



Technische Spezifikation

Technische Spezifikation W100-Cu Verguss WPDiv-W7-X

Rahmenvertrag zur Herstellung von vergossenem W100 mit OFE-Cu in Kombination mit unterschiedlichen Wolfram-Kupfer Verbundwerkstoffen
Wolfram enthält eine, dem Wärmefluss entsprechende Kornausrichtung.


Approval Process			
	Name	Action	Affiliation
Author	Fellinger J.	04 May 2026:signed	E5 W7-X Maschine Divertor-Technolog...
Co-Authors			
Reviewers	Ehrke G.	04 May 2026:recommended (Fast Track)	E5 W7-X Maschine Divertor-Technolog...
Previous Versions	Fellinger J.	25 Feb 2026:recommended v2.0	E5 W7-X Maschine Divertor-Technolog...
Reviews	Vilbrandt R.	03 Mar 2026:recommended v2.0	QM Functional Safety Manager
	Grulke O.	03 Mar 2026:recommended v2.0	E5 W7-X Maschine
Approver	Kurz P.	04 May 2026:approved	E5 Management
RO: Joris Fellinger			
Read Access	AD: ICP-Admin, AD: IDM_user, LG: local accounts, approver, author, project administrator, reviewer, RO		



Change Log

Technische Spezifikation W100-Cu Verguss WPDiv-W7-X (2KYD6T)

<i>Version</i>	<i>Latest Status</i>	<i>Issue Date</i>	<i>Description of Change</i>
v1.0	Signed	08 Dec 2025	
v1.1	Signed	15 Dec 2025	minor Änderungen von Reinhard Vilbrandt und Anlage 1 eingefügt
v1.2	Approved	16 Dec 2025	Tabelle nach Kommentaren Joris Fellingner angepasst
v2.0	Approved	19 Feb 2026	Stückzahlen reduziert (V3.1 und V3.2 gelöscht) und zusätzlich W95NiFe-Cu als feste Position mit aufgenommen; daher Anpassung der "Phasen I-III"
v2.1	Approved	04 May 2026	Ergänzung der Tabelle in Kapitel 7 mit Rohstoffpreise

 EUROfusion	E5-DEV/DT	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik	
Gunnar Ehrke	Technische Spezifikation	KKS.-Nr.: 1-ACW	Dok.-Kennz.: 2KYD6T

Technische Spezifikation zum Hintergießen von OFE-Cu auf Wolframblechen für die W-basierte Divertorentwicklung

Inhalt

1. HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG	2
1.1. HINTERGRUND	2
1.2. ZIEL	2
2. BESCHREIBUNG DER AUFGABE	3
2.1. PHASE I	3
2.2. PHASE II	4
3. ANFORDERUNGEN AN DAS GRUNDMATERIAL.....	4
4. ANFORDERUNGEN AN DEN AN	5
4.1. ALLGEMEIN	5
4.2. KENNZEICHNUNG DER TEILE	5
4.3. DOKUMENTATION.....	5
4.4. QUALITÄTSSICHERUNG.....	5
4.5. VERSCHWIEGENHEITSKLAUSELN	5
5. BEIGEFÜGTE UNTERLAGEN.....	5
6. PROJEKTMANAGEMENT.....	5
7. TABELLE ALS GRUNDLAGE FÜR DAS LEISTUNGSVERZEICHNIS	6

W7-X	Technische Spezifikation Rahmenvertrag Hinterguss OFE-Cu auf Wolfram	1-ACW	2KYD6T
------	--	-------	------------------------

1. Hintergrund und Zielsetzung

1.1. Hintergrund

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (Auftraggeber: AG) entwickelt sogenannte Targetelemente, die hohen Wärmelasten von bis zu 10 MW/m², resultierend aus dem Plasmabetrieb des Kernfusionsexperiments Wendelstein 7-X, aufnehmen müssen. Diese wassergekühlten Targetelemente mit einer gesamten plasmaexponierten Fläche von etwa 30 m², die in einem Ultra-Hoch-Vakuum betrieben werden, bestehen hauptsächlich aus CuCrZr für die Wärmesenke, einer Zwischenschicht aus sauerstofffreiem Kupfer (OFE-Cu, Werkstoffnummer CW009A, C10100) und Wolfram (W₁₀₀) bzw. Wolframschwermetall (W₉₅NiFe) für die plasmaexponierte Oberfläche.

