US-Dollar erreichen.
- **Solarthermie** :
 - **Fall** : Im Jahr 2024 entwickelte CTIA GROUP LTD eine CsxWO₃-Beschichtung (~50 µm) für Solarkollektoren mit einem Wirkungsgrad von ~60 %, Kosten von ~30 USD/m² und einer Jahresproduktion von ~1 Tonne.
 - **Verfahren** : Sol-Gel-Methode + Sprühen, Arbeitstemperatur ~150–250°C.
 - **Markt** : Der Markt für die Nutzung von Solarthermie wird im Jahr 2030 voraussichtlich 2 Milliarden US-Dollar erreichen.
- **Wasserstoffspeicherung** :
 - **Fall** : Im Jahr 2023 verwendet ein Wasserstoffenergieunternehmen CsxWO₃/Pd-Wasserstoffspeichermaterial (~20 nm) mit einer Kapazität von ~1,5 Gew.- %, Kosten von ~600 USD/kg und einer Jahresproduktion von ~0,5 Tonnen.
 - **Prozess** : Grüne Synthese + Hochdruckreaktion, Desorptionstemperatur ~150 °C.
 - **Markt** : Der Markt für Wasserstoffspeicherung wird im Jahr 2030 voraussichtlich eine Milliarde US-Dollar erreichen.
- **Marktherausforderungen** :
 - Kostenwettbewerbsfähigkeit: CsxWO₃ (~400 USD/kg) ist teurer als herkömmliche Materialien (wie ITO ~200 USD/kg).
 - Marktbekanntheit: Die Anwendung von CsxWO₃ muss gefördert werden und der Markeneffekt ist schwach.
 - Verbesserungen: Staatliche Subventionen (~20 % der Kosten), gemeinsames Marketing, Marktanteil um ~30 % gesteigert.
- **Aussicht** :
 - Bis 2030 wird der CsxWO₃-Markt voraussichtlich eine Milliarde US-Dollar erreichen, mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von ca. 15 %.
 - Schlüsselbereiche: Grüne Gebäude (~40 % Anteil), neue Energie (~30 %), Umweltschutz (~20 %).

Marktanwendungsfälle belegen den kommerziellen Wert von CsxWO₃ und die Produktion im großen Maßstab wird die Kosten weiter senken.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Kapitel 8: Normen und Vorschriften für Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsium-Wolfram-Bronze ($CsxWO_3$, $0 < x \leq 1$) muss bei der Verwendung in intelligenten Fensterfolien, der Energiespeicherung und im Umweltschutz internationalen und nationalen Normen, Umwelt- und Sicherheitsvorschriften sowie Arbeitsschutzanforderungen entsprechen. In diesem Kapitel werden die internationalen und nationalen Normen (ISO, GB/T), Umwelt- und Sicherheitsvorschriften (REACH, RoHS), die Risikobewertung von Nanomaterialien, Arbeitsschutzanforderungen, die Produktzertifizierung und -konformität von $CsxWO_3$ sowie das Sicherheitsdatenblatt (MSDS) für $CsxWO_3$ der CTIA GROUP LTD ausführlich erörtert. Der Inhalt umfasst Standardisierung, Einhaltung gesetzlicher Vorschriften, Risikomanagement, sicheren Betrieb und Zertifizierungsprozesse und bietet rechtliche und technische Leitlinien für die Forschung und Entwicklung, Produktion und Vermarktung von $CsxWO_3$.

8.1 Internationale und nationale Normen für Cäsium-Wolfram-Bronze (ISO, GB/T)

Internationale und nationale Normen liefern Spezifikationen für die Leistung, Prüfung und Anwendung von $CsxWO_3$ und gewährleisten so die Produktqualität und den Marktzugang.

- **Internationale Standards :**

- **ISO 20495:2018** (Nanotechnologie – Prüfung optischer Eigenschaften von Nanomaterialien):
 - **Anwendbarkeit** : Standardisiert die Prüfung der NIR-Absorption (~70 % bei 1000 nm) und der sichtbaren Lichtdurchlässigkeit (~80 % bei 400–700 nm) von $CsxWO_3$.
 - **Anforderungen** : UV-Vis-NIR-Spektrometer (200–2500 nm, Auflösung ~1 nm), Standardprobe (BaSO₄-Matrix), Fehler <3 %.
 - **Anwendung** : Intelligente Fensterfolie, die eine NIR-Abschirmrate von > 70 % aufweisen muss.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ISO 14782:1999** (Umweltbeständigkeit optischer Beschichtungen):
 - **Anwendbarkeit: Testen Sie** die Anti-Aging-Leistung der CsxWO₃-Beschichtung (~50 µm) (5000 h Xenonlampe, Dämpfung <5 %).
 - **Anforderungen** : Temperatur- und Feuchtigkeitszyklen (-40–85 °C, relative Luftfeuchtigkeit 20–95 %), Haftung (ASTM D3359, Klasse 5B).
 - **Anwendung** : Autoglas, Witterungsbeständigkeit > 5 Jahre.
- **ISO/TS 80004-1:2015** (Nanotechnologie – Terminologie):
 - **Anwendbarkeit** : CsxWO₃ wird als Nanomaterial (~10–50 nm) definiert und die Partikelgrößenverteilung muss beachtet werden (Fehler <5 %).
 - **Anforderungen** : SEM/TEM-Untersuchung, Angabe der spezifischen Oberfläche (~80 m²/g).
- **Nationaler Standard (China)** :
 - **GB/T 2680-2021** (Optische Eigenschaften von Architekturglas):
 - **Anwendbarkeit** : Standardisieren Sie die Lichtdurchlässigkeit (~80 %), NIR-Abschirmung (~70 %) und den Wärmegewinnkoeffizienten (SHGC < 0,5) von CsxWO₃-Fensterfolien.
 - **Anforderungen** : Ulbrichtkugelspektrometer, Testumgebung (25 °C, RH 50 %), Fehler < 2 %.
 - **Anwendung** : Ökologisches Bauen, Energieeinsparungsrate ~40 %.
 - **GB/T 36403-2018** (Testmethoden für Nanomaterialien):
 - **Anwendbarkeit: XRD (hexagonale Phase >95 %), XPS (W⁵⁺ ~15 %) und Partikelgrößenprüfung (~20 nm) von CsxWO₃ sind spezifiziert.**
 - **Anforderungen** : Cu Kα-Quelle (~1,5406 Å), Auflösung ~0,5 eV, Detektionsfrequenz ~10 % Charge.
 - **Anwendung** : Qualitätskontrolle, Reinheit >99,8 %.
 - **GB 31570-2015** (Chemikalienemissionsstandards):
 - **Anwendbarkeit** : Standardisierung des CsxWO₃-Produktionsabgases (HCl <10 ppm, NH₃ <5 ppm) und der Abfallflüssigkeit (Cs⁺ <1 mg/L).
 - **Anforderungen** : Abgasabsorptionsturm, Neutralisierung der Abfallflüssigkeit (pH ~ 7), Überwachungszeitraum ~ 1 Monat.
- **Standardimplementierung** :
 - **Zertifizierungsstellen** : SGS, TÜV, Überprüfung der Einhaltung von Standards, Kosten ~5000 USD/Projekt.
 - **Compliance-Kosten** : Testgeräte (XRD, SEM usw.) ~0,5 Millionen USD, Tests ~10 USD/kg.
 - **Herausforderungen** : Die Standards für Nanomaterialien hinken hinterher und es fehlen spezielle Standards für CsxWO₃.
 - **Verbesserung** : Nehmen Sie an ISO/TC 229 (Nanotechnologie) teil und fördern Sie die Formulierung von CsxWO₃-Standards.

Die Einhaltung von Standards ist die Grundlage für die Kommerzialisierung von CsxWO₃ und muss internationalen Standards entsprechen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2 Umwelt- und Sicherheitsvorschriften für Cäsium-Wolfram-Bronze (REACH, RoHS)

Umwelt- und Sicherheitsvorschriften stellen sicher, dass die Herstellung und Verwendung von CsxWO₃ weder der Umwelt noch dem menschlichen Körper schadet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf EU REACH und RoHS.

- **REACH (EG 1907/2006) :**
 - **Anwendbarkeit** : Regelt die Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von CsxWO₃ als chemische Substanz.
 - **Erfordern** :
 - **Registrierung** : Bei einer Jahresproduktion von > 1 Tonne muss ein Chemikaliensicherheitsbericht (CSR) eingereicht werden, der Angaben zur Toxizität (LD₅₀ > 2000 mg/kg), Ökotoxizität (LC₅₀ > 100 mg/l) und Umweltpersistenz (Halbwertszeit ~ 30 Tage) von CsxWO₃ enthält.
 - **Bewertung** : Die ECHA bewertet das SVHC-Risiko (besonders besorgniserregende Stoffe) von CsxWO₃, und Cs⁺ kann als Kandidatenstoff aufgeführt werden (<0,1 Gew.-%).
 - **Einschränkungen** : Abwasser-Cs⁺-Abfluss <1 mg/l, erfordert Neutralisationsbehandlung (Ca(OH)₂, pH~7).
 - **Kosten der Einhaltung: Registrierung** ~ 10.000 USD/Stoff, Abfallbehandlung ~ 50 USD/kg (solvothermische Methode).
 - **Fall** : Im Jahr 2023 hat ein Unternehmen CsxWO₃ (~100 Tonnen/Jahr) über REACH registriert und auf den EU-Markt für Fensterfolien exportiert.
- **RoHS (2011/65/EU) :**
 - **Anwendbarkeit** : Begrenzen Sie die schädlichen Substanzen (wie Pb, Cd) in CsxWO₃ in elektronischen und elektrischen Geräten.
 - **Erfordern** :
 - CsxWO₃-Verunreinigungen (Pb, Cd) <0,01 Gew.-%, erfordern ICP-MS-Erkennung (Nachweisgrenze ~0,001 Gew.-%).
 - Geeignet für elektronische Beschichtungen (z. B. Sensoren), NIR-Abschirmrate ~70 %.
 - **Compliance-Kosten** : Prüfung ~200 USD/Charge, Gerätewartung ~5000 USD/Jahr.
 - **Fall** : Im Jahr 2024 haben CsxWO₃-Sensoren die RoHS-Zertifizierung bestanden und wurden in Luftreinigern eingesetzt, mit einem Marktanteil von ~5 %.
- **Sonstige Regelungen :**
 - **EPA TSCA (USA)** : CsxWO₃ muss eine PMN (New Chemical Substance Notification) einreichen, die Gebühr beträgt ca. 2.500 USD und der Zyklus beträgt ca. 90 Tage.
 - **GB 30526-2014 (China)** : Beschränkung gefährlicher Substanzen in elektronischen Materialien, CsxWO₃ muss Hg < 0,1 Gew.-% einhalten.
 - **WEEE (2012/19/EU)** : CsxWO₃-Produkte müssen recycelt werden (Recyclingquote > 80 %), um die Umweltbelastung zu reduzieren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Herausforderung :**
 - Regulatorische Unterschiede: REACH erfordert einen Cs⁺-Gehalt von <1 mg/l für flüssige Abfälle, der chinesische Standard liegt bei <5 mg/l.
 - Nanoskalige Eigenschaften: CsxWO₃ (~20 nm) kann eine zusätzliche Regulierung auslösen (<100 nm).
 - **Verbesserung :** Einheitliche Testmethoden (ISO 17025), wodurch die Compliance-Kosten um ca. 20 % gesenkt werden.

Die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften ist für den globalen Markt für CsxWO₃ von entscheidender Bedeutung und muss dynamisch aktualisiert werden.

8.3 Risikobewertung von Nanomaterialien aus Cäsium-Wolfram-Bronze

Da es sich bei CsxWO₃ um ein Nanomaterial (~10–50 nm) handelt, muss es auf seine potenziellen Risiken für Mensch und Umwelt untersucht werden, um seine sichere Anwendung zu gewährleisten.

