

Schlussbericht zum Vorhaben
**„Entwicklung von Hartmetallschneiden mit
Innenbohrungen und zur Anbindung an Wechselsysteme“**

im Rahmen des Eurostars Projekts
E! 114633 MASTODON
**„Verbundprojekt: Entwicklung langlebiger Kreissägeblätter großer Durchmesser mit
austauschbarem Zahn-Wechselsystem und innerer Kühlschmierstoffzufuhr“**

Dr. Richard Schulte
Thomas Lippus
Daniel Thomalla
Susanne da Silva Passos

TIGRA GmbH
Gewerbering 2
86698 Oberndorf am Lech

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2108C
Projektlaufzeit: 01.06.2021 – 31.10.2023

Schlussbericht zum Vorhaben

„Entwicklung von Hartmetallschneiden mit Innenbohrungen und zur Anbindung an Wechselsysteme“

im Rahmen des Eurostars Projekts

E! 114633 MASTODON

„Verbundprojekt: Entwicklung langlebiger Kreissägeblätter großer Durchmesser mit austauschbarem Zahn-Wechselsystem und innerer Kühlschmierstoffzufuhr“

Teil I: Kurzbericht

1. Aufgabenstellung und Stand von Wissenschaft und Technik

Im Projekt soll ein neuartiges, effizientes und langlebiges High-End-Sägeblatt mit großem Durchmesser (>1000 mm), austauschbaren Sägezähnen für die Metall- und Holzbearbeitung entwickelt werden, optional mit werkzeuginterner Kühlschmierstoffzuführung. Durch die Austauschbarkeit einzelner Sägezähne können verschlissene oder beschädigte Zähne direkt beim Anwender repariert werden, was insbesondere für weit abgelegene Industriebetriebe Vorteile bietet. Aufgrund der Abgeschiedenheit sind die Versorgungsbedingungen schlecht, die Kosten für Transport, Lagerhaltung und Entsorgung von Kreissägewerkzeugen mit großen Durchmessern hoch.

Anstatt die kompletten Werkzeuge zu ersetzen, soll ein System zum Einsatz kommen, bei dem der große Grundkörper weiterverwendet wird und nur die vergleichsweise kleinen und dadurch bei Transport und Lagerhaltung günstigeren Sägezähne ausgetauscht werden müssen. Zudem wird durch die Austauschbarkeit der Zähne deren Oberflächenbehandlung erleichtert. Diese beiden Umstände führen zu einer Erhöhung der Lebensdauer des gesamten Sägewerkzeuges.

Schwerpunkt von TIGRA ist dabei die Umsetzung einer neuartigen Kreissäge-Zahngeometrie, welche im günstigsten Fall sowohl über eine innere Bohrung verfügt, über welche der Kühlschmierstoff unmittelbar an die Schneide zugeführt werden kann, als auch über eine Schnittstelle zu dem neuartigen Wechselsystem verfügt.

Die TIGRA betreffenden Innovationen betreffen einerseits das Produkt an sich und andererseits die dazu notwendige Fertigungstechnik.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben hatte mit dem Projektstart am 01.06.2021 und dem Projektende am 31.10.2023 eine Gesamtlaufzeit von 29 Monaten.

In der anfänglichen Konzeptphase wurde zunächst ein Anforderungsprofil erstellt und darauf aufbauend die Idee für ein neues Zahnwechselsystem entwickelt. Das Konzept der lösbaren Verbindung von Zahn und Halter/Stammbblatt wurde immer wieder in CAD-Modellen konkretisiert und mit den Partnern geteilt und diskutiert. Durch FEM-Simulationen wurden kritische Bereiche identifiziert und in einem repetitiven Prozess entschärft.

Zur Erprobung mit realen Bauteilen wurde schließlich für den Zahn eine Geometrie festgelegt, die aufgrund ihrer Komplexität und der Toleranzanforderungen nur durch Metallpulverspritzguss in Hartmetall gefertigt werden kann.

Zur Überprüfung der Kompatibilität der ausgewählten Hartmetallsorten und Hartstoffschichten wurden zunächst spezielle Hartmetall-Probekörper gefertigt und von den Partnern beschichtet und charakterisiert.

Im Rahmen des Projekts wurden aufeinander aufbauend zwei Spritzgusswerkzeuge für den Mastodon-Wechselzahn konstruiert und in Auftrag gegeben.

Mit dem ersten Spritzgusswerkzeug wurden Serien an Sägezahnrohlingen mit jeweils angepassten Prozessparametern in vier Hartmetallsorten gefertigt. Die Rohlinge wurden den Partnern für Tests und zur Entwicklung deren Fertigungsstrategien (Schleifen und Beschichten) übergeben.

Parallel dazu wurden die mit dem ersten Werkzeug gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse zur Erstellung einer optimierten Geometrie für den Mastodon-Wechselzahn-Rohling und die dazugehörige Werkzeugkonstruktion verwendet.

Mit dem zweiten Spritzgusswerkzeug konnten Probekörper entsprechend der optimierten Geometrie hergestellt und den Partnern zur Verfügung gestellt werden.

In der Endphase des Projekts wurden Trennversuche mit „kleinen“ Sägeblättern (D=350 mm), bestückt mit Mastodon-Wechselzähnen in Stahl, Aluminium und Messing durchgeführt. Um die Erprobung von Prototypen mit großen Durchmessern zu umgehen, wurden maßstäbliche „Modell-Werkzeuge“ mit kleinerem Durchmesser gefertigt, die jedoch dieselben Bedingungen hinsichtlich der Zerspanung (Spanraum- und Zahngeometrie, Dicke) herzustellen in der Lage sind.

3. Ergebnisse und Zusammenarbeit

wichtige Ergebnisse:

- Im Rahmen des Projekts wurde ein neuartiges Konzept für einen Wechselzahn für Kreissägeblätter mit großem Durchmesser entwickelt
- Die Geometrie des Sägezahns und die untersuchten Hartmetallsorten sind zur PVD-Beschichtung (MS/HiPIMS) geeignet
- Das Grund-Konzept des Mastodon-Wechselzahns konnte mit Sägeblättern mit kleinem Durchmesser als Modellversuch erfolgreich getestet werden
- Im Modellversuch waren Einzelschnitte in Stahl (S235JR), Aluminium (EN AW-6060) und Messing (CW614N) möglich
- Im Modellversuch waren wiederholte Trennschnitte in Aluminium und Messing möglich
- Beim Trennen von Stahl trat im Modellversuch in Verbindung mit höheren Schnittkräften wiederholt eine Lockerung der Schraubverbindung auf.
- Eine Aussage über die Leistungsfähigkeit unter dauerhaftem Einsatz kann aus den Modellversuchen jedoch nicht abgeleitet werden - dies bedarf weiterer Optimierungen und Untersuchungen in einem Nachfolgeprojekt

Der Projektzeitraum war durch die Covid-19 Pandemie geprägt. Das Konsortium als Ganzes traf sich während des Projekts in monatlichen Meetings via MS Teams. Hinzu kamen online-Treffen je nach Bedarf in kleineren Gruppen. Persönliche Treffen mit einzelnen Partnern fanden erst bei den Sägeversuchen am Projektende statt. Alle Partner trugen durch hohes Engagement, Offenheit, Vertrauen und Zuverlässigkeit zum Projektfortschritt bei. Verzögerungen sind der Komplexität der Aufgabenstellung und der Schwierigkeit der Kommunikation über Distanzen geschuldet.

Schlussbericht zum Vorhaben

„Entwicklung von Hartmetallschneiden mit Innenbohrungen und zur Anbindung an Wechselsysteme“

Teil II: Ausführliche Darstellung

1. Projektpartner

Das hier vorgestellte Vorhaben war Teil des Eurostars Projekts E! 114633 MASTODON „Verbundprojekt: Entwicklung langlebiger Kreissägeblätter großer Durchmesser mit austauschbarem Zahn-Wechselsystem und innerer Kühlschmierstoffzufuhr“ und wurde in diesem Rahmen von der TIGRA GmbH in Zusammenarbeit mit deutschen und spanischen Partnern durchgeführt:

- Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein, München, Deutschland
(Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, IPA, Stuttgart)
Funktion: Forschungseinrichtung
- EXCLUSIVAS JAUFA S.A., Arre, Spanien
Funktion: Hersteller von Kreissägeblättern
- Kohnle GmbH Hartmetall-Werkzeug-Fabrik, Kolbermoor, Deutschland
Funktion: Hersteller von Kreissägeblättern
- Flubetech S.L., Castellar Dei Valles, Barcelona, Spanien
Funktion: Hersteller von Hartstoffbeschichtungen

Die spanischen Partner wurden durch die Asociación de la Industria Navarra (AIN) in der Projektkoordinierung und in wissenschaftlichen Fragen unterstützt.