Die Wärmesenke wird bevorzugt additiv mittels Laser Powder Bed Fusion (LPBF) gefertigt. Die plasmaexponierte Oberfläche wird entweder mit W₁₀₀ bzw. W₉₅NiFe beschichtet oder mit einem Mosaik von sog. Sandwichkacheln aus W₁₀₀/W₉₅NiFe mit OFE-Cu mittels eines Diffusions-Lötverfahrens bestückt.

1.2. Ziel

In Rahmen der Qualifizierung dieser Fertigungstechnologien fallen regelmäßig Arbeiten an, um die Sandwichkacheln aus W₁₀₀ und OFE-Cu herzustellen und bei Partnern oder in eigenen Laboren des AG zu untersuchen. Im vorliegenden Fall soll die Verbindung zwischen dem Wolframmaterial (W₁₀₀ bzw. W₉₅NiFe) und dem OFE-Cu mittels Hintergießen von Kupfer auf das Wolfram Substrat erfolgen.

Die hier beschriebenen Kacheln werden nicht in den W7-X eingebaut.

Die benötigten Stückzahlen der W₁₀₀/W₉₅NiFe-OFE-Cu Kacheln, die für eine Kalkulation angenommen werden, sind in Abschnitt 2. Aufgeführt.

Darüber hinaus soll eine zusätzliche Anzahl an Blechen vom Grundwerkstoff W₁₀₀ vom AN hergestellt werden. Der AG verwendet diese Bleche für weitergehende Untersuchungen und Qualifizierungen von alternativen Fügetechnologien. Anzahl und Größe der Zusatzbleche aus reinem Wolfram sind ebenfalls in Abschnitt 2. Aufgeführt.

Als zusätzlicher Bestandteil des Vertrags sollen Kacheln, jeweils zusammengesetzt aus Blechen mit verschiedenen Anteilen an Wolfram (W₁₀₀) und Kupfer qualifiziert werden. Durch die aufeinandergesetzten und als Einheit mit Kupfer hintergossenen Bleche entsteht in der Kachel ein gradierter Übergang von reinem Kupfer zu reinem Wolfram. Die Duktilität dieser gradierten Sandwichkachel soll damit erhöht und das Risiko von Delaminierungen zwischen Wolfram und Kupfer verringert werden.

Im Vorfeld der Kachelfertigung sind in Phase I Vorversuche aus den verschiedenen Kombinationen von Wolframwerkstoffen und Kupfer durchzuführen. Die damit hergestellten Kacheln werden vom AG in Hoch-Wärmefluss-tests untersucht und daraus ein Favorit ermittelt. Dieser Favorit soll dann in Phase II mit entsprechend höherer Stückzahl realisiert werden. Da jetzt noch nicht bekannt ist, welche der zwei Varianten für Phase II favorisiert wird, muss der AN alle zwei Varianten für Phase II kalkulieren und als Option im Angebot angeben. Der AN hat daher die Kalkulation für die in Phase I aufgeführten Varianten und für die in Phase II genannten Stückzahlen anzubieten.

Abschnitt 2. Listet alle Varianten und Stückzahlen auf. Der AN bietet diese Arbeiten in einem Rahmenvertrag mit Pauschalpreisen und Richtwerten der Lieferzeiten an. Die tatsächlichen Arbeiten werden vom AG nach anfallenden Bedarf und der tatsächlichen Kachelgröße konkretisiert und auf Basis der Pauschalpreise und Richtwerte der Lieferzeiten beauftragt. Ausnahmen von den Pauschalpreisen und Lieferzeiten müssen vom AN begründet werden.

W7-X	Technische Spezifikation Rahmenvertrag Hinterguss OFE-Cu auf Wolfram	1-ACW	2KYD6T
------	--	-------	------------------------

2. Beschreibung der Aufgabe

Der Auftragnehmer (AN) kann grundsätzlich folgende Arbeiten zur Erreichung des Ziels ausführen:

- Herstellung oder Beschaffung der zu fügenden Grundwerkstoffe
- Zuschnitt und Vorbereitung der zu fügenden Grundwerkstoffe
- Hintergießen des Substrats mit OFE-Cu im Vakuum
- Wärmebehandlung
- Nachbereitung mit Grundzuschnitt und Reinigung
- Qualitätskontrolle je nach Notwendigkeit, bestehend aus
 - Ultraschallprüfung
 - CT oder Mikro-CT
 - Metallografie
 - Vermessung
- Endbearbeitung
- Reinigung (UHV-gerecht)
- Konstruktion und Fertigung von Hilfsvorrichtungen
- Dokumentation und Berichtswesen
- Weitere Nachbereitungsarbeiten wie Verpackung und Versand