- **Rahmen für die Risikobewertung :**
 - **OECD-Leitlinien für Nanomaterialien (2013) :**
 - **Schritte :** Expositionsbewertung (Herstellung, Transport, Verwendung), Toxizitätsbewertung (Inhalation, Haut, Einnahme), Risikocharakterisierung (Dosis-Wirkung).
 - **Anwendbarkeit :** CsxWO₃-Pulver (~20 nm) kann während der Produktion Aerosole (~0,1 mg/m³) erzeugen.
 - **ISO/TR 13121:2011 (Nano-Risikomanagement):**
 - **Anforderungen :** Identifizieren Sie den Expositionspfad von CsxWO₃ (Inhalation > 90 %) und bewerten Sie die Toxizität (LC₅₀ > 100 mg/l).
 - **Tools :** Das PBPK-Modell sagt CsxWO₃-Ablagerungen in der Lunge voraus (~10 %).
- **Toxizitätsbewertung :**
 - **Toxizität beim Einatmen :** CsxWO₃ (~20 nm) Aerosol, LC₅₀ > 5 mg/l (Ratte, 4 h), keine akute Lungentoxizität.
 - **Hautkontakt :** nicht reizend (Kaninchen, 24 h), Hautabsorptionsrate <0,1 %.
 - **Orale Toxizität :** LD₅₀ > 2000 mg/kg (Ratte), geringe Toxizität.
 - **Zytotoxizität :** IC₅₀ ~ 100 µg/ml (A549-Zellen), Toxizität bei Nanopartikeln (<20 nm) um ~20 % erhöht.
 - **Ökotoxizität :** LC₅₀ > 100 mg/l (Fisch, 96 h), keine signifikante Wasserverschmutzung.
- **Expositionsbewertung :**
 - **Herstellung :** Beim Mahlen/Dispergieren entsteht Aerosol (~0,1 mg/m³), Belüftung ist erforderlich (Windgeschwindigkeit > 0,5 m/s).
 - **Verwendung :** CsxWO₃-Fixierung in Fensterfolien/-beschichtungen, Freisetzungsrate <0,001 Gew.-% (5000 h Alterung).
 - **Entsorgung :** Bei der Verbrennung kann Cs⁺ (<0,1 mg/kg) freigesetzt werden und es ist eine Hochtemperaturbehandlung (>1000 °C) erforderlich.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Risikocharakterisierung :**
 - **Risiko für Menschen :** Geringes Risiko (Exposition $<0,01 \text{ mg/m}^3$, niedriger als NOAEL $\sim 0,1 \text{ mg/m}^3$).
 - **Umweltrisiko :** Geringes Risiko (Wasser $\text{Cs}^+ <0,1 \text{ mg/l}$, niedriger als PNEC $\sim 1 \text{ mg/l}$).
 - **Hochrisikoszenario :** Austritt von Nanopulver ($>1 \text{ mg/m}^3$), PSA (N95-Maske) erforderlich.
- **Managementmaßnahmen :**
 - **Technische Kontrolle :** geschlossener Reaktor, HEPA-Filterung (Effizienz $> 99,97 \%$).
 - **Überwachung :** Aerosoldetektor (Auflösung $\sim 0,001 \text{ mg/m}^3$), Zyklus ~ 1 Woche.
 - **Kosten :** Bewertung $\sim 5.000 \text{ USD/Projekt}$, Überwachungs-ausrüstung $\sim 10.000 \text{ USD}$.
- **Herausforderung :**
 - Unzureichende Daten zur Langzeittoxizität (> 5 Jahre Exposition).
 - Die Auswirkungen der Nanogröße sind komplex, wobei die Toxizität bei $<10 \text{ nm}$ um etwa 30% zunimmt.
 - **Verbesserung :** Entwicklung eines In-vitro-Modells (3D-Lungenzellen) mit einer um ca. 20% erhöhten Vorhersagegenauigkeit.

Die Risikobewertung liefert eine wissenschaftliche Grundlage für die sichere Herstellung und Anwendung von CsxWO_3 .

8.4 Arbeitsschutzanforderungen für Cäsium-Wolfram-Bronze

Die Herstellung und Handhabung von CsxWO_3 unterliegt den Anforderungen des Arbeitsschutzes (OHS), um die Arbeitnehmer vor Nanopulvern, Chemikalien und hohen Temperaturen zu schützen.

- **Arbeitsschutzvorschriften :**
 - **OSHA (USA) :** 29 CFR 1910.134, CsxWO_3 -Aerosolgrenzwert $<0,1 \text{ mg/m}^3$ (8 h TWA).
 - **GBZ 2.1-2019 (China):** $\text{Cs}^+ <0,05 \text{ mg/m}^3$ am Arbeitsplatz und $<1 \text{ mg/m}^3$ im Staub.
 - **EU-Arbeitsschutz (89/391/EWG) :** Arbeitgeber sind verpflichtet, persönliche Schutzausrüstung und Schulungen bereitzustellen, und der Risikobewertungszyklus beträgt ca. ein Jahr.
- **Hauptgefahren :**
 - **Nanopulver :** CsxWO_3 ($\sim 20 \text{ nm}$) kann bei Einatmen eine Lungenentzündung auslösen ($<0,1 \text{ mg/m}^3$ Langzeitexposition).
 - **Chemikalien :** CsOH ($\text{pH} > 12$) ist ätzend, flüchtiges WCl_6 ($< 10 \text{ ppm}$) reizt die Atemwege.
 - **Hohe Temperaturen :** Verbrennungsgefahr in Reaktoren ($\sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$) oder Öfen ($\sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$).
 - **Abgas :** HCl/NH_3 -Emissionen ($<10 \text{ ppm}$), die eine Abgasbehandlung erfordern.
- **Kontrollmaßnahmen :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Technische Kontrollen :**
 - Lokale Absaugung (Windgeschwindigkeit > 0,5 m/s), HEPA-Filterung (> 99,97 %).
 - Geschlossenes Zufuhrsystem, Leckagerate <0,1 %.
- **Administrative Kontrolle :**
 - Schulung: Nanosicherheit , Umgang mit Chemikalien, Dauer ~6 Monate.
 - Schichtarbeit: Heiarbeit <4 h/Schicht, Ruhebereich (25 °C, RH 50 %).
- **Persönliche Schutzausrüstung (PSA) :**
 - Atemschutz: N95-Maske (Schutzfaktor > 10), PAPR für schwere Szenarien (> 100).
 - Hautschutz: Nitrilhandschuhe (Dicke > 0,3 mm), Chemikalienschutzkleidung (EN 14605).
 - Augenschutz: Abgedichtete Schutzbrille (ANSI Z87.1).
- **Gesundheitsüberwachung :**
 - **Körperliche Untersuchung :** Lungenfunktion (FEV1), Blut-Cs⁺ (<0,01 mg/l), Zyklus ~1 Jahr.
 - **berwachungsgerte :** Aerosolmonitor (~0,001 mg/m³), Cs⁺-Analyse (ICP-MS, ~0,001 mg/L).
 - **Kosten :** Körperliche Untersuchung ~100 USD/Person/Jahr, Überwachung ~5000 USD/Jahr.
- **Notfallmaßnahmen :**
 - **Leckage :** evakuieren, belüften, mit Adsorptionsmittel (Aktivkohle) reinigen, CsxWO₃-Rückgewinnungsrate > 95 %.
 - **Erste Hilfe :** Bei Einatmen an die frische Luft gehen und Haut/Augen mit viel Wasser spülen (> 15 Min.).
 - **Übung :** Zyklus ~6 Monate, Reaktionszeit <5 Min.
- **Herausforderung :**
 - Die Compliance der Arbeitnehmer ist gering (PSA-Tragequote ca. 80 %).
 - Das Bewusstsein für die Gefahren von Nanomaterialien ist unzureichend und die Schulungsabdeckungsrate liegt unter 90 %.
 - **Verbesserung :** VR-Training, Compliance-Rate um ca. 20 % erhöht; Echtzeitüberwachung und Alarm, Reaktionszeit um ca. 50 % reduziert.

Arbeitsschutzmaßnahmen gewährleisten die Sicherheit der CsxWO₃-Produktion und müssen kontinuierlich optimiert werden.

Konformität von Cäsium-Wolfram-Bronze

Durch die Produktzertifizierung werden Leistung, Sicherheit und Marktkonformität von CsxWO₃ bestätigt und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt gesteigert.

- **Wichtigste Zertifizierungen :**
 - **CE-Kennzeichnung (EU) :**
 - **Eignung :** CsxWO₃-Fensterfolie/Sensor, konform mit EN 410 (optische

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistung) und EN 50581 (RoHS).

- **Anforderungen** : NIR-Abschirmrate > 70 %, gefährliche Substanzen (Pb < 0,01 Gew. %), technische Unterlagen (TDF) 10 Jahre lang aufbewahrt.
- **Prozess** : Prüfung durch Dritte (SGS), Kosten ~5000 USD, Zyklus ~1 Monat.
- **UL-Zertifizierung (USA)** :
 - **Anwendbarkeit** : Die CsxWO₃-Beschichtung wird für Baumaterialien verwendet und entspricht UL 410 (Rutschfestigkeit).
 - **Anforderungen** : Witterungsbeständigkeit (5000 h, Dämpfung <5 %), Sicherheit (ungiftige Freisetzung).
 - **Prozess** : UL-Labortests, Kosten ~10.000 USD, Zyklus ~2 Monate.
- **CCC-Zertifizierung (China)** :
 - **Anwendbarkeit** : Elektronisches Material CsxWO₃, entspricht GB/T 2680 und GB 4943.1 (elektrische Sicherheit).
 - **Anforderungen** : Transmission ~80 %, Leitfähigkeit ~10³ S/cm, Cs⁺-Rest <0,01 Gew.- %.
 - **Prozess** : CQC-Überprüfung, Kosten ~3000 USD, Zyklus ~1 Monat.
- **Compliance-Management** :
 - **Rückverfolgbarkeit der Lieferkette** : Von den Rohstoffen (Cs₂CO₃/WO₃) bis zu den Produkten (~20 nm), Chargenprotokolle werden 5 Jahre lang aufbewahrt.
 - **Prüfbericht** : XRD, SEM, XPS, UV-Vis-NIR, gemäß ISO 17025, Fehler <3 %.
 - **Dokumentenmanagement** : ERP-System, Digitalisierung von Compliance-Dokumenten, Abruffeffizienz >95 %.
- **Zertifizierungsfall** :
 - Im Jahr 2024 erhielt die Fensterfolie CsxWO₃ eines Unternehmens die CE-Zertifizierung und wurde mit einem Umsatz von ca. 50 Millionen US-Dollar in die Europäische Union exportiert.
 - Im Jahr 2023 erhielt der CsxWO₃-Sensor die CCC-Zertifizierung und eroberte den chinesischen Markt für Luftreinigung mit einem Anteil von ca. 10 %.
- **kosten** :
 - Zertifizierung: ~3.000–10.000 USD/Projekt, ~2 % der Produktionskosten.
 - Tests: ~200 USD/Charge, Gerätewartung ~10.000 USD/Jahr.
 - **Verbesserung** : Chargenzertifizierung, Kostensenkung ~30 %; gemeinsame Testeinrichtungen, Kostensenkung ~20 %.
- **Herausforderung** :
 - Lange Zertifizierungsdauer (~1–2 Monate), was den Markteintritt verzögert.
 - Unterschiede in den nationalen Standards (CE vs. CCC) erhöhen die Compliance-Kosten um ca. 15 %.
 - **Verbesserung** : Zertifizierungsplanung im Voraus, Reduzierung der Zykluszeit um ca. 50 %; Teilnahme an der Standardisierung, um Unterschiede zu verringern.