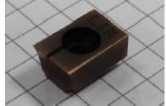
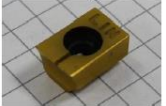
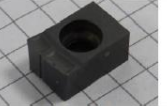
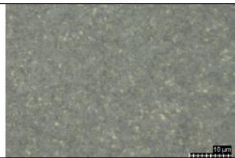
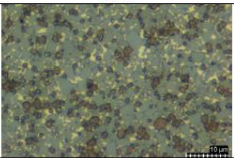
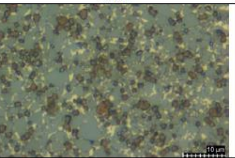
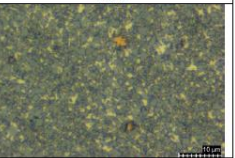
2. Projektinhalte und Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Bewertung und Spezifizierung aktueller Kreissägewerkzeuge

Mithilfe der Projektpartner wurden Daten und Muster von existierenden Zahnwechsellsystemen zusammengetragen, systematisiert und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile bewertet.

Für drei Wechselzähne (Linsinger, LinCut und Framag, X;Blade) und eine Wechselplatte mit Bohrung für Kühlschmierstoff (KSS) zum Drehen von Paul Horn sind die metallurgischen Ergebnisse in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 metallurgische Ergebnisse der untersuchten Muster für Wechselzähne bzw. Wechselplatten

U2935 + U2959 Mastodon: samples from Paul Horn, Linsinger and Framag				
	U2935-1 Paul Horn	U2959-1 Linsinger	U2959-2 Linsinger	U2959-3 Framag
system				
sample				
size [mm]	21x8x9,5	12x8x6	12x8x6	13x9x5,9
mass [g]	14,121	4,989	5,004	6,145
coating	no	yes	yes	no
$4\pi\sigma$ [$\mu\text{T}^*\text{m}^3/\text{kg}$]	11,8	17,0	17,0	21,4
[$\text{G}^*\text{cm}^3/\text{g}$]	(9,4)	(13,5)	(13,5)	(17,0)
coercivity [kA/m]	20,2	12,8	12,8	13,7
[Oe]	(254)	(161)	(161)	(172)
density [g/cm^3]	14,60	13,70	13,70	14,27
hardness [HV10]	1681	1369	1369	1350
microstructure				
porosity	<A02 B00 C00	<A02 B00 C00	<A02 B00 C00	<A02 B00 C00
average WC size [μm]	fine - micro	medium	medium	fine - micro
η -phase	no	no	no	no
γ -phase	no	yes (1-2 μm)	yes (1-2 μm)	yes (1-2 μm)
composition with carbides calculated from XRF measurement of heavy elements				
WC [wt.%]	91,8% \pm 0,4%	78,2% \pm 0,4%	78,1% \pm 0,4%	85,4% \pm 0,4%
TaC [wt.%]	---	8,8% \pm 0,2%	8,8% \pm 0,2%	2,2% \pm 0,2%
Mo ₂ C [wt.%]	0,2% \pm 0,1%	---	---	---
Cr ₃ C ₂ [wt.%]	0,4% \pm 0,1%	0,3% \pm 0,1%	0,4% \pm 0,1%	---
TiC [wt.%]	---	2,2% \pm 0,2%	2,1% \pm 0,2%	---
Co [wt.%]	7,6% \pm 0,2%	10,4% \pm 0,2%	10,5% \pm 0,2%	12,3% \pm 0,2%

$4\pi\sigma$ = specific magnetic saturation polarization

Tabelle 2 zeigt die Einordnung und Bewertung existierender Wechselzahnssysteme als Übersicht.

Tabelle 2 Einordnung und Bewertung existierender Wechselzahnsysteme

		Hersteller, Bezeichnung	Bewertung
Bohrung im Zahn für Befestigungsschraube	Bohrung in radialer Richtung	Boehlerit GmbH&Co.KG, SawTec 2.0	Schraube erfordert Gewinde im Halter/Stammbblatt
		Gebr. Lennartz GmbH & Co.KG, Vmax	beschädigte Schrauben führen zu hohen Reparaturkosten
		Linsinger Maschinenbau GmbH, LinCut	
	Bohrung in tangentialer Richtung	Framag Industrieanlagenbau GmbH, X:Blade	Befestigungsbohrung behindert ggf. Zufuhr von KSS durch den Zahn
Kampmann GmbH, Thorblade I			
Klemmsystem	Exzenter	Boehlerit GmbH&Co.KG, SawTec	raumgreifende Klemmgeometrie im Halter/Stammbblatt
	Schraube	Kampmann GmbH, Thorblade II	Schraube erfordert Gewinde im Halter/Stammbblatt raumgreifende Klemmgeometrie im Halter/Stammbblatt

Aufgrund dieser Analyse wurden folgende Anforderungen an das neue Zahnwechselsystem formuliert:

- keine Befestigungsbohrung im Zahn, die ggf. die Zufuhr von Kühlschmierstoff (KSS) durch den Sägezahn an die Schneide behindert
- kein Gewinde im Halter/Stammbblatt (zu teuer, zu empfindlich)
- formschlüssige Befestigung des Zahns (Sicherung des Zahns gegen Heraus-schleudern beim Sägen)
- keine Veränderung der Spanraumgeometrie
- werkstoffgerechte Konstruktion der Zahngeometrie, Vermeidung von Kerben und Zugbelastung im Hartmetall

Arbeitspaket 2: Entwicklung des Haltersystems und der Zähne

Ausgehend von den in AP1 formulierten Anforderungen wurde ein erster Entwurf für das neue Befestigungssystem für den Hartmetallzahn skizziert (Bild 1).

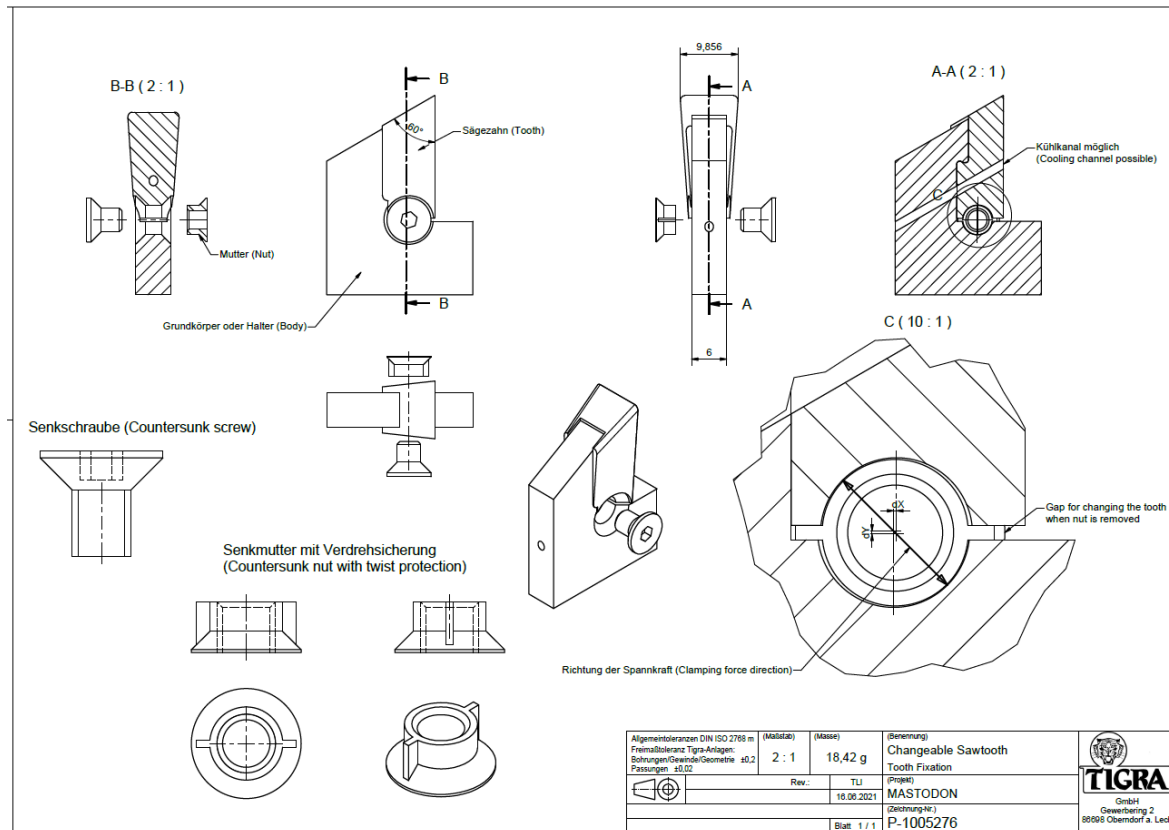


Bild 1 erster Entwurf für neues Mastodon Zahnwechselsystemen (P-1005276)

Der Entwurf wurde in ein digitales CAD-3D Modell übertragen und das Modell des Zahnhalters vollständig ergänzt (Bild 2).

Erste Prototypen von Zahn und Zahnhalter aus Kunststoff wurden im Filamentdruckverfahren (FFF) hergestellt und an die Partner verteilt (Bild 3).

Auf Grundlage des digitalen 3D-Modells wurden vom IPA FEM-Berechnungen durchgeführt, um das Verhalten von Zahn, Zahnhalter und der Verbindung Senkschraube-Senkmutter zu simulieren und kritische Bereiche in der Konstruktion zu identifizieren (Bild 4).

In einem repetitiven Prozess wurden die so erhaltenen Erkenntnisse zusammen mit Anregungen und Ideen der Partner schrittweise in das Modell übernommen.