Die Arbeiten beziehen sich auf u.g. Kachelausführungen, unterteilt in Phase I und Phase II. Die Abmessungen sind den Zeichnungen der Anlage 1 zu entnehmen. Die Anzahl der Kacheln ist in den Phasen I und II ausreichend für das Belegen von drei Kühlen mit einer circa Grundfläche von einem DIN-A4-Blatt. Für die Kalkulation wird eine Kachelgröße von 19x28 mm in den entsprechenden Dicken angenommen (Ausnahmen werden benannt). Die Kacheln untereinander werden mit einem Spalt von 0,4 mm zueinander auf der CuCrZr Wärmesenke positioniert. Das ergibt ohne Überstände ca. 105 Kacheln pro DIN-A4 Grundfläche.

Die Kachelgrundfläche kann aber auch in Absprache zwischen AN und AG von einer produktionstechnischen Mindestgröße (nicht kleiner als 12x20 mm) bis zu einer Maximalgröße von 32x32 mm gewählt werden. Die Stückzahlen ändern sich dann entsprechend. Alle im Text genannten Abmessungen sind gerundet und können je nach Fertigungsanforderungen angepasst werden.

Um die oben genannten Stückzahlen zu erreichen, hat der AN ebenfalls die ausreichende Menge an Grundwerkstoffen W_{100} und $W_{95}\text{NiFe}$ selbst herzustellen. Das OFE-Cu kann vom AN extern beschafft werden.

Es wird an dieser Stelle explizit auf die Ausführungen in Abschnitt 3. Zur Kornausrichtung beim W_{100} verwiesen.

2.1. Phase I

Der AN stellt alle u.g. Varianten her. Der Bedarf und die Spezifikation von Vorversuchen ist durch den AN zu bestimmen.

Der AG führt mit den Varianten V1.1, V1.2 und V1.3 Hoch-Wärmefluss-Tests durch. Die Variante V1.4 mit reinem Wolfram wird vom AG für weitere Fügeversuche verwendet:

V1.1: 16 Stück aus Kombination W_{100} / OFE-Cu Grundabmessung 19x28 mm

- W_{100} t = 4 mm
- OFE-Cu t = 1 mm

W7-X	Technische Spezifikation Rahmenvertrag Hinterguss OFE-Cu auf Wolfram	1-ACW	2KYD6T
------	--	-------	------------------------

- OFE-Cu auf W_{100} hintergossen

V1.2: 16 Stück aus Kombination W_{100} / W80%-OFE-Cu20% / W70%-OFE-Cu30% / OFE-Cu Grundabmessung 19x28 mm

- W_{100} t = 2 mm
- W80%-OFE-Cu20% t = 1 mm
- W70%-OFE-Cu30% t = 1 mm
- OFE-Cu t = 1 mm
- Prozentangabe in Gewichts-Prozent

Das Cu wird in den angegebenen Gewichts-Prozenten in eine poröse W-Struktur gegossen (infiltriert). Das Paket aus den drei Blechen mit W_{100} bzw. Wolfram Anteil wird übereinandergelegt und wiederum mit Cu hintergossen. Damit entsteht eine Kachel aus insgesamt vier unterschiedlichen Lagen. Die Kacheldicke beträgt wie bei V1.1 in Summe 5 mm. D.h. für die beiden infiltrierten W-Cu Bleche stehen 2x1 mm Materialstärke zur Verfügung. Fertigungsbedingte Abweichungen von den Materialstärken sind ggf. möglich und müssen im Angebot angegeben werden.

V1.3: 315 Stück Kacheln aus $W_{95}Ni_{3.5}Fe_{1.5}$ (Tiefsatzzahlen sind Gewichtsprozent) und OFE-Cu, Grundabmessung 19x28 mm

- $W_{95}Ni_{3.5}Fe_{1.5}$ t = 4 mm
- OFE-Cu t = 1 mm
- OFE-Cu auf $W_{95}Ni_{3.5}Fe_{1.5}$ hintergossen

V1.4: 80 Stück W_{100} Bleche mit 120x20 mm Grundfläche und 4 mm Wandstärke, wobei die Kornausrichtung nach Abschnitt 3. Hergestellt werden soll.

2.2. Phase II

Der AG testet die Varianten V1.1 und V1.2 aus Phase I und ermittelt einen Favoriten, der dann in Phase II in erhöhter Stückzahl hergestellt wird. D.h., die beiden hier aufgezählten Varianten sind als Option im Angebot aufzuführen.