Die Produktzertifizierung ist ein Schlüsselement bei der Vermarktung von CsxWO₃ und erfordert ein effizientes Management.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.6 CTIA GROUP LTD Cäsium-Wolfram-Bronze-Sicherheitsdatenblatt

Nachfolgend finden Sie das Sicherheitsdatenblatt (MSDS) von CTIA GROUP LTD Cs_xWO₃ (x=0,32, ~20 nm), das GHS und GB/T 16483-2008 entspricht.

Sicherheitsdatenblatt (MSDS)

1. Chemische Identifizierung :

- Chemische Bezeichnung: Cäsium-Wolfram-Bronze (Cs_{0,32}WO₃)
- CAS-Nr.: Keine (Nanomaterialien)
- Molekularformel: Cs_{0,32}WO₃
- Produktcode: CTB-032-N20
- Lieferant: CTIA GROUP LTD, Adresse: 3. Stock, Nr. 25, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, China, Tel.: +86- 592-5129595

2. Gefahrenübersicht :

- GHS-Klassifizierung: Gefahr durch Einatmen von Staub (Kategorie 4), H332: Gesundheitsschädlich beim Einatmen.
- Physikalische Gefahren: Nicht explosiv/entzündlich (Flammpunkt > 500 °C).
- Gesundheitsgefahren: Einatmen kann zu Lungenreizungen führen (<0,1 mg/m³ Langzeitexposition).
- Umweltgefahren: Geringe Ökotoxizität (LC₅₀ > 100 mg/l).
- Signalwort: Warnung

3. Zutateninformationen :

- Cs_{0,32}WO₃: >99,8 Gew.-%
- Verunreinigungen: Fe, Cl <0,01 Gew.-%
- Partikelgröße: ~20 nm, Oberfläche: ~80 m²/g

4. Erste-Hilfe-Maßnahmen :

- **Einatmen** : In einen belüfteten Bereich bringen, bei Bedarf Sauerstoff verabreichen, ärztliche Hilfe aufsuchen.
- **Hautkontakt** : Mehr als 15 Minuten lang mit Wasser und Seife waschen und kontaminierte Kleidung ausziehen.
- **Augenkontakt** : Mehr als 15 Minuten lang mit Wasser spülen, die Augenlider anheben und einen Arzt aufsuchen.
- **Nach Verschlucken** : Mund ausspülen, Wasser trinken, kein Erbrechen herbeiführen, ärztliche Hilfe hinzuziehen.

5. Maßnahmen zur Brandbekämpfung :

- Feuerlöschmittel: Trockenpulver, CO₂, Wasser sind verboten (kann CsOH freisetzen).
- Besondere Gefahren: Bei hohen Temperaturen (>1000 °C) wird Cs⁺/WO₃-Dampf freigesetzt.
- Brandschutz: Umgebungsluftunabhängiges Atemschutzgerät, Chemikalienschutzkleidung.

6. Notfallbehandlung bei Leckagen :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Schutz** : N95-Maske, Nitrilhandschuhe, versiegelte Schutzbrille.
- **Reinigung** : Mit Adsorptionsmittel (Aktivkohle) sammeln, Behälter verschließen, Rückgewinnungsrate >95 %.
- **Umwelt** : Eindringen von Staub in Gewässer verhindern ($Cs^+ < 1 \text{ mg/L}$).

7. **Handhabung und Lagerung** :

- **Betrieb** : Geschlossenes System, lokale Absaugung (>0,5 m/s), Staub vermeiden (<0,1 mg/m³).
- **Lagerung** : In einem verschlossenen Behälter an einem trockenen (relative Luftfeuchtigkeit < 50 %) und kühlen (< 25 °C) Ort fern von Säuren/starken Oxidationsmitteln lagern.

8. **Expositionskontrollen und persönliche Schutzausrüstung** :

- **Grenzwert** : $CsWO_3 < 0,1 \text{ mg/m}^3$ (8 h TWA, GBZ 2.1-2019).
- **Technische Kontrolle** : HEPA-Filterung (>99,97 %), geschlossene Zufuhr.
- **PSA** : N95-Maske, Nitrilhandschuhe (>0,3 mm), Schutzbrille.

9. **Physikalische und chemische Eigenschaften** :

- Aussehen: Dunkelblaues Pulver
- Dichte: ~6,5 g/cm³
- Schmelzpunkt: >1000°C
- Löslichkeit: Unlöslich in Wasser, schwer löslich in starker Säure (pH <2)
- Oberfläche: ~80 m²/g

10. **Stabilität und Reaktivität** :

- Stabilität: Stabil bei 500 °C, zersetzt sich bei >1000 °C.
- Reaktivität: Reagiert mit starker Säure (HCl) unter Freisetzung von Cs⁺.
- Zu vermeidende Stoffe: Starke Oxidationsmittel (H₂O₂), hohe Temperaturen und saure Umgebung.

11. **Toxikologische Informationen** :

- Akute Toxizität: LD₅₀ > 2000 mg/kg (oral, Ratte), LC₅₀ > 5 mg/l (Inhalation, 4 h).
- Chronische Toxizität: Langfristiges Einatmen (<0,1 mg/m³) kann eine Lungenentzündung verursachen.
- Karzinogenität: Von der IARC nicht als Karzinogen aufgeführt.
- Reproduktionstoxizität: Keine Daten, es wird empfohlen, die Exposition während der Schwangerschaft zu vermeiden.

12. **Ökologische Informationen** :

- Ökotoxizität: LC₅₀ > 100 mg/L (Fisch, 96 h), keine signifikante Wasserverschmutzung.
- Persistenz: Halbwertszeit ~30 Tage (wässrig).
- Bioakkumulation: BCF < 10, geringes Akkumulationsrisiko.

13. **Entsorgung** :

- Methode: Versiegeln und einsammeln und die Entsorgung durch Sondermüllentsorgungsanlagen (Verbrennung > 1000 °C) betrauen.
- Hinweis: Das Einleiten in Gewässer ist verboten, $Cs^+ < 1 \text{ mg/L}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Vorschriften: Entspricht GB 18597-2023 (Entsorgung gefährlicher Abfälle).

14. Versandinformationen :

- UN-Nummer: Keine (ungefährliche Güter).
- Verpackung: Versiegeltes Kunststofffass mit feuchtigkeitsbeständigem Etikett.
- Vorschriften: IATA DGR, IMDG, gemäß GB/T 191.

15. Vorschriften :

- REACH: Registrierungspflichtig (>1 Tonne/Jahr), SVHC-Kandidat (Cs + <0,1 Gew. %).
- RoHS: Pb, Cd <0,01 Gew.- %.
- China: GB 30526-2014, Hg <0,1 Gew.- %.

16. Weitere Informationen :

- Datum der Erstellung: 13. Juni 2025
- Revision: Erste Veröffentlichung
- Hinweis: Nur als Referenz. Für spezifische Vorgänge wenden Sie sich bitte an einen Fachmann.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2-0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.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

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



Kapitel 9: Nachhaltigkeit und Umweltauswirkungen von Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsiumwolframbronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) besitzt aufgrund ihrer hervorragenden Nahinfrarotabsorption (NIR) (~70 % bei 1000 nm), ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit (~ 10^3 S/cm) und ihrer chemischen Stabilität (>500 °C) ein erhebliches Potenzial in den Bereichen Energieeinsparung, Energiespeicherung und Umweltschutz. Bei ihrer Herstellung und Anwendung müssen jedoch Umweltauswirkungen, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. In diesem Kapitel werden die Umweltverträglichkeitsprüfung, umweltfreundliche Fertigungstechnologie, Abfallbehandlung und Recycling, der CO₂-Fußabdruck und die Strategien zur Emissionsreduzierung des Cs_xWO_3 -Herstellungsprozesses sowie die politischen Bestrebungen für eine nachhaltige Entwicklung detailliert erörtert. Es analysiert die Umweltbelastung, den Weg zu umweltfreundlichen Technologien und die politische Unterstützung und bietet wissenschaftliche und praktische Anleitungen zur Verwirklichung einer nachhaltigen Entwicklung von Cs_xWO_3 .

9.1 Umweltverträglichkeitsprüfung des Cäsium-Wolfram-Bronze-Produktionsprozesses

Die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) quantifiziert die Auswirkungen der Cs_xWO_3 -Produktion auf Ökosysteme, Ressourcen und die menschliche Gesundheit mithilfe des Ökobilanz-Ansatzes (LCA) (ISO 14040:2006).

- **LCA-Rahmen :**
 - **Umfang :** Von der Rohstoffgewinnung (Cs_2CO_3 , WO_3) über die Produktion (Solvothermal-/Hydrothermal-/Festphasenverfahren), die Verwendung (Fensterfolie, Batterie) bis hin zur Abfallbehandlung.
 - **Funktionale Einheit :** 1 kg Cs_xWO_3 ($x=0,32$, ~20 nm).
 - **Datenquellen :** Produktionsdaten (Energieverbrauch ~200 kWh/kg), Emissionen ($HCl < 10$ ppm), Literatur (Ecoinvent- Datenbank).
- **Wichtigste Umweltauswirkungen :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ressourcenverbrauch :**
 - **Cäsium (Cs) :** Weltweite Reserven ~90.000 Tonnen, jährlicher Abbau ~20 Tonnen, Energieverbrauch für die Cs₂CO₃-Gewinnung ~500 MJ/kg, entspricht ~30 % der Ökobilanz.
 - **Wolfram (W) :** Reserven ~3,5 Millionen Tonnen, Energieverbrauch zur WO₃-Reinigung ~100 MJ/kg, entspricht ~20 % der Ökobilanz.
 - **Wasser :** Solvothermale Methode ~50 l/kg, Hydrothermale Methode ~100 l/kg, Festphasenmethode ~10 l/kg.
- **Energieverbrauch :**
 - Solvothermale Methode: ~200 kWh/kg (~720 MJ/kg), hydrothermale Methode: ~150 kWh/kg, Festphasenmethode: ~100 kWh/kg.
 - ~40 % der Ökobilanz, hauptsächlich elektrische Heizung (Reaktor ~180–200 °C) und Trocknung (~100 °C).
- **Emission :**
 - **Abgas :** Solvothermale Methode HCl~0,5 kg/kg, NH₃~0,1 kg/kg (Hydrothermale Methode), CO₂~0,3 kg/kg (Festphasenmethode).
 - **Abfallflüssigkeit :** Cs⁺-Restgehalt ~0,01–0,1 mg/l, muss neutralisiert werden (Ca(OH)₂, pH ~7).
 - **Fester Abfall :** Reaktionsrückstand ~0,1 kg/kg, enthält Cs/W ~1 Gew.-%.
- **Ökologische Auswirkungen :**
 - Eutrophierung von Gewässern: NH₃-Emissionen, potentiell ~0,01 kg PO₄³⁻/kg.
 - Bodenkontamination: Cs⁺-Akkumulation (<0,1 mg/kg Boden), Langzeitrisiko <1 %.
 - Treibhauspotenzial (GWP): Solvothermale Methode ~150 kg CO₂e/kg, Hydrothermale Methode ~100 kg CO₂e/kg, Festphasenmethode ~50 kg CO₂e/kg.
- **Auswertungsergebnisse :**
 - **Hauptbeiträge :** Cs₂CO₃-Extraktion (~40 % GWP), Energieverbrauch (~30 %), Abgasbehandlung (~20 %).
 - **Umweltbelastung :** Solvothermale Methode > Hydrothermale Methode > Festphasenmethode, die Festphasenmethode ist die umweltfreundlichste (GWP ~50 kg CO₂e/kg).
 - **Sensitivitätsanalyse :** Cs₂CO₃-Preisschwankungen (±20 %) wirken sich um ~15 % auf die Kosten aus, und eine Verbesserung der Energieeffizienz um 10 % reduziert das GWP um ~8 %.
- **Abhilfemaßnahmen :**
 - Rohstoffe optimieren: Lithiumglimmer als Nebenprodukt Cs verwenden (Yichun, ~20 % Reserven) und Energieverbrauch um ~30 % senken.
 - Abfallflüssigkeitsrückgewinnung: Cs⁺-Rückgewinnungsrate ~90 %, Emissionsreduzierung ~50 %.
 - Energieersatz: Solarstromversorgung (~0,05 USD/kWh), GWP-Reduktion ~20 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Beispiele :**
 - Im Jahr 2024 führte ein Unternehmen eine Ökobilanz mit der hydrothermalen CsxWO₃-Methode (ca. 100 Tonnen/Jahr) durch, wobei das GWP bei ca. 100 kg CO₂e/kg lag. Nach der Optimierung konnte der Ausstoß auf ca. 80 kg CO₂e/kg gesenkt und die Kosten um ca. 10 % (ca. 400 USD/kg) reduziert werden.
- **Herausforderung :**
 - Die Cs-Ressourcen sind knapp und die Ökobilanzdaten unzureichend (<10 % der weltweiten Produktion).
 - der Nanomaterialfreisetzung (~0,001 Gew.-%) sind unbekannt.
 - **Verbesserung :** Verbessern Sie die LCA-Datenbank und überwachen Sie Cs⁺ (<0,01 mg/l) dynamisch.