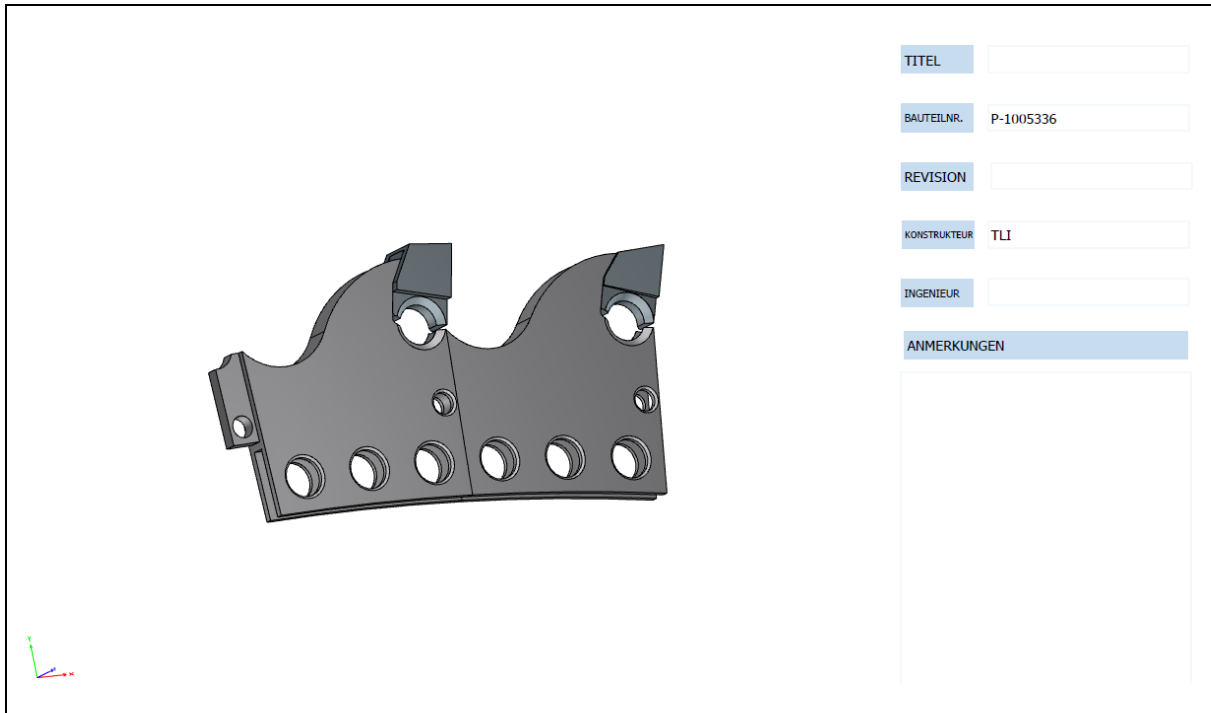


Bild 2 *digitales 3D-Modell: Zahn und Zahnhalter (P-1005336)*

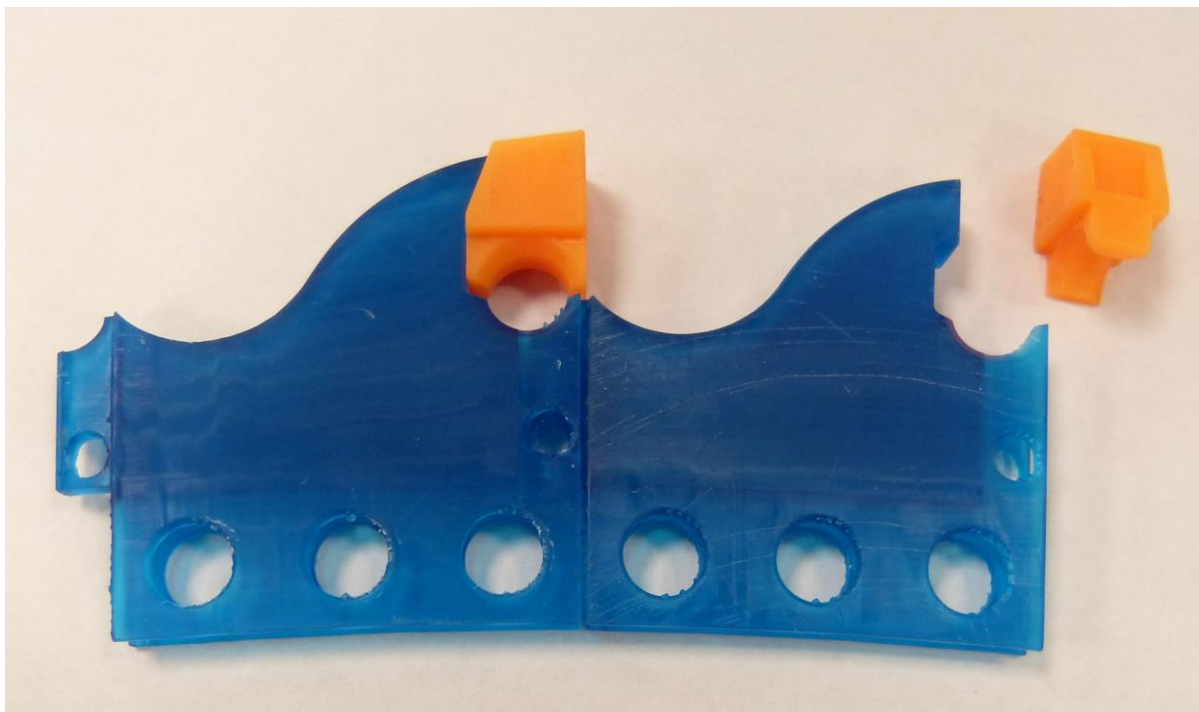


Bild 3 *Kunststoff-Prototypen von Zahn und Halter, hergestellt im Filamentdruckverfahren (FFF)*

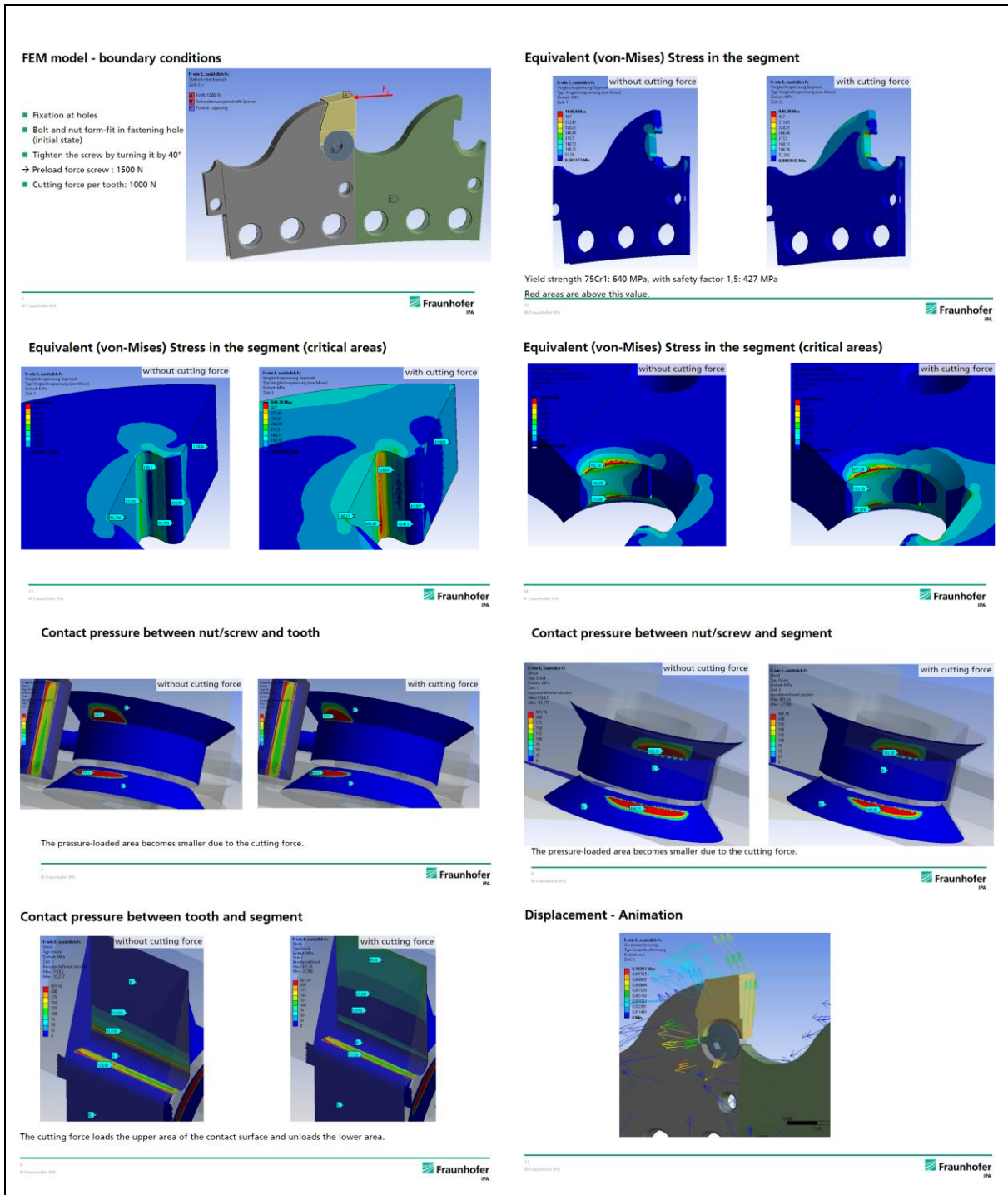


Bild 4 FEM-Berechnungen von IPA anhand des digitalen 3D-Modells, kritische Bereiche in rot

Meilensteine M2.1 und M2.2

In Abstimmung mit den Partnern wurde der in Bild 5 gezeigte Zahn als Rohteil-Schneiden-geometrie für die Herstellung erster Hartmetall-Prototypen festgelegt.