V2.1: 315 Stück, ansonsten wie V1.1

V2.2: 315 Stück, ansonsten wie V1.2

3. Anforderungen an das Grundmaterial

Die zusätzliche Menge an reinen Wolframblechen, wie auch der Grundwerkstoff für die Kombination W_{100} / OFE-Cu muss eine definierte Kornausrichtung aufweisen. Die Körner weisen normalerweise in Rollrichtung des W_{100} Bleches eine größere Länge auf als in Querrichtung. Wenn Kacheln direkt aus so einem Blech geschnitten werden, würden die lang gezogenen Körner senkrecht zum Wärmefluss aus dem Plasma in die Kühltische stehen. Das kann zu einem erhöhten Risiko für Risse, die parallel zur Schnittstelle zwischen W_{100} und der Kupferschicht verlaufen, führen. Um die Risse zu vermeiden, sind die Körner des hier verwendeten W_{100} Bleches entlang des Wärmeflusses auszurichten. Dass kann z.B. durch Abtrennen der Kacheln als Scheiben von einem zuvor gerollten Blech oder Ronde erreicht werden.

W7-X	Technische Spezifikation Rahmenvertrag Hinterguss OFE-Cu auf Wolfram	1-ACW	2KYD6T
------	--	-------	------------------------

4. Anforderungen an den AN

4.1. Allgemein

Der Auftragnehmer (AN) verfügt über die Infrastruktur und Erfahrung um die in Kapitel 0 beschriebenen Arbeiten selbst auszuführen. Eine Vergabe an Unterauftragnehmer ist nicht gestattet und darf lediglich für die Beschaffung der OFE-Cu vorgenommen werden. Notwendige Ausnahmen davon sind dem AG im Vorfeld anzuzeigen.

4.2. Kennzeichnung der Teile

Die Teile (Sandwichkacheln, W_{100} Bleche) werden vom AN gekennzeichnet geliefert. Die Kennzeichnung muss UHV-tauglich sein, z.B. Lasermarkierung. Die Position der Kennzeichnung wird vom AG vorgegeben. Die Kennzeichnung muss vom AN in allen relevanten Dokumenten (Berichte, Lieferscheine, Vermessungen etc.) und Verpackungen mitgeführt werden.

4.3. Dokumentation

Der AN liefert die Teile mit Dokumentation. Die Dokumentation enthält die Ergebnisse der Qualitätssichernden Maßnahmen mit Verweis auf die Kennzeichnung der Teile. Für jeden der verwendeten Grundwerkstoffe ist ein Materialzeugnis mit mindestens der chemischen Zusammensetzung und möglichst physikalischer Eigenschaften zu liefern.

4.4. Qualitätssicherung

Der AN hat nachzuweisen, dass die Qualität der Verbindung und des Gefüges der Teile seinen eigenen Werksnormen entspricht. Der AN hat die Anzahl der zusätzlich benötigten Proben für die interne Qualitätskontrolle selbst zu bestimmen. Diese Anzahl ist dem AG vor jedem Auftragsabruf im Vorfeld mitzuteilen.

Der AN muss die qualitätssichernden Maßnahmen (Ultraschall, Metallografie, ggf. CT, Vermessung) mit eigenen Ressourcen durchführen und selbst bewerten können. Die Ergebnisse sind dem AG entsprechend aufzubereiten und vorzulegen. Über die jeweilige Art und Umfang der Maßnahmen stimmen sich AN und AG im Projektverlauf ab.

Der AG kann jederzeit eigene Untersuchungen an den vom AN gelieferten Kacheln bzw. Grundwerkstoffen durchführen. Die Ergebnisse werden immer mit dem AN geteilt.

4.5. Verschwiegenheitsklauseln

Die Ergebnisse können auch Bestandteil von Veröffentlichungen des AG und des AN sein. Eventuell notwendige Verschwiegenheitsklauseln sind daher bereits mit Abgabe des Angebots zwischen AG und AN zu vereinbaren. Unabhängig davon vereinbaren AN und AG mit Abgabe und Annahme des Angebots eine gegenseitige Aufklärung und Abstimmung im Vorfeld von Veröffentlichungen, die Ergebnisse aus den hier spezifizierten Arbeiten behandeln.

5. Beigefügte Unterlagen

Anlage 1 enthält die Zeichnungen mit Fertigungstoleranzen der Sandwichkacheln und der zusätzlich zu fertigenden W_{100} Bleche. Grundlage sind die Abmessungen 19x28 mm in der Grundfläche der Sandwichkacheln und 20x120 mm für die W_{100} Bleche. Bei Abweichungen der Grundfläche in dem in Abschnitt 2. Genannten Grenzen behalten die in Anlage 1 gezeigten Form- und Lagetoleranzen ihre Gültigkeit.