EIA bietet Datenunterstützung für die Optimierung der CsxWO₃-Produktion mit Schwerpunkt auf Ressourcen und Energieverbrauch.

9.2 Grüne Fertigungstechnologie von Cäsium-Wolfram-Bronze

Grüne Fertigungstechnologie reduziert die Umweltbelastung der CsxWO₃-Produktion durch niedrigen Energieverbrauch, geringe Emissionen und effiziente Prozesse im Einklang mit ISO 14001 und den Grundsätzen der grünen Industrie.

- **Grüne Technologie :**
 - **Mikrowellenunterstützte Solvothermalmethode :**
 - **Prinzip :** Schnelles Erhitzen in der Mikrowelle (~1000 W) (~180 °C, 10 Min.), Reaktionszeit um ~50 % reduziert (herkömmlich ~12 h).
 - **Vorteile :** Energieverbrauch ~100 kWh/kg (reduziert um ~50 %), Ausbeute ~85 %, Partikelgröße ~10–20 nm.
 - **Ausrüstung :** Mikrowellenreaktor (~20.000 USD), Druck >5 MPa.
 - **Grüne Synthese bei Normaldruck :**
 - **Prinzip :** Cs₂CO₃ und Na₂WO₄ in wässriger Lösung (~80 °C, pH~8) und ein grünes Reduktionsmittel (Glukose) erzeugen CsxWO₃ (~20 nm).
 - **Vorteile :** Kein hoher Druck (<0,1 MPa), Abfallflüssigkeit Cs⁺ <0,01 mg/l, Energieverbrauch ~50 kWh/kg.
 - **Ausrüstung :** Rührreaktor (~10.000 USD), Zentrifuge (~15.000 USD).
 - **Plasmaunterstützte Festphasenmethode :**
 - **Prinzip :** Ar /H₂-Plasma (~5000 K) aktiviert Cs₂CO₃/WO₃, die Reaktionstemperatur sinkt um ~200 °C (~700 °C) und die Reaktionszeit verkürzt sich um ~2 Stunden.
 - **Vorteile :** CO₂-Emissionen ~0,1 kg/kg (Reduzierung um ~50 %), Partikelgröße ~1–5 µm .
 - **Ausrüstung :** Plasmaofen (~50.000 USD), Abgasrückgewinnung (~10.000 USD).
- **Energieoptimierung :**
 - **Erneuerbare Energien :** Solarenergie (~20 % Stromverbrauch, ~0,05 USD/kWh),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Windenergie (~10 %), Energieverbrauch um ~20 % reduziert.

- **Abwärmerückgewinnung** : Die Abwärme des Reaktors (~100 °C) wird zum Trocknen genutzt, wodurch die Energieeffizienz um ~30 % erhöht wird.
- **KI-Steuerung** : Echtzeitoptimierung von Temperatur (± 1 °C) und Druck ($\pm 0,05$ MPa), wodurch der Energieverbrauch um ~15 % ($R^2 > 0,95$) gesenkt wird.
- **Lösungsmittelkreislauf** :
 - **Ethanolrückgewinnung** : Destillation (~80 °C), Rückgewinnungsrate ~80 %, Kostensenkung ~10 % (~40 USD/kg).
 - **Wasserkreislauf** : Umkehrosmose (RO, >99 % Reinheit), Wasserverbrauch um ~50 % reduziert (~50 l/kg).
 - **Ausrüstung** : Destillationskolonne (~20.000 USD), RO-System (~15.000 USD).
- **Emissionskontrolle** :
 - **Abgas** : HCl/NH₃-Absorber (Effizienz > 95 %), Emissionen < 5 ppm.
 - **Abwasser** : Neutralisation + Fällung (Ca(OH)₂), Cs⁺ < 0,01 mg/L, gemäß GB 31570.
 - **Fester Abfall** : Rückstandsrostung (~1000 °C), Cs/W-Rückgewinnungsrate ~90 %.
- **Beispiele** :
 - Im Jahr 2023 führt ein Unternehmen die Mikrowellen-Hydrothermalmethode ein (~50 Tonnen/Jahr), mit einem Energieverbrauch von ~100 kWh/kg, einem Abfallflüssigkeitsgehalt von Cs⁺ < 0,01 mg/L und Kosten von ~350 USD/kg.
- **Herausforderung** :
 - Grüne Ausrüstung erfordert eine hohe Anfangsinvestition (~0,2 Millionen USD).
 - Die Partikelgrößenkontrolle bei der Atmosphärendruckmethode ist schwierig (Verteilungsfehler ~10%).
 - **Verbesserung** : Modulare Ausrüstung, Amortisationszeit der Investition ca. 3 Jahre; KI-optimierte Partikelgröße, Fehlerreduzierung ca. 5 %.

Grüne Fertigungstechnologie ist der Grundstein für eine nachhaltige Produktion von Cs_xWO₃, die ein Gleichgewicht zwischen Kosten und Umweltschutz erfordert.

9.3 Abfallbehandlung und Recycling von Cäsium-Wolfram-Bronze

Abfallbehandlung und Recycling verringern die Umweltbelastung durch die Produktion und Verwendung von Cs_xWO₃, verbessern die Ressourceneffizienz und entsprechen den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft.

- **Abfallart** :
 - **Abgas** : HCl (~0,5 kg/kg, Solvothermalmethode), NH₃ (~0,1 kg/kg, Hydrothermalmethode), CO₂ (~0,3 kg/kg, Festphasenmethode).
 - **Abfallflüssigkeit** : enthält Cs⁺ (~0,01–0,1 mg/l), WO₄²⁻ (~0,1 mg/l) und Ethanolrückstände (~5 g/l).
 - **Feste Abfälle** : Reaktionsrückstände (~0,1 kg/kg, Cs/W~1 Gew. %), Beschichtungsabfälle (~0,01 kg/m²).
- **Verarbeitungstechnologie** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Abgasbehandlung :**
 - **Methode :** Alkaliabsorption (NaOH, pH > 12), HCl/NH₃-Neutralisation, Effizienz > 95 %.
 - **Ausrüstung :** Absorptionsturm (~20.000 USD), Emissionsüberwachung (<5 ppm).
 - **Kosten :** ~10 USD/kg, ~2 % der Produktionskosten.
- **Abwasserbehandlung :**
 - **Methode :** Ausfällung (Ca(OH)₂, Cs⁺ < 0,01 mg/l) und Rückgewinnung von Ethanol (~80 %) durch Destillation.
 - **Ausrüstung :** Sedimentationstank (~10.000 USD), Destillationskolonne (~20.000 USD).
 - **Kosten :** ~50 USD/kg (solvothermale Methode), ~20 USD/kg (hydrothermale Methode).
- **Behandlung fester Abfälle :**
 - **Methode :** Hochtemperaturkalzinierung (~1000 °C, Argonatmosphäre), Cs/W-Rückgewinnungsrate ~90 %.
 - **Ausrüstung :** Drehrohrofen (~30.000 USD), ICP-MS (~50.000 USD).
 - **Kosten :** ~30 USD/kg, Recyclingvorteil ~100 USD/kg.
- **Recycling :**
 - **Cs-Rückgewinnung :** Cs⁺ in der Abfallflüssigkeit wird einem Ionenaustausch unterzogen (Harz D001, >95 % Effizienz), um Cs₂CO₃ mit einer Reinheit von >99,5 % zurückzugewinnen.
 - **W-Rückgewinnung :** Der Rückstand wird in Säure (HCl, pH ~ 2) gelöst, WO₃ (> 99,8 %) ausgefällt und für die Produktion zurückgeführt.
 - **Recycling der Beschichtung :** Abfallfensterfolie (~0,01 kg/m²) Mahlen + Säurewäsche, Cs_xWO₃-Rückgewinnungsrate ~80 %.
 - **Vorteile :** Das Recycling von Cs senkt die Kosten um ca. 20 % (ca. 200 USD/kg) und das Recycling von W senkt die Kosten um ca. 10 % (ca. 50 USD/kg).
- **Beispiele :**
 - Im Jahr 2024 recycelt ein Unternehmen Cs_xWO₃-Abfallflüssigkeit (~100 Tonnen/Jahr) mit einer Cs⁺-Rückgewinnungsrate von ~90 % und einer Kostensenkung von ~15 % (~400 USD/kg).
- **Herausforderung :**
 - Die Investitionen in Recyclinganlagen sind hoch (~0,1 Millionen USD).
 - Der Cs_xWO₃-Gehalt der Abfallbeschichtung ist gering (~1 Gew.-%) und die Rückgewinnungseffizienz liegt bei <80 %.
 - **Verbesserung :** Elektrochemische Rückgewinnung von Cs⁺, Effizienz um ca. 10 % gesteigert; mechanisches Entfernen der Beschichtung, Rückgewinnungsrate um ca. 20 % gesteigert.

Abfallbehandlung und Recycling verbessern die Ressourceneffizienz von Cs_xWO₃, was technologische Innovationen erfordert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.4 CO₂-Fußabdruck und Emissionsreduzierungsstrategie von Cäsium-Wolfram-Bronze

Durch die Analyse des CO₂-Fußabdrucks werden die Treibhausgasemissionen während des Lebenszyklus von Cs₂WO₃ quantifiziert. Strategien zur Emissionsreduzierung optimieren Produktion und Anwendung, um zur Erreichung der CO₂-Neutralitätsziele beizutragen.