Als Fertigungsverfahren kommt aufgrund der komplexen Geometrie und der geforderten Toleranzen nur der Metallpulver-Spritzguss (MIM) in Frage.

Als Hartmetallsorte wurde für die ersten Versuche T10MG (K10-K40, 1650 HV10) ausgewählt.

In Hinblick auf die Beschichtungsversuche (Arbeitspaket 4) und spätere Zerspanungsversuche (Arbeitspaket 5) wurden vier weitere Hartmetallsorten festgelegt:

- für die Zerspanung von Aluminium und Messing:
T06MG (K01-K20, 1800 HV10) und
T07MF-CR (K20-K30, 1580 HV10)
- für die Zerspanung von Stahl:
TP25 (P20-P30, 1500 HV10) und
TP35 (P30-P40, 1400 HV10)

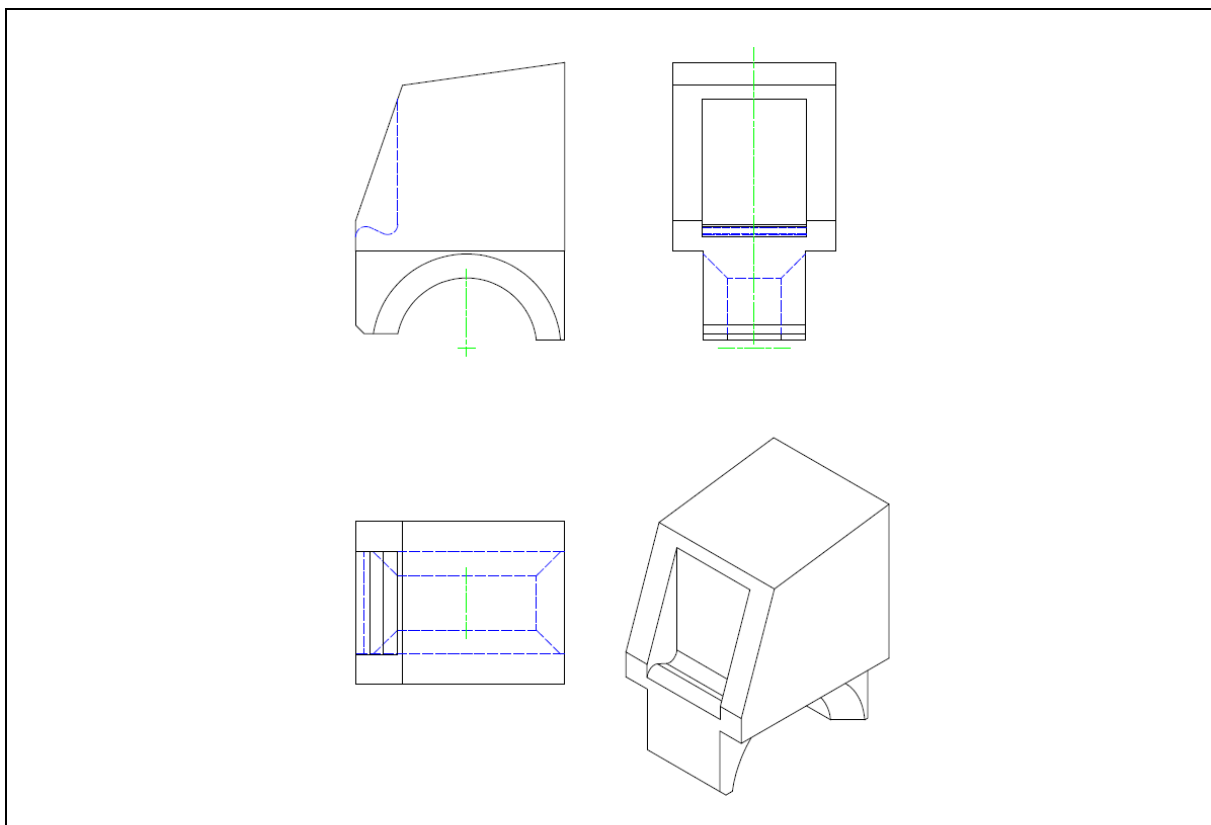


Bild 5 Rohteil-Schneidengeometrie für die Konstruktion des ersten Spritzguss-werkzeugs (166876)

Arbeitspaket 3: Entwicklung fortschrittlicher Grundkörper und des Kühlsystems

In diesem Arbeitspaket hatte TIGRA keine Aufgaben.

Jedoch sollte bei der Entwicklung des Haltersystems und der Zähne (siehe AP2) eine Möglichkeit zur Zuführung von Kühlschmierstoff an die Schneide als Option berücksichtigt werden.

Diese Anforderung wurde bei der Entwicklung der Zahngeometrie berücksichtigt, bis das Konsortium im Konsens beschloss, dieses Ziel zurückzustellen und im laufenden Projekt nicht weiter zu verfolgen (Bild 6).

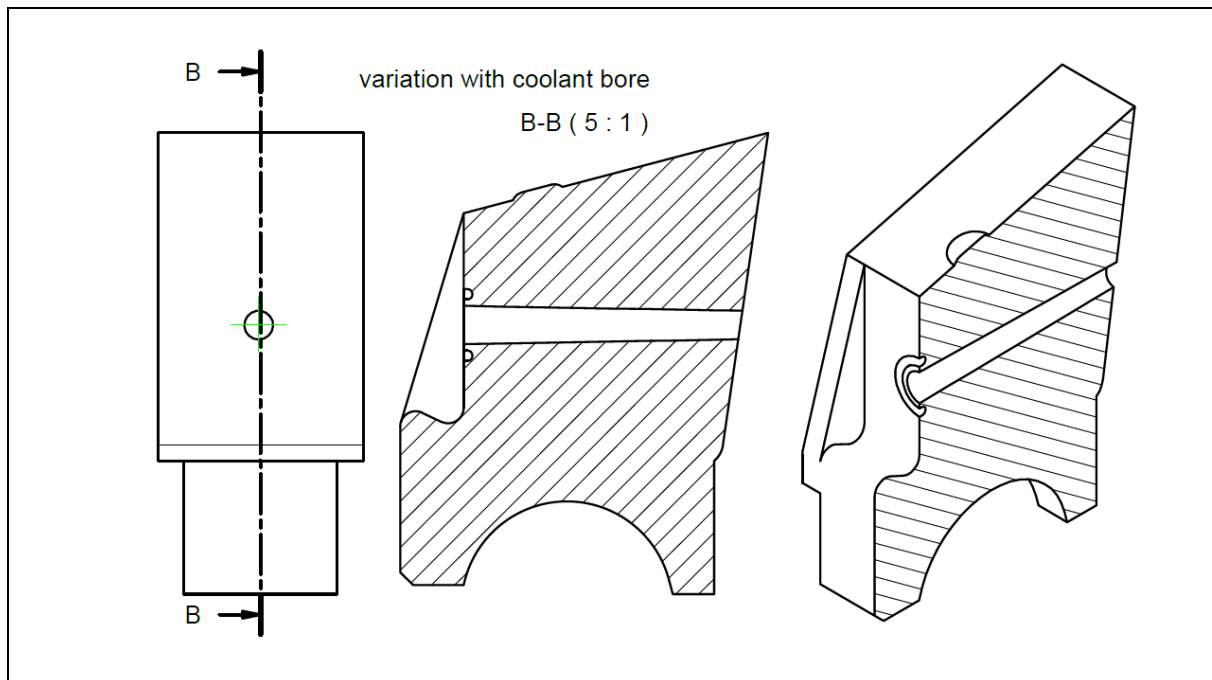


Bild 6 Entwurf für Mastodon-Wechselzahn mit Kühlkanal (P-1005570)

Arbeitspaket 4: Untersuchungen zu Oberflächenbeschichtungen

Zur Kompatibilität der Hartmetalle von TIGRA und der Hartstoffschichten von Flubetech lagen zu Beginn des Projekts keinerlei Daten vor.

Um die Eignung der Hartmetalle von TIGRA zur Beschichtung mit den Hartstoffschichten von Flubetech zu untersuchen, wurde mit den Partnern ein Versuchsplan entwickelt (Bild 7).