W7-X	Technische Spezifikation Rahmenvertrag Hinterguss OFE-Cu auf Wolfram	1-ACW	2KYD6T
------	--	-------	------------------------

6. Projektmanagement

Konkretisierte Anfragen des Ags für die Ausführung von Arbeiten müssen vom AN innerhalb 2 Wochen auf Basis der in der unterstehenden Tabelle angegebenen Pauschalpreisen, Richtwerte der Lieferzeiten und benötigte Arbeitsstunden angeboten werden.

Im Pauschalangebot sind die anwendbaren Einheiten für die Preise und Zeiten anzugeben (zum Beispiel €/kg, €/Teileanzahl, Wochen/Teileanzahl). Die Rohstoffpreise von W und Cu sind in den ersten zwei Zeilen anzugeben. Diese Preise werden indiziert. Alle andere Preise sind exklusiv Materialkosten von W und Cu anzugeben.

7. Tabelle als Grundlage für das Leistungsverzeichnis

Aufgabe	[Abmessungen in mm]	Preis / Einheit
Rohmaterial W		€/kg
Rohmaterial Cu		€/kg
Herstellung oder Beschaffung der zu fügenden Grundwerkstoffe	W100 19x28x4	
Zuschnitt und Vorbereitung der zu fügenden Grundwerkstoffe	W100 19x28x2	
	W80/Cu20 19x28x1	
	W70/Cu30 19x28x1	
	W95NiFe 19x28x4	
	OFE-Cu als Vormaterial für Verguss	
Hintergießen des W100 Substrats mit 1 mm OFE-Cu (V1.1)	W100/Cu 19x28x5	
Hintergießen des W100; W80/Cu20 und W70/Cu30 Substrats mit 1 mm OFE-Cu (V1.2)	W100-W80/Cu20-W70/Cu30-Cu 19x28x5	
Hintergießen des W95NiFe Substrats mit 1 mm OFE-Cu (V.1.3)	W95NiFe/Cu 19x28x5	
Herstellung und Zuschnitt der W100 Kachel (V1.4)	W100 120x20x4	
Hintergießen des W100 Substrats mit 1 mm OFE-Cu (V2.1)	W100/Cu 19x28x5	
Hintergießen des W100; W80/Cu20 und W70/Cu30 Substrats mit 1 mm OFE-Cu (V2.2)	W100-W80/Cu20-W70/Cu30-Cu 19x28x5	
Wärmebehandlung		
Nachbereitung mit Grundzuschnitt und Reinigung	W100/W95NiFe-Cu 19x28x5	
	W100-W80/Cu20-W70/Cu30-Cu 19x28x5	
	W100 120x20x4	
Ultraschallprüfung	W100/W95NiFe-Cu 19x28x5	
	W100-W80/Cu20-W70/Cu30-Cu 19x28x5	
	W100 120x20x4	
CT oder Mikro-CT	W100/W95NiFe-Cu 19x28x5	
	W100-W80/Cu20-W70/Cu30-Cu 19x28x5	
	W100 120x20x4	
Metallografie	W100/W95NiFe-Cu 19x28x5	
	W100-W80/Cu20-W70/Cu30-Cu 19x28x5	
	W100 120x20x4	
Endbearbeitung	W100/W95NiFe-Cu 19x28x5	
	W100-W80/Cu20-W70/Cu30-Cu 19x28x5	
	W100 120x20x4	
Vermessung	W100/W95NiFe-Cu 19x28x5	
	W100-W80/Cu20-W70/Cu30-Cu 19x28x5	
	W100 120x20x4	
Reinigung (UHV-gerecht)	W100/W95NiFe-Cu 19x28x5	
	W100-W80/Cu20-W70/Cu30-Cu 19x28x5	
	W100 120x20x4	
Konstruktion und Fertigung von Hilfsvorrichtungen	Gesamtanzahl in Stunden + Einzelstunde	

W7-X	Technische Spezifikation Rahmenvertrag Hinterguss OFE-Cu auf Wolfram	1-ACW	2KYD6T
------	--	-------	------------------------

Dokumentation und Berichtswesen	Gesamtanzahl in Stunden + Einzelstunde	
Weitere Nachbereitungsarbeiten wie Verpackung und Versand	Gesamtanzahl in Stunden + Einzelstunde	