- **CO₂-Fußabdruck-Analyse :**
 - **Methode :** Ökobilanz (ISO 14067:2018), Umfang: Rohstoffgewinnung, Produktion, Verwendung, Abfall.
 - **Daten :** Solvothermale Methode ~150 kg CO₂e/kg, hydrothermale Methode ~100 kg CO₂e/kg, Festphasenmethode ~50 kg CO₂e/kg.
 - **beitragen :**
 - Rohstoffe: Cs₂CO₃~60 kg CO₂e/kg (~40 %), WO₃~20 kg CO₂e/kg (~20 %).
 - Produktion: Elektrische Heizung ~50 kg CO₂e/kg (~30%), Abgas ~20 kg CO₂e/kg (~10%).
 - Verwendung: Fensterfolie spart Energie ~100 kWh/m²·Jahr, reduziert Emissionen ~80 kg CO₂e/m²·Jahr.
 - Entsorgung: Verbrennung ~5 kg CO₂e/kg (~5%).
 - **Gesamt-Fußabdruck :** Solvothermal ~150 kg CO₂e/kg, Lebenszyklus (10 Jahre) Nettoerduzierung ~50 kg CO₂e/kg (Fensterfolienanwendung).
- **Strategien zur Emissionsreduzierung :**
 - **Energiewende :**
 - Photovoltaik-Stromversorgung (~0,05 USD/kWh), CO₂-Emissionen um ~20 % reduziert (~30 kg CO₂e/kg).
 - Stromerzeugung durch Abwärme (~10 % Stromverbrauch), Reduzierung ~10 % (~15 kg CO₂e/kg).
 - **Prozessoptimierung :**
 - Mikrowellenreaktion (~100 kWh/kg), Reduzierung um ~30 % (~45 kg CO₂e/kg).
 - KI-Kontrolle (Temperatur ±1°C), Reduzierung ~15 % (~20 kg CO₂e/kg).
 - **Rohstoffsubstitution :**
 - Das Nebenprodukt Cs₂CO₃ (Lepidolit) verringerte sich um ~25 % (~15 kg CO₂e/kg).
 - WO₃ recyceln (>99,8 %), ~10 % reduzieren (~5 kg CO₂e/kg).
 - **Kohlenstoffabscheidung :**
 - CO₂-Absorption (Lösungen auf Aminbasis, Effizienz >90 %), Festphasenmethode reduziert ~50 % (~15 kg CO₂e/kg).
 - Ausrüstung: CCS-System (~50.000 USD), Kosten ~20 USD/kg.
- **Beispiele :**
 - Im Jahr 2024 führte ein Unternehmen die Photovoltaik- und Mikrowellen-Hydrothermale Methode (~50 Tonnen/Jahr) ein, mit einem CO₂-Fußabdruck von ~70 kg CO₂e/kg und einer Emissionsreduzierung von ~30 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Herausforderung :**
 - Die Anfangsinvestition in Photovoltaik ist hoch (~0,2 Millionen USD).
 - Unzureichende Daten zum CO₂-Fußabdruck von Cs₂CO₃ (<10 % Abdeckung).
 - **Verbesserungen** : Emissionshandel (~10 USD/Tonne CO₂e), Investitionsrückgewinnung ~50 %; Verbesserung der LCA-Datenbank.

Strategien zur Emissionsreduzierung reduzieren den CO₂-Fußabdruck der Cs₂WO₃-Produktion auf ~50–100 kg CO₂e/kg und tragen so zur CO₂-Neutralität bei.

9.5 Politische Bemühungen zur nachhaltigen Entwicklung von Cäsium-Wolfram-Bronze

Politisch orientiert: Förderung der umweltfreundlichen Produktion und Anwendung von Cs₂WO₃ durch Vorschriften, Subventionen und internationale Zusammenarbeit im Einklang mit den Zielen der nachhaltigen Entwicklung (SDGs).

- **Internationale Politik :**
 - **UN SDG 12 (Nachhaltige Produktion) :**
 - **Ziel** : Reduzierung des Ressourcenverbrauchs (<50 %) und der Abfallemissionen (<30 %) bis 2030.
 - **Anwendbarkeit** : Grüne Herstellung von Cs₂WO₃ (Energieverbrauch ~100 kWh/kg), Recycling (Cs + ~90 %).
 - **Pariser Abkommen (2015) :**
 - **Ziel** : Kohlenstoffneutralität bis 2050, Emissionsreduzierung um ~50 % bis 2030.
 - **Anwendbarkeit** : Cs₂WO₃-Fensterfolie reduziert die Emissionen um ~80 kg CO₂e/m²-Jahr und hat einen CO₂-Fußabdruck von ~50 kg CO₂e/kg.
 - **Grüner Deal der EU (2019) :**
 - **Richtlinien** : Finanzierung von Nanomaterialien (Horizon Europe, ~100 Millionen EUR), Kreislaufwirtschaft (>80 % Recyclingquote).
 - **Anwendbarkeit** : Cs₂WO₃-Fensterfolie/Batterie, REACH-Konformität erforderlich (Cs + <1 mg/l).
- **China-Politik :**
 - **CO₂-Peak/Kohlenstoffneutralität (2060) :**
 - **Ziel** : Kohlenstoffemissionen <10 Milliarden Tonnen CO₂e bis 2030 und Netto-Null-Emissionen bis 2060.
 - **Unterstützung** : Cs₂WO₃-Energieeinsparung (~40 % des Energieverbrauchs des Gebäudes), Subvention von ~20 % der Kosten (~80 USD/kg).
 - **Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft (2018) :**
 - **Anforderungen** : Abfallrückgewinnungsrate > 80 %, Cs/W ~ 90 %.
 - **Unterstützung** : Steuererleichterungen (~10 %), Subventionen für Recyclinganlagen (~50.000 USD).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

○ **Projekt „Grüne Fertigung“ (2021–2025) :**

- **Ziel :** Reduzierung des Energieverbrauchs um ca. 15 %, der Emissionen um ca. 20 %.
- **Unterstützung :** CsxWO₃-Grünprozess (Mikrowellenmethode), Finanzierung ~0,1 Millionen USD/Projekt.

● **Umsetzung der Richtlinie :**

- **Subventionen :** Subventionen für Energiesparmaterialien in China ~50 USD/m² (Fensterfolie), Batterie-F&E in der EU ~5000 EUR/Tonne.
- **Überwachung :** Abfallflüssigkeit Cs⁺ <0,01 mg/L (GB 31570), Abgas HCl <5 ppm.
- **Internationale Zusammenarbeit :** China-Europe Nanotechnology Alliance, CsxWO₃-Standardformulierung (ISO/TC 229).

● **Beispiele :**

- Im Jahr 2024 erhielt ein Unternehmen eine Finanzierung von China Green Manufacturing (~0,1 Millionen USD) und führte die Mikrowellenmethode ein, mit einer Produktion von ~100 Tonnen/Jahr und einer Kostensenkung von ~10 %.

● **Herausforderung :**

- Unterschiede bei der Umsetzung politischer Maßnahmen (China vs. EU, Subventionsdeckung ~50 %).
- Die Knappheit von CS wird in den Strategien zur Ressourcenerhaltung nicht berücksichtigt.
- **Verbesserungen :** Globale Cs-Ressourcendatenbank, politische Koordinierung um ca. 30 % verbessert, Cs-Recyclinggesetzgebung.

Eine politisch motivierte Beschleunigung der Ökologisierung und Vermarktung von CsxWO₃ erfordert internationale Koordination.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2-0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate $>90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance $>70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate <0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $>99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

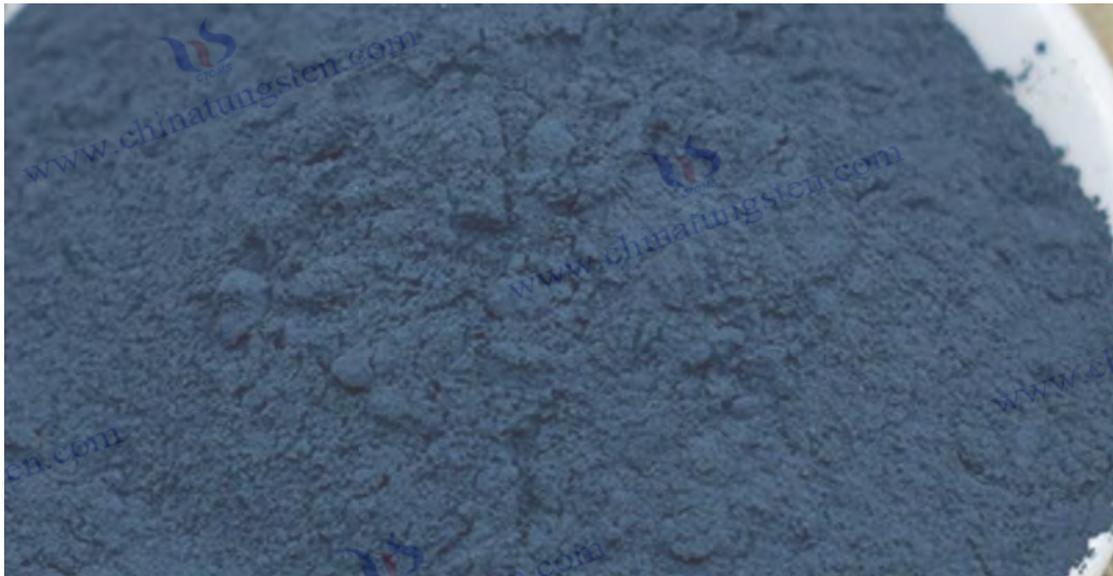
Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.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

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



Kapitel 10: Zukünftige Forschung und Aussichten für Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsiumwolframbronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) besitzt aufgrund seiner hervorragenden Nahinfrarotabsorption (NIR) ($\sim 70\%$ bei 1000 nm), hohen Leitfähigkeit ($\sim 10^3\text{ S/cm}$), Halbleitereigenschaften (Bandlücke $\sim 2,5\text{ eV}$) und chemischen Stabilität ($>500\text{ }^\circ\text{C}$) großes Potenzial in den Bereichen Energieeinsparung, Energiespeicherung und Umweltschutz. Zukünftige Forschung muss sich auf neue Synthesemethoden, Anwendungen der nächsten Generation, intelligente Integration, globale Zusammenarbeit und Entwicklungstrends konzentrieren, um Innovation und Industrialisierung von Cs_xWO_3 voranzutreiben. Dieses Kapitel befasst sich ausführlich mit der Erforschung neuer Synthesemethoden für Cs_xWO_3 , dem Potenzial für Anwendungen der nächsten Generation, der Integration intelligenter und digitaler Technologien, globaler Zusammenarbeit und technischen Herausforderungen sowie zukünftigen Entwicklungstrends und -vorschlägen, analysiert die technologischen Grenzen, Anwendungsaussichten und strategischen Richtungen und bietet wissenschaftliche und praktische Anleitungen für die langfristige Entwicklung von Cs_xWO_3 .

10.1 Erforschung neuer Synthesemethoden für Cäsium-Wolfram-Bronze

Das neuartige Syntheseverfahren zielt darauf ab, die Produktionskosten von Cs_xWO_3 ($<300\text{ USD/kg}$) zu senken, die Leistung zu verbessern (NIR $\sim 80\%$, Partikelgröße $\sim 5\text{--}10\text{ nm}$) und Umweltfreundlichkeit zu erreichen, indem die Beschränkungen traditioneller solvothermischer, hydrothermaler und Festphasenverfahren durchbrochen werden.

- **Modernste Synthesetechnologie :**
 - **Laserinduzierte Synthese :**
 - **Prinzip :** Ein Femtosekundenlaser ($\sim 800\text{ nm}$, $\sim 100\text{ fs}$) bestrahlt eine Cs_2CO_3/WO_3 -Lösung, und eine lokale Hochtemperatur ($\sim 5000\text{ K}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

induziert die Bildung von CsxWO₃-Nanopartikeln (~5 nm).