Grade name	Composition	No. of notches	drawing	No. of samples ground with two parallel faces + one side polished	No. of samples as sintered + sandblasted
Grades for Al cutting					
T06MG	ISO: K01-K20	1	164145_	12	11
	USA: C3 ++				
T10MG	ISO: K10-K40	2	164146_	12	12
	USA: C3 +				
T07MF-CR	ISO: K20-K30	3	164147_	15	12
	USA: C2-C3				
Grades for steel cutting					
TP25	ISO: P20-P30	4	164148	12	11
TP35	ISO: P30-P40	5	164149	11	11

Coating name	Composition	Structure	PVD type
Grades for Al cutting			
TiB ₂	TiB ₂	monolayer	MS
CrN	CrN	monolayer	MS
ZrN	CrN-CrZrN-ZrN	trilayer	MS
DLC	Cr-CrN-CrCN-CrC-C	gradient	MS
Grades for steel cutting			
AlTiN	AlTiN	nanostructured	MS
AlTiCrN	AlTiCrN	multilayer	HiPIMS
AlTiSiN	AlTiN-TiSiN	multilayer	HiPIMS

Bild 7 Probenmatrix der Beschichtungsversuche

Von TIGRA wurden dazu Hartmetallplatten (Bild 8) in 5 verschiedenen Hartmetallsorten gefertigt (Bild 7, linke Seite).

Die gesinterten Platten wurden vor der Weitergabe an Flubetech entweder sandgestrahlt oder zweiseitig planparallel geschliffen und einseitig poliert (Bild 9).

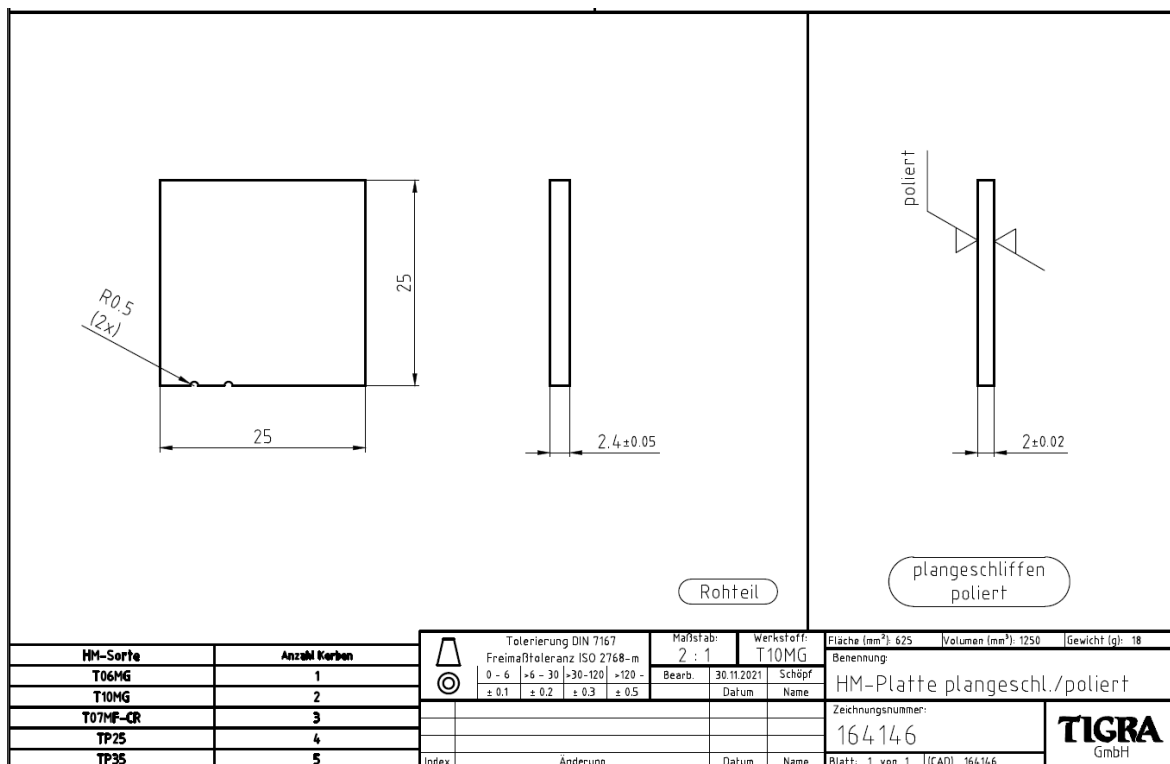


Bild 8 Zeichnung: Platten für Beschichtungsversuche, einseitig poliert (164146)

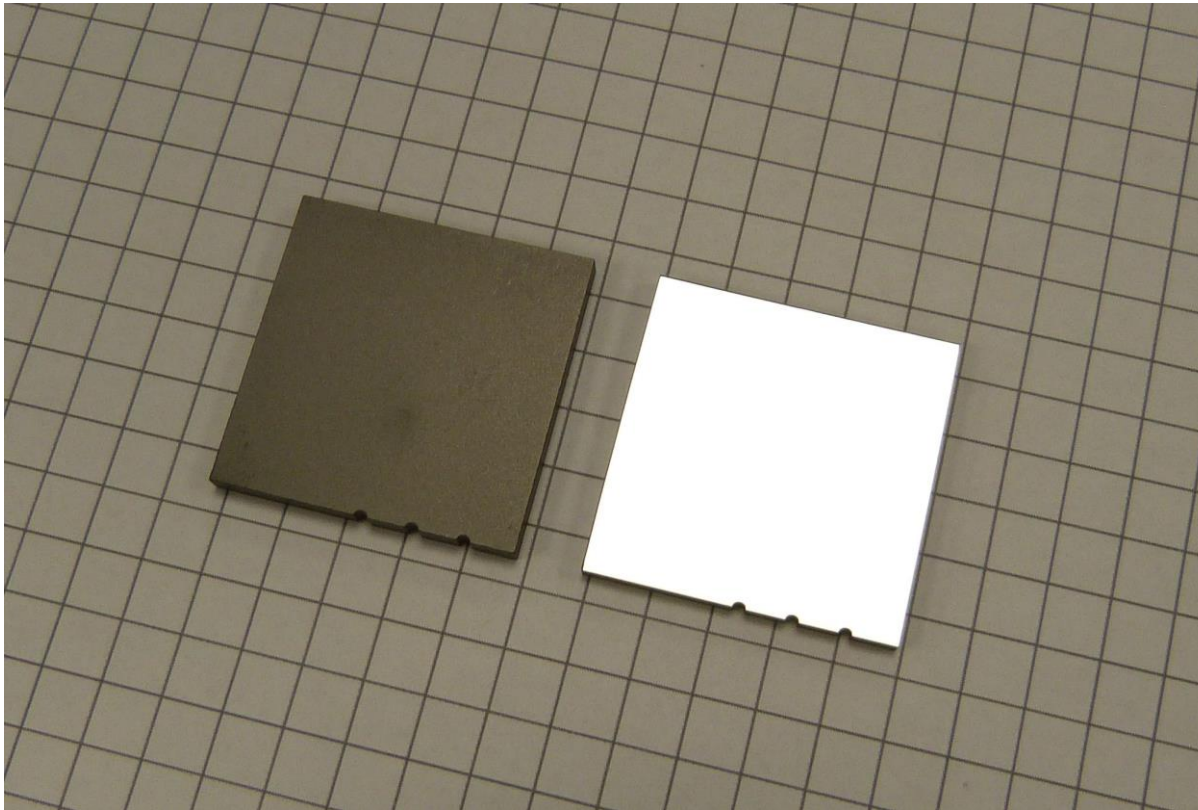


Bild 9 Bild: Platten für Beschichtungsversuche, links: sandgestrahlt, rechts: poliert

Die Proben wurden von Flubetech beschichtet und von AIN charakterisiert. Dabei zeigte sich jeweils eine sehr gute Haftung der Beschichtung auf dem Hartmetall, unabhängig von der Sorte und der Oberflächenbehandlung vor dem Beschichten.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Versuchsserie wurden im Mai 2022 mit einem Poster auf dem LVIII Congreso de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (LVIII SECV 2022), in Madrid präsentiert. Die Daten sind in Bild 10 dargestellt.

Die an der Platten für Beschichtungsversuche gewonnenen Erkenntnisse wurden im weiteren Projektverlauf durch Beschichtungsversuche durch Flubetech/JAUFASA/AIN an Sägezahn-Prototypen aus Hartmetall bestätigt (siehe Arbeitspaket 5).

Adhesion of magnetron sputtering and HiPIMS PVD coatings on hard metal grades for aluminum and ferrous cutting applications

INTRODUCTION

Coating's adhesion on tools is key parameter for a good performance of a cutting tool. In this work a series of magnetron sputtering coatings have been deposited on different hard metal grades for two different cutting applications (non-ferrous and ferrous metals cutting), in order to study their adhesion properties.

GD-OES analysis, nanoindentation and scratch test have been carried out in order to characterize the different coating - hard metal grade pairs.

EXPERIMENTAL

COATINGS



Figure 1: CemeCon CC800/9 ML HiPIMS PVD equipment at FLUBETECH

All the coatings here presented were deposited in a CemeCon CC800/9 ML HiPIMS PVD equipment.

Two coatings were deposited on Al cutting grades:

- CrN by MS
- DLC by MS

Three different coatings systems were deposited on ferrous cutting grades:

- Nanostructured AlTiN by MS
- AlTiN-TiSiN bilayer (with Cr-CrN bonding layer) by HiPIMS
- AlTiCrN (with Cr-CrN bonding layer) by HiPIMS.

SUBSTRATE MATERIAL

Samples of 25 mm x 25 mm x 2,5 mm of 5 different tungsten carbide grades were produced with two different surface finishing: ground - mirror polished ($R_a < 30 \text{ nm}$) and sand-blasted ($R_a \sim 300 \text{ nm}$).

Three hard metal grades for Al cutting:

HM grade	ISO	Hardness HV 10
T06MG	K01-K20	1800
T10MG	K10-K40	1650
T07MF-CR	K20-K30	1580

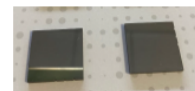


Figure 2: Mirror polished T07MF-CR samples.

Two hard metal grades for ferrous cutting:

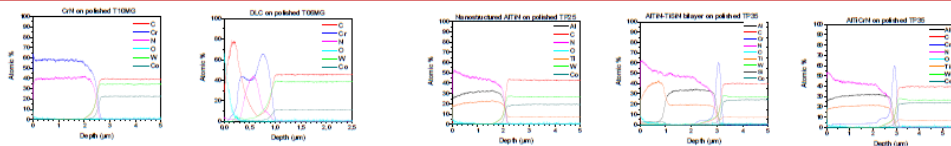
HM grade	ISO	Hardness HV 10
TP25	P20-P30	1500
TP35	P30-P40	1400



Figure 3: Sand blasted T07MF-CR samples.

RESULTS

GD-OES



Nano-indentation

Sample	Hardness (GPa)	Young Mod. (GPa)
CrN_T06MG	24.4±2.5	262.7±21.3
CrN_T10MG	23.6±2.2	245.5±15.7
CrN_T07MF-CR	19.5±3.2	222.9±21.3
DLC_T06MG	26.7±3.4	179.6±12.6
DLC_T10MG	26.4±3.9	180.7±13.3
DLC_T07MF-CR	27.3±3.2	187.3±16.8
AlTiN_TP25	28.4±3.8	293.6±27.3
AlTiN_TP35	28.3±5.8	294.0±28.8
AlTiN-TiSiN_TP25	25.0±5.6	282.7±35.2
AlTiN-TiSiN_TP35	18.8±5.1	238.7±34.3
AlTiCrN_TP25	34.9±7.4	319.8±38.3
AlTiCrN_TP35	32.7±5.2	282.13±27.2

Scratch test - Adhesion

Sample	Sand blasted			Polished		
	LC2	LC3	Scratch	LC2	LC3	Scratch
CrN_T06MG	43 ± 3	115 ± 5		56 ± 9	110 ± 6	
CrN_T10MG	45 ± 6	122 ± 4		61 ± 7	117 ± 13	
CrN_T07MF-CR	50 ± 8	119 ± 3		54 ± 10	114 ± 14	
DLC_T06MG	20 ± 1	65 ± 5		20 ± 3	49 ± 12	
DLC_T10MG	42 ± 9	76 ± 12		27 ± 7	99 ± 15	
DLC_T07MF-CR	24 ± 4	74 ± 12		26 ± 4	110 ± 15	
AlTiN_TP25	39 ± 4	144 ± 3		69 ± 11	120 ± 7	
AlTiN_TP35	59 ± 7	145 ± 2		68 ± 10	116 ± 7	
AlTiN-TiSiN_TP25	23 ± 4	137 ± 4		16 ± 4	143 ± 6	
AlTiN-TiSiN_TP35	22 ± 0	135 ± 13		19 ± 6	145 ± 4	
AlTiCrN_TP25	29 ± 4	127 ± 6		32 ± 10	128 ± 9	
AlTiCrN_TP35	26 ± 10	139 ± 1		29 ± 10	138 ± 13	

CONCLUSIONS

MS and HiPIMS coatings have shown excellent adhesion properties on different hard metal grades no matter the composition of the coating, the hard metal grade nor the surface finish.

Bild 10 Ergebnisse der Beschichtungsversuche mit Flubetech und AlN

Arbeitspaket 5: Prototypenherstellung und Validierungstests

Auf Grundlage der in Arbeitspaket 2, Bild 5 gezeigten Schneidengeometrie wurde ein erstes Spritzgusswerkzeug konstruiert und als ungehärtetes Werkzeug für wenige Musterbauteile in Auftrag gegeben (Bild 11).

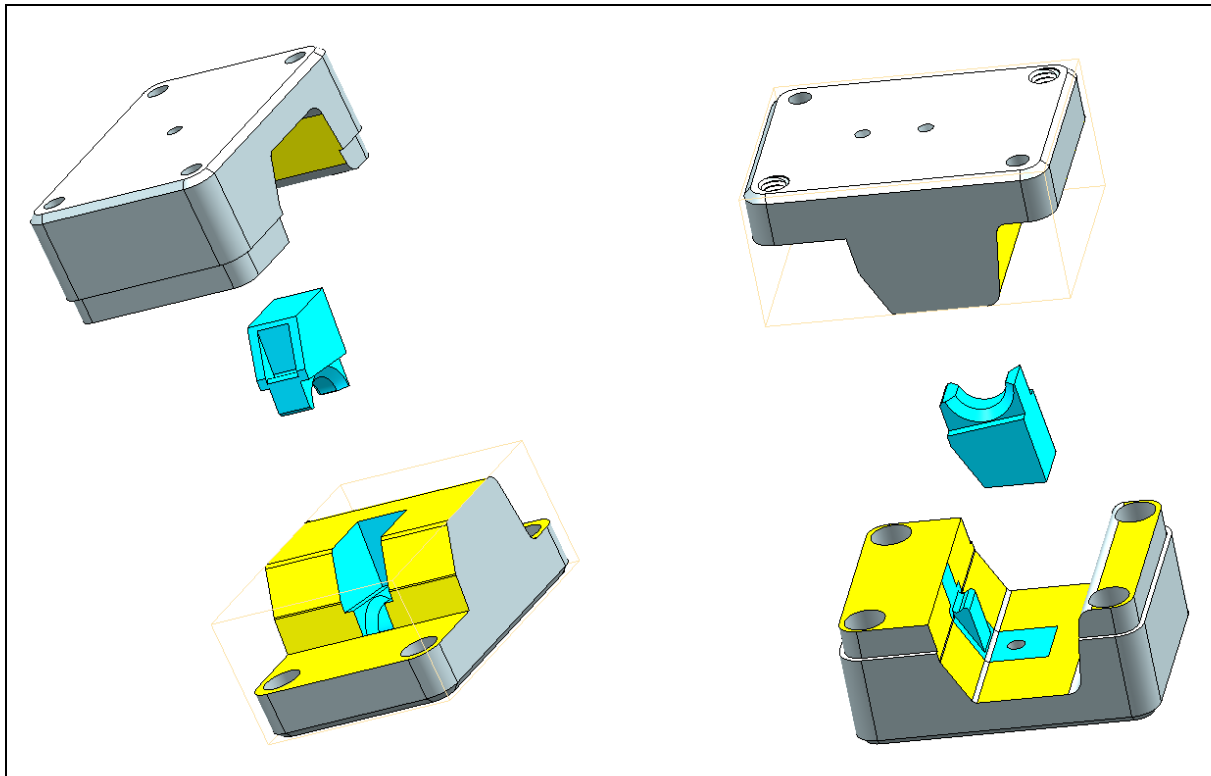


Bild 11 CAD-Modell: erstes ungehärtetes Spritzgusswerkzeug und Spritzling

Für den Spritzguss wird das Hartmetall-Rohstoffpulver durch Zugabe organischer Bestandteile („organischer Binder“) zu einer thermoplastischen Masse („Feedstock“) aufbereitet. Der beim Spritzguss erzeugte Formkörper wird im Folgenden als „Spritzling“ bezeichnet. In einem mehrstufigen Prozess wird der organische Binder anschließend aus dem Spritzling entfernt und der Formkörper zu einem dichten Hartmetallrohling gesintert.

Die Rezeptur der Feedstockaufbereitung beeinflusst neben dem Verhalten beim Spritzguss auch die Schwindung während der Sinterung.

Die Schwindung muss bereits bei der Konstruktion des Spritzgusswerkzeugs berücksichtigt werden.

Bild 12 zeigt einen Größenvergleich zwischen Spritzling und gesintertem Rohling anhand der ersten Serie mit dem ersten Spritzgusswerkzeug.

Die Rohlinge der ersten Serie waren metallurgisch in Ordnung und frei von inneren Makrodefekten (Bild 13).

Die Überprüfung der Maße an Rohlingen der ersten Serie ergab systematische Maßabweichungen durch Verformung (Sinterverzug) im Bereich der Nut (Bild 14).

Die übrigen Maße lagen innerhalb der angestrebten Toleranz.