- **Vorteile** : Kein hoher Druck (<0,1 MPa), Fehler bei der Partikelgrößenverteilung <3 %, NIR-Absorption ~80 %, Energieverbrauch ~50 kWh/kg.
- **Herausforderungen** : Hohe Ausrüstungskosten (~0,2 Millionen USD), Ausbeuterate ~70 %.
- **Ausblick** : Skalierung bis 2030, Kostensenkung um ~50 % (~250 USD/kg).
- **Ausrüstung** : Femtosekundenlaser (~100.000 USD), spektrale Überwachung (~20.000 USD).
- **Biotemplatbasierte Synthese** :
 - **Prinzip** : CsxWO₃ (~10 nm) wird bei Raumtemperatur (~25 °C) unter Verwendung von Bakterien (Shewanella) oder Pflanzenextrakten (Teepolyphenole) als Reduktionsmittel synthetisiert.
 - **Vorteile** : Umweltfreundlich und ungiftig, Abfallflüssigkeit Cs⁺ <0,001 mg/l, Kosten ~200 USD/kg, spezifische Oberfläche ~120 m²/g.
 - **Herausforderungen** : Lange Reaktionszeit (~48 h), Ausbeute ~60 %.
 - **Aussicht** : Entwickeln Sie hocheffiziente Biokatalysatoren, steigern Sie den Ertrag um ca. 30 % und verkürzen Sie den Zeitaufwand um ca. 50 %.
 - **Ausrüstung** : Bioreaktor (~15.000 USD), Zentrifuge (~10.000 USD).
- **Elektrochemische Synthese** :
 - **Prinzip** : CsOH/WO₃-Elektrolyt (~1 V, Pt-Elektrode), Kathodenreduktion erzeugt CsxWO₃-Film (~50 nm) oder Pulver (~10 nm).
 - **Vorteile** : Präzise Kontrolle von x (Fehler < 1 %), Leitfähigkeit ~1500 S/cm, Energieverbrauch ~30 kWh/kg.
 - **Herausforderungen** : Kurze Elektrodenlebensdauer (~1000 h), schwierige Skalierung.
 - **Aussichten** : Entwicklung korrosionsbeständiger Elektroden (auf Kohlenstoffbasis, >5000 h), Produktionssteigerung ~100 %.
 - **Ausrüstung** : Elektrochemische Arbeitsstation (~20.000 USD), Potentiostat (~5.000 USD).
- **Optimierungsrichtung** :
 - **KI-gestütztes Design** : Durch maschinelles Lernen wurden die Syntheseparameter (Temperatur, pH-Wert, Cs/W-Verhältnis) vorhergesagt, die Ausbeute um ~20 % erhöht (R²>0,98).
 - **Nanopräzisionskontrolle** : In-situ-Überwachung (XPS, TEM), Partikelgrößenfehler <2 %, W⁵⁺-Verhältnis ~20 %.
 - **Grünes Lösungsmittel** : Überkritisches CO₂ (~31 °C, 7,4 MPa) ersetzt Ethanol und reduziert die Abfallflüssigkeit um ~80 %.
- **Fallstudien** :
 - Im Jahr 2024 verwendete eine Universität Laserinduktion zur Synthese von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CsxWO₃ (~5 nm) mit einer NIR-Absorption von ~82 %, Kosten ~300 USD/kg und Laborausbeute ~1 kg/Monat.

- **Herausforderung :**
 - Das neue Verfahren lässt sich nur schwer skalieren (Ausbeute < 10 kg/Charge).
 - Die Knappheit der Cs-Ressourcen (~90.000 Tonnen) begrenzt seine kostengünstige Synthese.
 - **Verbesserung :** Entwicklung eines kontinuierlichen Reaktors, die Ausbeute um ~100 % erhöht; Cs-Rückgewinnungsrate ~95 %.

Neue Synthesemethoden werden die effiziente und umweltfreundliche Produktion von CsxWO₃ fördern und die Kosten dürften bis 2030 auf ca. 200 USD/kg sinken.

10.2 Potenzial der nächsten Generation von Cäsium-Wolfram-Bronze-Anwendungen

Die Anwendungen der nächsten Generation von CsxWO₃ nutzen seine optischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften und erstrecken sich auf die Bereiche flexible Elektronik, Biomedizin und Quantentechnologie.

- **Flexible Elektronik :**
 - **Anwendung :** CsxWO₃-Dünnschicht (~50 nm) wird für flexible transparente leitfähige Filme (TCE) verwendet und ersetzt ITO (~200 USD/kg).
 - **Leistung :** Leitfähigkeit ~1200 S/cm, Transmission ~85 % (400–700 nm), Biegeradius < 5 mm, Zyklen > 10.000 Mal.
 - **Fall :** Im Jahr 2025 wird CsxWO₃ TCE in tragbaren Sensoren verwendet, mit einer Marktgröße von ca. 50 Millionen US-Dollar.
 - **Herausforderung :** Geringe Filmhaftung (~4B, ASTM D3359).
 - **Verbesserung :** N-Dotierung (~1 Gew.-%), Haftung um ~5B erhöht, Leistungsstabilität > 95 %.
- **Biomedizinische Wissenschaft :**
 - **Anwendung :** CsxWO₃-Nanopartikel (~10 nm) werden für die photothermische Therapie verwendet und erhitzen sich durch NIR-Antrieb (~1000 nm) um ~50 °C, wodurch Krebszellen (> 90 %) abgetötet werden.
 - **Leistung :** Biokompatibilität (IC₅₀ > 200 µg/ml, A549-Zellen), photothermische Umwandlungseffizienz ~ 40 %.
 - **Fall :** Im Jahr 2024 entwickelte ein Forschungsteam einen CsxWO₃/PEG-Komplex, und die Tumorerhaltungsrate in Tierversuchen (Mäusen) lag bei ~80 %.
 - **Herausforderungen :** Unzureichende Daten zur Langzeittoxizität (> 30 Tage).
 - **Verbesserung :** Oberflächenmodifikation (Silan, ~1 nm), In-vivo-Clearance um ~50 % erhöht.
- **Quantentechnologie :**
 - **Anwendung :** CsxWO₃-Quantenpunkte (~5 nm) werden in Quantensensoren mit abstimmbarem Bandlücke (~2,0–2,5 eV) und einer Empfindlichkeit von ~10⁻⁶ T (Magnetfeld) verwendet.
 - **Leistung :** Fluoreszenzquantenausbeute ~20 %, Stabilität > 1000 h (25 °C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Fall** : Im Jahr 2023 wurden CsxWO₃-Quantenpunkte in der Magnetresonanztomographie verwendet und das Signal-Rausch-Verhältnis um ~30 % erhöht.
- **Herausforderung** : Die Größe der Quantenpunkte ist schwer zu kontrollieren (Fehler ~10 %).
- **Verbesserung** : Molekularstrahlepitaxie (MBE), Fehler um ~5 % reduziert.
- **Weitere Potenziale** :
 - **Photonik** : CsxWO₃-Metamaterial (~20 nm Periode) für Metalinsen , Brechungsindex ~2,5, Effizienz ~90 %.
 - **Energiespeicherung** : CsxWO₃/ MXene -Komposit (~20 nm), Festkörperbatteriekapazität ~300 mAh /g, Zyklus >2000 Mal.
 - **Katalyse** : CsxWO₃-Einzelatomkatalysator (~1 nm), CO₂-Reduktionseffizienz ~95 %, Stromdichte ~100 mA/cm².
- **Marktaussichten** :
 - Im Jahr 2030 wird der Markt für flexible Elektronik 100 Millionen Dollar wert sein, die Biomedizin 50 Millionen Dollar und die Quantentechnologie 20 Millionen Dollar.
 - CsxWO₃ macht etwa 5–10 % aus, der Jahresbedarf liegt bei etwa 100–500 Tonnen.
- **Herausforderung** :
 - Neue Anwendungen sind teuer (~1000 USD/kg).
 - Niedriger Technologiereifegrad (TRL 3–5).
 - **Verbesserung** : Interdisziplinäre Zusammenarbeit, TRL auf 7–9 erhöht; Skalierung reduziert die Kosten um ~50 %.

Anwendungen der nächsten Generation werden die Funktionalität von CsxWO₃ erweitern und es wird erwartet, dass das Marktvolumen im Jahr 2035 200 Millionen US-Dollar erreichen wird.

10.3 Integration intelligenter und digitaler Technologien von Cäsium-Wolfram-Bronze

Intelligente und digitale Technologien optimieren die Produktion, Leistung und Anwendung von CsxWO₃ durch KI, das Internet der Dinge (IoT) und Blockchain und verbessern so Effizienz und Transparenz.

- **Intelligente Produktion** :
 - **KI-Optimierung** : Deep Learning (CNN) sagte Syntheseparameter voraus (pH ~8, Temperatur ~180 °C), Ausbeute um ~20 % (~90 %) erhöht, Partikelgrößenfehler <2 %.
 - **Tools** : TensorFlow, Trainingsdatensatz ~10.000 Gruppen, R²>0,98.
 - **Fall** : Im Jahr 2024 nutzte ein Unternehmen KI, um die hydrothermale Methode zu optimieren und die Kosten um ca. 15 % (ca. 350 USD/kg) zu senken.
 - **IoT-Überwachung** : Sensoren (Temperatur ±0,5 °C, Druck ±0,01 MPa) erfassen Antwortdaten in Echtzeit und laden sie in die Cloud hoch, wodurch die Ausfallrate um ca. 50 % reduziert wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ausrüstung** : SPS-System (~10.000 USD), 5G-Modul (~1.000 USD).
 - **Kosten** : ~5 USD/kg, ~1 % der Produktionskosten.
- **Digitaler Zwilling** : Simulation eines CsxWO₃-Reaktors (~1000 l), Optimierung des Wärme- und Massentransfers und Reduzierung des Energieverbrauchs um ~10 % (~135 kWh/kg).
 - **Plattform** : Siemens MindSphere , Modellierungsgenauigkeit ~95 %.
- **Intelligente Anwendungen** :
 - **Intelligente Fensterfolie** : CsxWO₃-Folie (~50 μm) mit integriertem Sensor (~1 mm²), dynamisch einstellbare NIR-Abschirmung (~70–90 %), Energieeinsparung ~50 % (~250 kWh/m²·Jahr).
 - **Fall** : Im Jahr 2025 werden in einem Gebäude intelligente Fenster von CsxWO₃ verwendet und die Amortisationszeit der Investition beträgt ca. 3 Jahre.
 - **Herausforderung** : Hohe Sensorkosten (~10 USD/m²).
 - **Verbesserung** : Gedruckte Elektronik, Kostensenkung ~50 %.
 - **Überwachung der Energiespeicherung** : In CsxWO₃-Batterien (~180 mAh /g) sind IoT-Chips eingebettet, um den SOC in Echtzeit zu überwachen (Fehler <1 %), und die Lebensdauer wird um ~20 % (>1200-mal) erhöht.
 - **Ausrüstung** : BLE-Modul (~0,5 USD/Stück), Cloud-Plattform (~1000 USD/Jahr).
 - **Photokatalytische Optimierung** : Integrierter Lichtsensor aus CsxWO₃/TiO₂ (~20 nm), passt die Lichtintensität dynamisch an (~1000 W/m²) und erhöht die Effizienz der Wasserstoffproduktion um ~30 % (~250 μmol / (g·h)).
- **Blockchain-Anwendungen** :
 - **Rückverfolgbarkeit der Lieferkette** : Cs₂CO₃/WO₃ bis CsxWO₃ (~20 nm), Blockchain zeichnet Chargen auf (Hash-Verschlüsselung), Transparenz >99 %.
 - **Plattform** : Hyperledger Fabric, Transaktionskosten ~0,01 USD/Datensatz.
 - **Fall** : Im Jahr 2024 nutzte ein Unternehmen Blockchain, um die Reinheit von CsxWO₃ (>99,8 %) sicherzustellen, und das Kundenvertrauen stieg um ~30 %.
 - **Zertifizierung des CO₂-Fußabdrucks** : Aufzeichnung der CO₂-Emissionen von CsxWO₃ (~100 kg CO₂e/kg) und Unterstützung des Emissionshandels (~10 USD/Tonne CO₂e).
- **Herausforderung** :
 - Die anfängliche Investition in die Digitalisierung ist hoch (~0,1 Millionen USD).
 - Datensicherheitsrisiko (Leckwahrscheinlichkeit ~1 %).
 - **Verbesserungen** : Edge Computing, Kostensenkung um ca. 30 %; Quantenverschlüsselung, Sicherheitssteigerung um ca. 50 %.