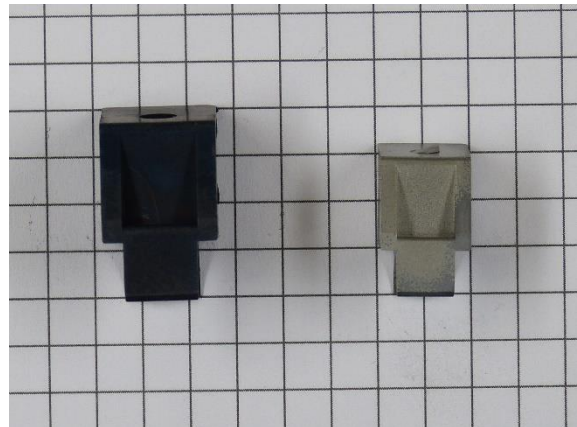
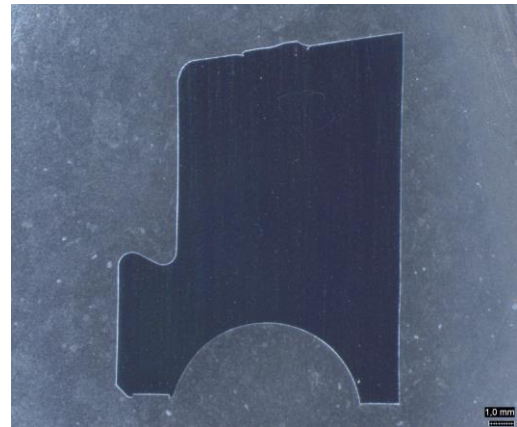
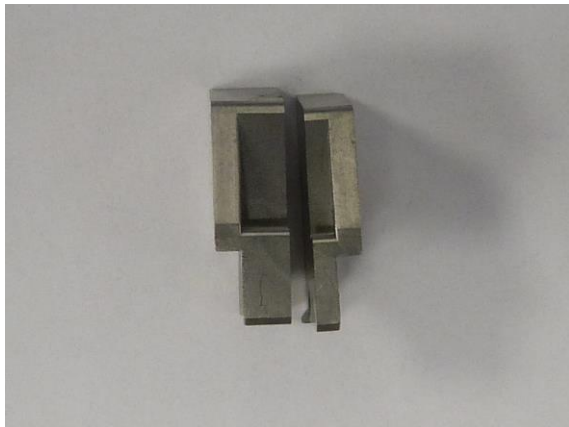


Bild 12 erstes Spritzgusswerkzeug, erste Serie:
links: Spritzling, rechts: Hartmetall-Rohling



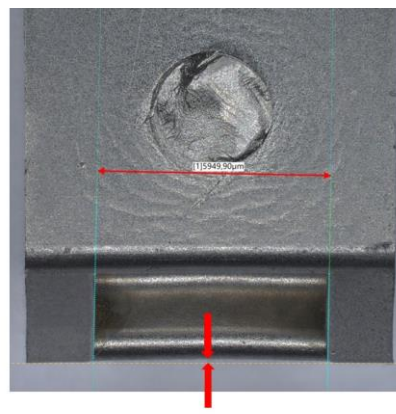
Rohling, getrennt

Rohling: Querschnitt, poliert

Bild 13 erstes Spritzgusswerkzeug, erste Serie, T10MG:
Beurteilung von Rohlingen auf innere Defekte



konisch

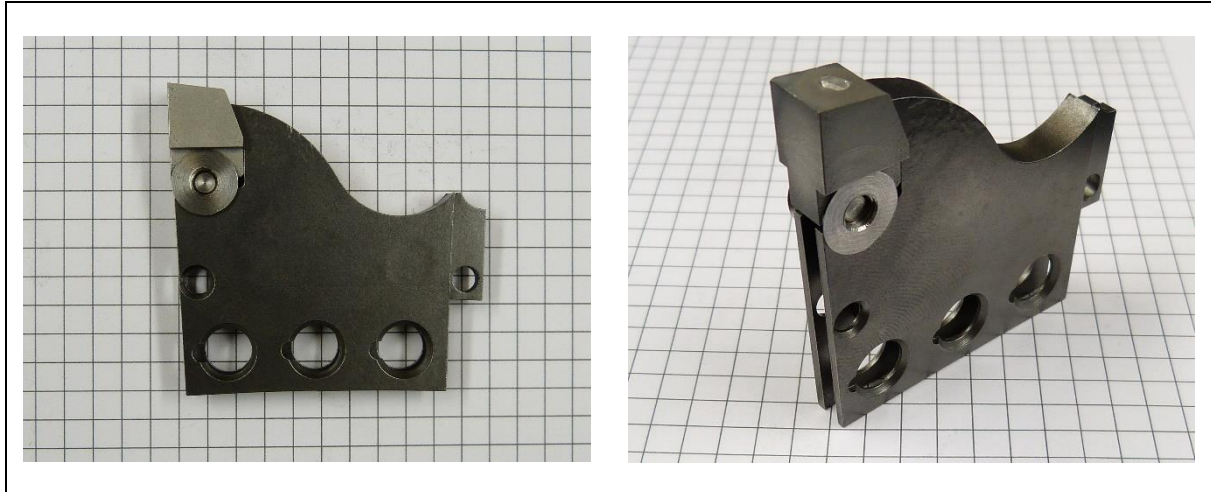


gekrümmt

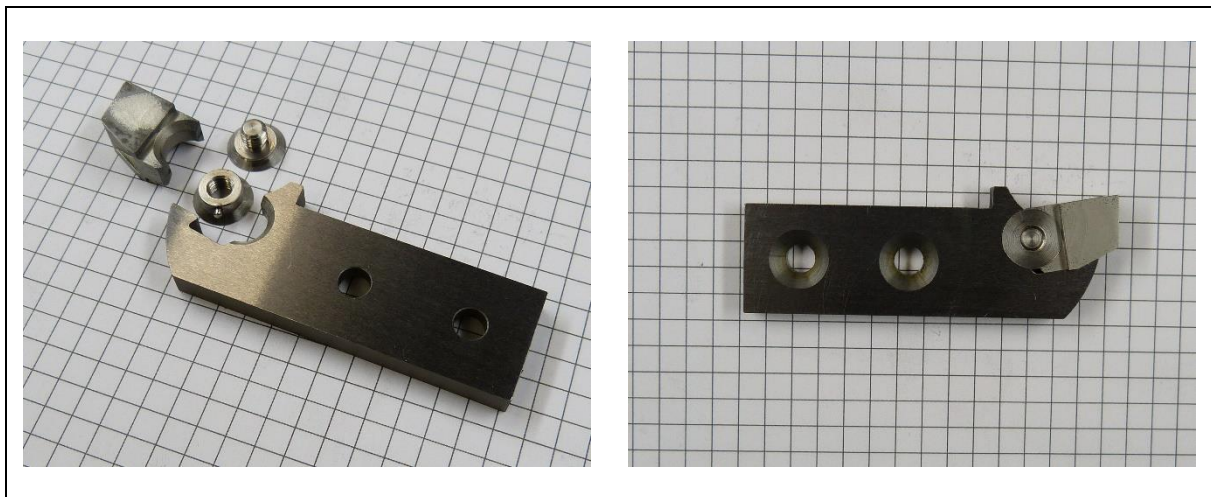
Bild 14 erstes Spritzgusswerkzeug, erste Serie, T10MG:
Maßabweichungen im Bereich der Nut, Verformung des Rohlings (IPA)

Versuche, mit dem ersten Spritzgusswerkzeug, durch Anpassung der Feedstockrezeptur dem Untermaß der Nutbreite entgegenzuwirken, ohne die Toleranz der Außenmaße zu überschreiten, waren nicht erfolgreich.

Bild 15 und Bild 16 zeigen Montageversuche mit einem angepassten Zahnhalter von JAUFASA und einem angepassten Halter für Einzahnversuche am IPA.



*Bild 15 erstes Spritzgusswerkzeug, T10MG:
Montageversuch: Rohling in angepasstem Zahnhalter von Jaufasa*



*Bild 16 erstes Spritzgusswerkzeug, T10MG:
Montageversuch: Rohling und angepasster Zahnhalter für Einzahnversuch*

Parallel zu den Versuchen mit T10MG wurden Feedstockrezepturen für die Hartmetallsorten T07MF-CR, T06MG und TP35 entwickelt.

Insgesamt wurden vom ersten Spritzgusswerkzeug sechs Serien zu je mind. 100 Zähnen fertiggestellt – davon drei in der Sorte T10MG und je eine in den Sorten T07MF-CR, T06MG und TP35. Bei den letzten Serien mit dem ersten Werkzeug in T07MF-CR, T06MG und TP35 traten zunehmend Defekte im Bereich des Angusses auf (Bild 17).

Ähnlich wie bei T10MG waren die Außenmaße jeweils in Ordnung, die Nutbreite aber ca. 0,1 mm zu gering.

Um den Projektverlauf nicht zu behindern, wurde unter den Partnern beschlossen, die Rohlinge in den Sorten T10MG, T07MF-CR und TP35 trotzdem für weitergehende Versuche zu nutzen und die Geometrie im Zahnhalter ggf. an die zu geringe Nutbreite anzupassen.