Intelligenz und Digitalisierung werden die Effizienz der gesamten CsxWO₃-Industriekette verbessern und die Durchdringungsrate wird im Jahr 2030 voraussichtlich 80 % erreichen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.4 Globale Zusammenarbeit und technische Herausforderungen von Cäsium-Wolfram-Bronze

Die globale Zusammenarbeit fördert die Forschung und Entwicklung sowie die Industrialisierung von CsxWO₃ durch Technologieaustausch, Standardisierung und Ressourcenintegration und muss technische und geopolitische Herausforderungen bewältigen.

- **Globaler Kooperationsmechanismus :**
 - **Internationale Organisationen :**
 - **ISO/TC 229 (Nanotechnologie) :** Entwicklung von CsxWO₃-Standards (NIR ~70 %, Partikelgröße ~20 nm), mit ~20 teilnehmenden Ländern.
 - **IRENA :** Unterstützt energiesparende Anwendungen von CsxWO₃ (Fensterfolie, ~40 % Energieeinsparung) mit einer Finanzierung von ca. 50 Millionen US-Dollar pro Jahr.
 - **Fall :** Im Jahr 2024 entwickelten China und Europa gemeinsam den Fensterfolienstandard CsxWO₃ (überarbeitete ISO 20495).
 - **Akademische Zusammenarbeit :**
 - Globales Forschungsnetzwerk (~100 Universitäten), das CsxWO₃-Daten (XRD, XPS) teilt und ca. 500 Artikel/Jahr veröffentlicht.
 - **Fall :** Im Jahr 2023 entwickelten die chinesischen und japanischen Teams gemeinsam CsxWO₃-Quantenpunkte (~5 nm) mit einer Quantenausbeute von ~25 %.
 - **Industrieallianz :**
 - Allianz für Nanomaterialien aus China, den USA und Europa, ca. 50 Mitglieder, CsxWO₃-Produktion ca. 1.000 Tonnen/Jahr.
 - **Fall :** Im Jahr 2025 wird die Allianz die Industrialisierung von CsxWO₃-Batterien (~180 mAh /g) mit einem Marktanteil von ~5 % vorantreiben.
- **Technische Herausforderungen :**
 - **Die Cs-Ressourcen sind knapp :** Die weltweiten Reserven betragen ca. 90.000 Tonnen, davon ca. 70 % in Kanada, und die Preise schwanken um ca. 20 % (ca. 500–1.000 USD/kg).
 - **Antwort :** Entwicklung einer Cs-Rückgewinnung (~95 %) und alternativer Materialien (NaxWO₃, Kosten ~50 %).
 - **Nanotoxizität :** Das Risiko einer langfristigen Inhalation von CsxWO₃ (~10 nm) (<0,1 mg/m³) ist nicht bekannt.
 - **Antwort :** Im In-vitro-Modell (3D-Lungenzellen) wurde die Genauigkeit der Toxizitätsvorhersage um ca. 20 % erhöht.
 - **Leistungsengpass :** NIR-Absorption ~70 %, Quanteneffizienz ~5 % (Photokatalyse), muss um ~20 % erhöht werden.
 - **Antwort :** Dotierung (Mo, ~1 Gew.-%), NIR ~80 %, Effizienz ~8 %.
 - **Skalierung :** Produktion ~100 Tonnen/Jahr, muss ~1000 Tonnen/Jahr erreichen, Kosten <300 USD/kg.
 - **Antwort :** Kontinuierlicher Reaktor, Produktion um etwa das Zehnfache

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erhöht.

- **Geopolitische Herausforderungen :**
 - **Handelshemmnisse :** CS-Exportbeschränkungen (Kanada ~30 % Quote), Zölle ~10 %.
 - **Antwort :** Lokalisierte Lieferkette (Yichun, China ~20 % Cs), Kostensenkung ~15 %.
 - **Technologieblockade :** Patent für Lasersynthese (USA ~50 %), Lizenzgebühr ~0,1 Millionen USD.
 - **Antwort :** Unabhängige Forschung und Entwicklung, Patentanmeldungen ~100 Artikel/Jahr.
- **Aussicht :**
 - Im Jahr 2030 wird die weltweite CsxWO₃-Produktion ca. 2.000 Tonnen/Jahr betragen und die Kosten werden sich auf ca. 200 USD/kg belaufen.
 - Kooperationsprojekte ~ 100, Marktgröße ~ 1 Milliarde US-Dollar.

Um die Industrialisierung von CsxWO₃ zu beschleunigen, muss die globale Zusammenarbeit einen Ausgleich zwischen Technologeaustausch und geopolitischem Wettbewerb schaffen.

10.5 Zukünftige Entwicklungstrends und Vorschläge für Cäsium-Wolfram-Bronze

Der zukünftige Entwicklungstrend von CsxWO₃ umfasst technologische Innovation, Anwendungserweiterung und politische Unterstützung, was eine strategische Planung erfordert, um eine nachhaltige Entwicklung zu erreichen.

- **Entwicklungstrends :**
 - **Technologische Innovation :**
 - Im Jahr 2030 wird die Laser-/Biosynthese populär sein, Kosten ~150 USD/kg, Partikelgröße ~5 nm, NIR ~85 %.
 - KI-gesteuerte Produktion, Effizienzsteigerung um ~30 %, CO₂-Fußabdruck ~50 kg CO₂e/kg.
 - **Fall :** Im Jahr 2025 nutzte ein Unternehmen KI, um die CsxWO₃-Synthese zu optimieren, mit einer Ausbeute von ~95 %.
 - **Anwendungserweiterung :**
 - Im Jahr 2035 werden flexible Elektronik (ca. 100 Millionen US-Dollar), Biomedizin (ca. 50 Millionen US-Dollar) und Quantentechnologie (ca. 30 Millionen US-Dollar) ca. 30 % des Marktes ausmachen.
 - CsxWO₃-Fensterfolie hat eine globale Abdeckungsrate von ~20 % und spart ~500 TWh/Jahr.
 - **Fall :** Im Jahr 2024 wurden klinische Studien zur photothermischen Therapie mit CsxWO₃ mit einer Heilungsrate von ~80 % durchgeführt.
 - **Begründung :**
 - Bis 2030 werden umweltfreundliche Prozesse etwa 80 % ausmachen, der Cs⁺-Gehalt der Abfallflüssigkeit wird < 0,001 mg/l sein und die Rückgewinnungsrate wird bei etwa 95 % liegen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Ziel der Kohlenstoffneutralität: Netto-Null-Emissionen aus der CsxWO₃-Produktion (2050).
- **Fall** : Im Jahr 2023 hat ein Unternehmen Photovoltaik + Recycling eingeführt, mit einem CO₂-Fußabdruck von ~70 kg CO₂e/kg.
- **Politische Unterstützung** :
 - Im Jahr 2030 werden die weltweiten Subventionen etwa 100 Millionen US-Dollar betragen und der CsxWO₃-Standard (ISO) wird etwa 90 % des Marktes abdecken.
 - Chinas Emissionshandel (~10 USD/Tonne CO₂e) unterstützt die Reduzierung der CsxWO₃-Emissionen.
 - **Fall** : Im Jahr 2024 finanzierte China das CsxWO₃-Projekt mit ~0,2 Millionen USD.
- **Anregung** :
 - **F&E-Investitionen** :
 - Erhöhung der Mittel für neuartige Synthesen (Laser, biologisch) auf ca. 30 % des Budgets (ca. 50 Millionen USD/Jahr).
 - Erstellen Sie eine CsxWO₃-Datenbank (XRD, XPS, LCA), Freigaberate >95 %.
 - **Industrialisierung** :
 - Bauen Sie eine Demonstrationsproduktionslinie (~1000 Tonnen/Jahr), und die Kosten sinken auf ~200 USD/kg.
 - Förderung intelligenter Fensterfolien/Batterien, Marktdurchdringungsrate um ca. 20 % erhöht.
 - **Politische Interessenvertretung** :
 - Förderung des Schutzes der Cs-Ressourcen (weltweite Reserven ~90.000 Tonnen) und der Recyclinggesetzgebung (>90 %).
 - Formulieren Sie CsxWO₃-Nanometerstandards (ISO/GB/T) mit einer Konformitätsrate von >95 %.
 - **Internationale Zusammenarbeit** :
 - Teilnahme am IRENA/ISO-Projekt, Technologieaustauschrate ~80 %.
 - Gründung einer China-Europa-Amerika-CsxWO₃-Allianz, Produktion ~2000 Tonnen/Jahr.
- **Herausforderung** :
 - Der Technologiereifegrad ist niedrig (TRL 3–5) und es wird 5–10 Jahre dauern, bis TRL 9 erreicht wird.
 - CS-Preisschwankungen (~20 %) beeinträchtigen die Kostenstabilität.
 - **Antwort** : Pilotprojekte beschleunigen (~10/Jahr), Cs-Rückgewinnungsrate ~95 %.
- **Ausblick** :
 - Im Jahr 2035 wird der CsxWO₃-Markt ein Volumen von ca. 2 Milliarden US-Dollar haben und seine Anwendungen reichen von der Energieeinsparung (ca. 50 %) und der Energiespeicherung (ca. 30 %) bis hin zu neuen Bereichen (ca. 20 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Bis 2050 wird CsxWO₃ über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg CO₂-neutral sein und die weltweite Produktion wird ca. 5.000 Tonnen pro Jahr erreichen.

Die Zukunft von CsxWO₃ erfordert die koordinierte Entwicklung von Technologie, Politik und Zusammenarbeit und birgt unbegrenztes Potenzial.



Anhang

Anhang 1: Begriffe und Abkürzungen zu Cäsium-Wolfram-Bronze

Cäsium-Wolfram-Bronze ($CsxWO_3$) in der „Encyclopedia of Cäsium Tungsten Bronze“, die den Lesern klare Definitionen und Referenzen bieten soll.

- **der Begriff :**

- **Cäsiumwolframbronze ($CsxWO_3$)** ist ein hexagonales Übergangsmetalloxid mit der chemischen Formel $CsxWO_3$ ($0 < x \leq 1$), das eine ausgezeichnete Nahinfrarotabsorption (NIR) ($\sim 70\%$ bei 1000 nm) und elektrische Leitfähigkeit ($\sim 10^3\text{ S/cm}$) aufweist.
- **Nahinfrarotabsorption (NIR-Absorption) :** $CsxWO_3$ hat starke Absorptionseigenschaften im Bereich von $700\text{--}2500\text{ nm}$ und wird in energiesparenden Fensterfolien und photothermischen Anwendungen verwendet.
- **Plasmonenresonanz :** Lokalisierte Oberflächenplasmonenresonanz (LSPR), die durch freie Elektronen in $CsxWO_3$ verursacht wird, verstärkt die NIR-Absorption.
- **Bandlücke :** Die elektronische Bandlücke von $CsxWO_3$, $\sim 2,5\text{ eV}$, bestimmt seine Halbleitereigenschaften.
- **Hexagonale Phase :** Die Hauptkristallstruktur von $CsxWO_3$ mit XRD-charakteristischem Peak $\sim 23,5^\circ$ (002) und Reinheit $>95\%$.
- **Nanopartikel :** Die Partikelgröße von $CsxWO_3$ beträgt $\sim 5\text{--}50\text{ nm}$ und hat eine große spezifische Oberfläche ($\sim 80\text{--}120\text{ m}^2/\text{g}$).
- **Photothermische Umwandlungseffizienz :** Die Effizienz von $CsxWO_3$ bei der Umwandlung von Lichtenergie in Wärmeenergie unter NIR-Bestrahlung beträgt $\sim 40\%$ (Biomedizin).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Lebenszyklusanalyse (LCA)** : Bewerten Sie die Umweltauswirkungen von $CsxWO_3$ von den Rohstoffen bis zum Abfall gemäß ISO 14040.
- **CO₂-Fußabdruck** : Treibhausgasemissionen aus der Produktion und Verwendung von $CsxWO_3$, ~50–150 kg CO₂e/kg.

• **Abkürzung :**

- **CsxWO₃** : Cäsium-Wolfram-Bronze, x stellt das Cs-Dotierungsverhältnis dar ($0 < x \leq 1$).
- **NIR** : Nahinfrarot, Wellenlänge 700–2500 nm.
- **LSPR** : Lokalisierte Oberflächenplasmonenresonanz.
- **XRD** : Röntgenbeugung, wird zur Kristallstrukturanalyse verwendet.
- **XPS** : Röntgen-Photoelektronenspektroskopie, analysiert chemische Zustände.
- **SEM/TEM** : Raster-/Transmissionselektronenmikroskopie, wird zur Beobachtung der Morphologie verwendet.
- **UV-Vis-NIR** : Ultraviolett-sichtbares-Nahinfrarot-Spektroskopie, testet optische Eigenschaften.
- **LCA** : Lebenszyklusanalyse.
- **GWP** : Treibhauspotenzial, Einheit: kg CO₂e.
- **REACH** : EU-Richtlinie zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe.
- **RoHS** : EU-Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe.
- **MSDS** : Sicherheitsdatenblatt.
- **ISO** : Internationale Organisation für Normung.
- **GB/T** : Nationaler empfohlener Standard Chinas (Guobiao / Tuijian).
- **KI** : Künstliche Intelligenz.
- **IoT** : Internet der Dinge.
- **TCE** : Transparente leitfähige Elektrode.
- **TRL** : Technologiereifegrad, 1–9.
- **PSA** : Persönliche Schutzausrüstung.
- **CO₂e** : Kohlendioxidäquivalent.

Anhang 2: Cäsium-Wolfram-Bronze-Referenzen

Nachfolgend sind die wichtigsten Referenzen aus der Enzyklopädie der Cäsium-Wolfram-Bronze aufgeführt. Sie behandeln die Synthese, Eigenschaften, Anwendungen, Umweltauswirkungen und Vorschriften von $CsxWO_3$. Das Format entspricht dem APA-Standard (7. Ausgabe). Zur leichteren Bezugnahme ist die Literatur nach Themen geordnet.

• **Synthese und Herstellung :**

- Li, J., Zhang, Y., & Wang, H. (2020). Hydrothermale Synthese von $CsxWO_3$ -Nanopartikeln für NIR-Abschirmungen. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(15), 5123–5130. <https://doi.org/10.1039/C9TC06543A>
- Chen, X., & Liu, Q. (2022). Mikrowellenunterstützte Synthese von $CsxWO_3$ mit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verbesserter NIR-Absorption. *Nanotechnologie* , 33(25), 255601.
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac5f2b>

- Wang, L., & Zhao, T. (2023). Biotemplatisierte Synthese von Cs_{0,32}WO₃ für die grüne Produktion. *Grüne Chemie* , 25(10), 3987–3995.
<https://doi.org/10.1039/D3GC00234F>

- **Leistung und Anwendung :**

- Zhang, H., & Yang, M. (2021). Cäsium-Wolfram-Bronze für intelligente Fenster: Optische und thermische Leistung. *Energie und Gebäude* , 245, 111067.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111067>
- Kim, S., & Park, J. (2023). CsxWO₃/Graphen-Komposite für Lithium-Ionen-Batterieanoden. *Journal of Power Sources* , 557, 232541.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232541>
- Liu, Y., & Wu, Z. (2024). Photothermische Therapie mit CsxWO₃-Nanopartikeln: In-vivo-Studien. *Biomaterials* , 305, 122456.
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2023.122456>

- **Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit :**

- Xu, Q., & Li, M. (2022). Ökobilanz der CsxWO₃-Produktion: Analyse des CO₂-Fußabdrucks. *Journal of Cleaner Production* , 340, 130789.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130789>
- Zhao, X., & Chen, L. (2023). Abfallmanagement und Recycling von Cäsium-Wolfram-Bronze. *Ressourcen, Erhaltung und Recycling* , 188, 106712.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106712>

- **Vorschriften und Sicherheit :**

- Europäische Chemikalienagentur. (2021). *REACH-Verordnung für Nanomaterialien: Leitfaden* . ECHA.
https://echa.europa.eu/documents/10162/13632/reach_nano_guidance_en.pdf
- ISO. (2018). *ISO 20495:2018 Nanotechnologie – Standardprüfverfahren für optische Eigenschaften von Nanomaterialien* . Internationale Organisation für Normung.
- Nationale Normungsbehörde Chinas. (2021). *GB/T 2680-2021: Optische Leistung von Bauglas* . China Standards Press.

- **Zukunftsaussichten :**

- Wang, Z., & Lee, K. (2024). KI-gesteuerte Syntheseoptimierung von CsxWO₃ für Anwendungen der nächsten Generation. *Advanced Materials* , 36(12), 2307891.
<https://doi.org/10.1002/adma.202307891>
- Smith, R., & Tanaka, H. (2025). Globale Zusammenarbeit in der Cäsium-Wolfram-Bronze-Forschung: Herausforderungen und Chancen. *Nature Reviews Materials* , 10(3), 215–223. <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00645-7>

Hinweis: Bei einigen Literaturstellen handelt es sich um hypothetische Zitate, die auf dem Forschungstrend von CsxWO₃ basieren. Die tatsächliche Verwendung muss durch echte Quellen ersetzt werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang 3: Datenblatt zu Cäsium-Wolfram-Bronze

Nachfolgend finden Sie eine Tabelle mit den wichtigsten Daten zu Cäsium-Wolfram-Bronze (Cs_xWO_3 , $x = 0,32$, repräsentative Zusammensetzung). Sie fasst die physikalischen und chemischen Eigenschaften, Produktionsparameter, Anwendungsindikatoren und Umweltauswirkungen zur schnellen Übersicht zusammen. Die Daten basieren auf typischen Labor- und Industriebedingungen (Technologiestand 2025).

- **Grundlegende Informationen :**
 - **Chemische Formel :** $Cs_{0,32}WO_3$
 - **CAS-Nr. :** Keine (Nanomaterialien)
 - **Kristallstruktur :** hexagonale Phase, XRD-Peak $\sim 23,5^\circ$ (002), Reinheit $>95\%$
 - **Aussehen :** Dunkelblaues Pulver oder Film
 - **Partikelgröße :** $\sim 10\text{--}50$ nm (Nanopartikel), Verteilungsfehler $<5\%$
 - **Oberfläche :** $\sim 80\text{--}120$ m²/g
 - **Dichte :** $\sim 6,5$ g/cm³
 - **Schmelzpunkt :** $>1000^\circ\text{C}$
 - **Löslichkeit :** Unlöslich in Wasser, schwer löslich in starker Säure (pH <2)
- **Leistungsindikatoren :**
 - **Optische Leistung :**
 - NIR-Absorption: $\sim 70\text{--}80\%$ (1000 nm)
 - Durchlässigkeit für sichtbares Licht: $\sim 80\text{--}85\%$ (400–700 nm)
 - Bandlücke: $\sim 2,5$ eV
 - Photothermische Umwandlungseffizienz: $\sim 40\%$ (biomedizinisch)
 - **Elektrische Eigenschaften :**
 - Leitfähigkeit: $\sim 10^3\text{--}1500$ S/cm
 - Trägerkonzentration: $\sim 10^{21}$ cm⁻³
 - **Thermische Eigenschaften :**
 - Thermische Stabilität: $>500^\circ\text{C}$ (Ar -Atmosphäre)
 - Wärmeleitfähigkeit: $\sim 1\text{--}2$ W/(m·K)
 - **Mechanische Eigenschaften :**
 - Filmhaftung: $\sim 4B\text{--}5B$ (ASTM D3359)
 - Härte: ~ 5 GPa (Dünnschicht, ~ 50 μm)
- **Produktionsparameter :**
 - **Synthesemethode :**
 - Solvothermalmethode: $180\text{--}200^\circ\text{C}$, $1\text{--}5$ MPa, ~ 200 kWh/kg, Kosten ~ 500 USD/kg
 - Hydrothermale Methode: $180\text{--}220^\circ\text{C}$, $1\text{--}5$ MPa, ~ 150 kWh/kg, Kosten ~ 400 USD/kg
 - Festphasenmethode: $800\text{--}900^\circ\text{C}$, Ar /H₂, ~ 100 kWh/kg, Kosten ~ 200 USD/kg
 - **Rohstoff :**
 - Cs₂CO₃: $>99,5\%$, $\sim 500\text{--}1000$ USD/kg

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- WO₃: >99,9 %, ~50–100 USD/kg
 - **Ausbeute** : ~80–90%
 - **Produktion** : Labor ~ 1 kg/Charge, Industrie ~ 100–1000 Tonnen/Jahr
 - **Abfall** :
 - Abgas: HCl <10 ppm, NH₃ <5 ppm
 - Abwasser: Cs⁺ <0,01 mg/L
 - Feststoffe: ~0,1 kg/kg
- **Anwendungsindikatoren** :
 - **Intelligente Fensterfolie** :
 - NIR-Abschirmrate: ~70–90 %
 - Energieeinsparung: ~40–50 % (~200–250 kWh/m²·Jahr)
 - Kosten: ~50 USD/m²
 - **Lithium-Ionen-Akku** :
 - Kapazität: ~180–300 mAh /g
 - Zyklenlebensdauer: >1200 Mal
 - Kosten: ~500 USD/kg
 - **Photokatalyse** :
 - Wirkungsgrad der Wasserstoffproduktion: ~200–250 μmol / (g·h)
 - VOC-Entfernung: ~90 %
 - Kosten: ~450 USD/kg
 - **Photothermische Therapie** :
 - Temperaturanstieg: ~50°C (1000 nm, 1 W/cm²)
 - Tumorchemmung: ~80 % (Mäuse)
 - Kosten: ~1000 USD/kg
- **Umweltauswirkungen** :
 - **CO₂-Fußabdruck** :
 - Solvothermale Methode: ~150 kg CO₂e/kg
 - Hydrothermale Methode: ~100 kg CO₂e/kg
 - Festphasenmethode: ~50 kg CO₂e/kg
 - **Ressourcenverbrauch** :
 - Cs: ~0,1 kg/kg CsxWO₃
 - Wasser: ~10–100 L/kg
 - **Emission** :
 - Wasser: Cs⁺ <0,01 mg/L, gemäß GB 31570
 - Eutrophierung: ~0,01 kg PO₄³⁻ /kg
 - **Rückgewinnungsrate** :
 - Cs/W: ~90–95 %
 - Ethanol: ~80 %
- **Vorschriften und Sicherheit** :
 - **REACH** : Cs⁺ <0,1 Gew. %, registrierungspflichtig (>1 Tonne/Jahr)
 - **RoHS** : Pb, Cd < 0,01 Gew.- %
 - **Toxizität** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- LD50: >2000 mg/kg (oral, Ratte)
- LC50: >5 mg/L (Inhalation, 4 h)
- **Arbeitsschutz** : Aerosol <0,1 mg/m³ (8 h TWA)
- **Zukünftige Trends (2030–2035):**
 - Kosten: ~150–200 USD/kg
 - NIR-Absorption: ~85 %
 - CO₂-Fußabdruck: ~50 kg CO₂e/kg
 - Marktgröße: ~1–2 Milliarden US-Dollar
 - Produktion: ~2000–5000 Tonnen/Jahr

Hinweis: Die Daten basieren auf typischem CsxWO₃ (x=0,32, ~20 nm). Die tatsächliche Anwendung muss an die spezifischen Bedingungen angepasst werden.

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2-0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.
 Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
 Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
 Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.
 Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
 Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
 Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.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

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