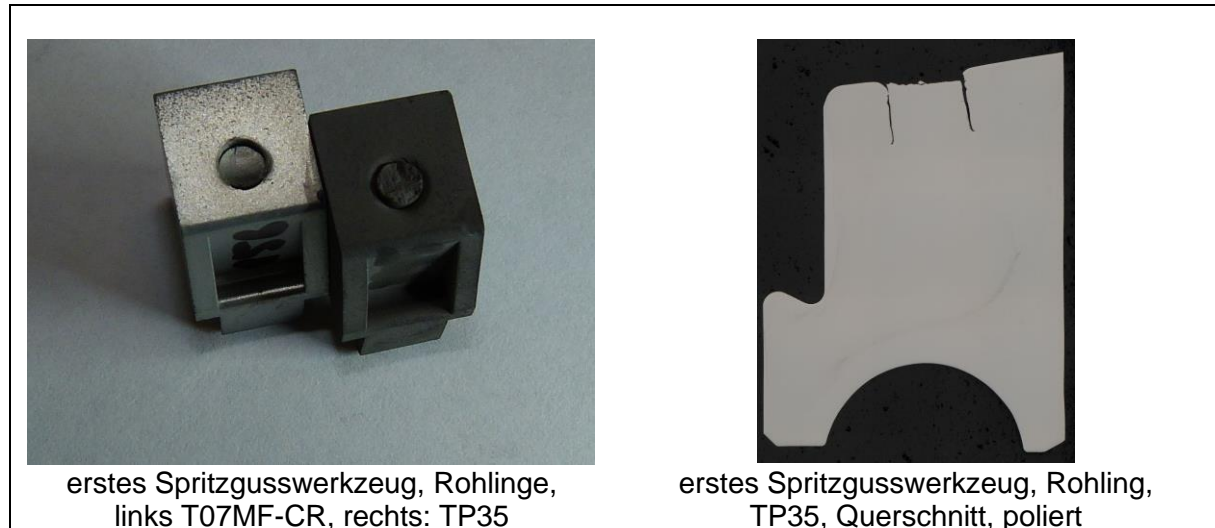


Bild 17 Defekte am Anguss von Rohlingen vom ersten Spritzgusswerkzeug T07MF-CR und TP35

Sägezahn-Rohlinge aus T10MG wurden allen Partnern zur Verfügung gestellt. Die Sägenhersteller erhielten zusätzlich Zähne in den Sorten T07MF-CR und TP35. Auf weitere Versuche mit dem ersten Spritzgusswerkzeug wurde verzichtet.

Die Erkenntnisse aus den Erfahrungen mit dem ersten Spritzgusswerkzeug wurden währenddessen in einen neuen Entwurf für eine optimierte Zahngeometrie (Bild 18) und die Konstruktion für das zugehörige zweite Werkzeug (Bild 19) umgesetzt.

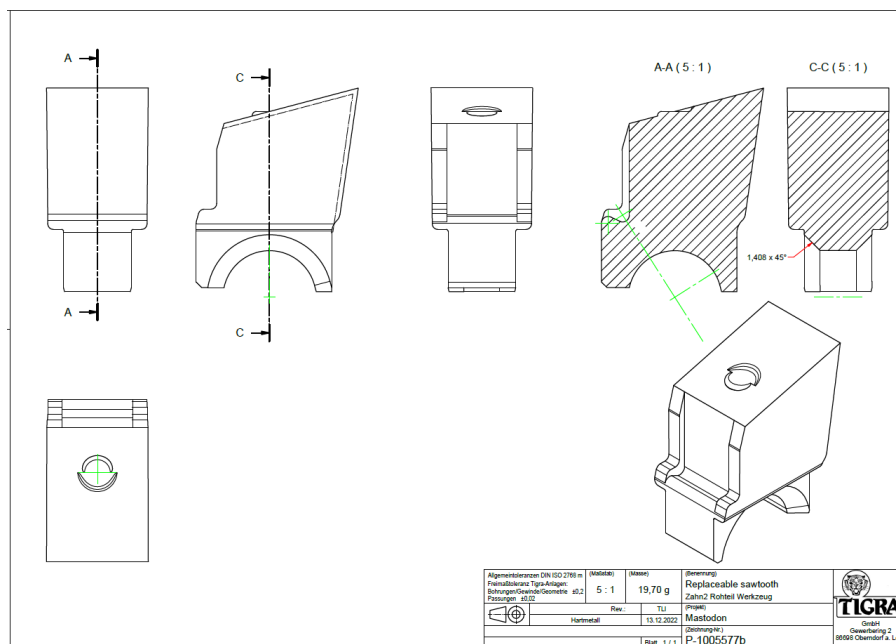


Bild 18 optimierte Zahngeometrie (P-1005577b) für Konstruktion des zweiten Spritzgusswerkzeugs

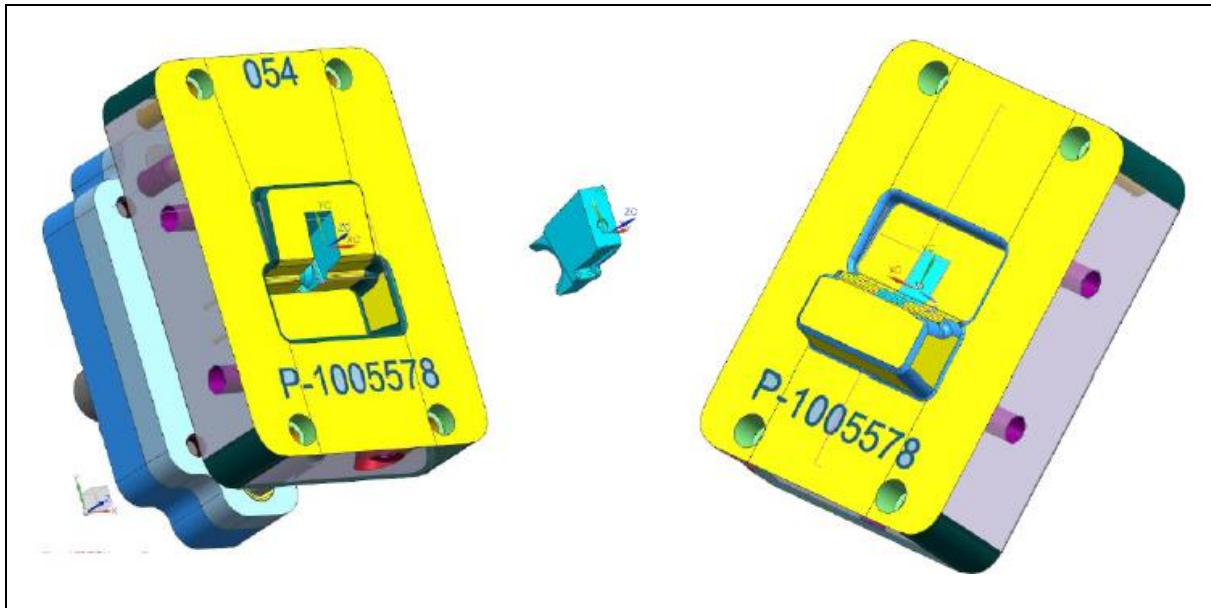


Bild 19 CAD-Modell für zweites Spritzgusswerkzeug (P1005578) und Spritzling mit optimierter Geometrie

Um den Verschleiß zu reduzieren, wurde das zweite Spritzgusswerkzeug als gehärtetes Werkzeug in Auftrag gegeben. Bild 20 zeigt das zweite Werkzeug nach Einbau in die Spritzgussmaschine in geöffneter Position.

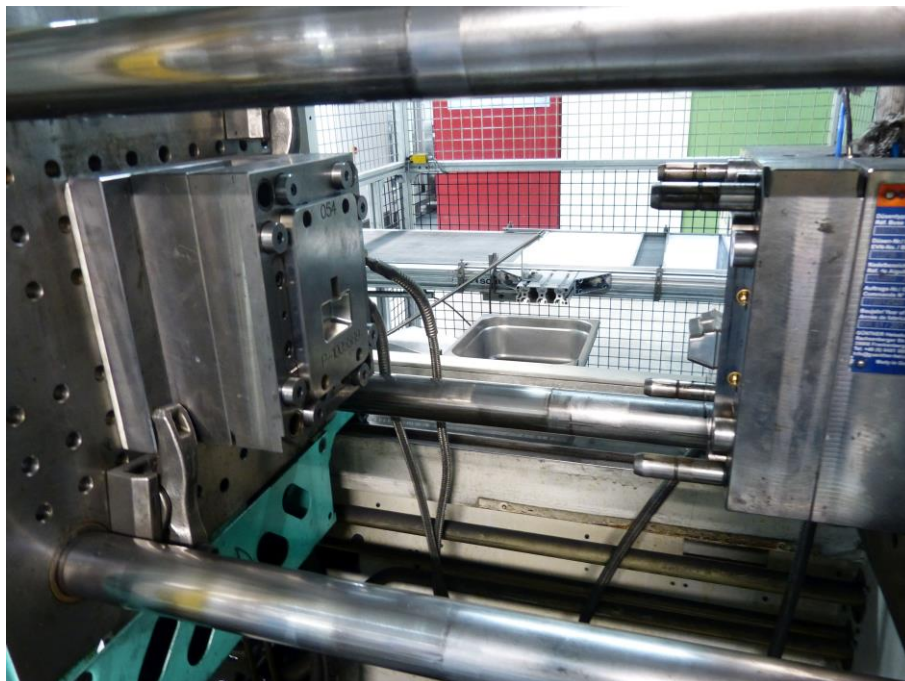


Bild 20 zweites Spritzgusswerkzeug, offen, eingebaut in Spritzgussmaschine

Auch die Inbetriebnahme des zweiten Spritzgusswerkzeugs erfolgte zunächst mit Feedstock der Hartmetallsorte T10MG (Bild 21).

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden die Rezepturen für Feedstock der Sorten T07MF-CR und TP35 angepasst.

In beiden Sorten wurde je eine Serie mit dem zweiten Spritzgusswerkzeug gespritzt, entbindert und fertiggesintert (Bild 22).

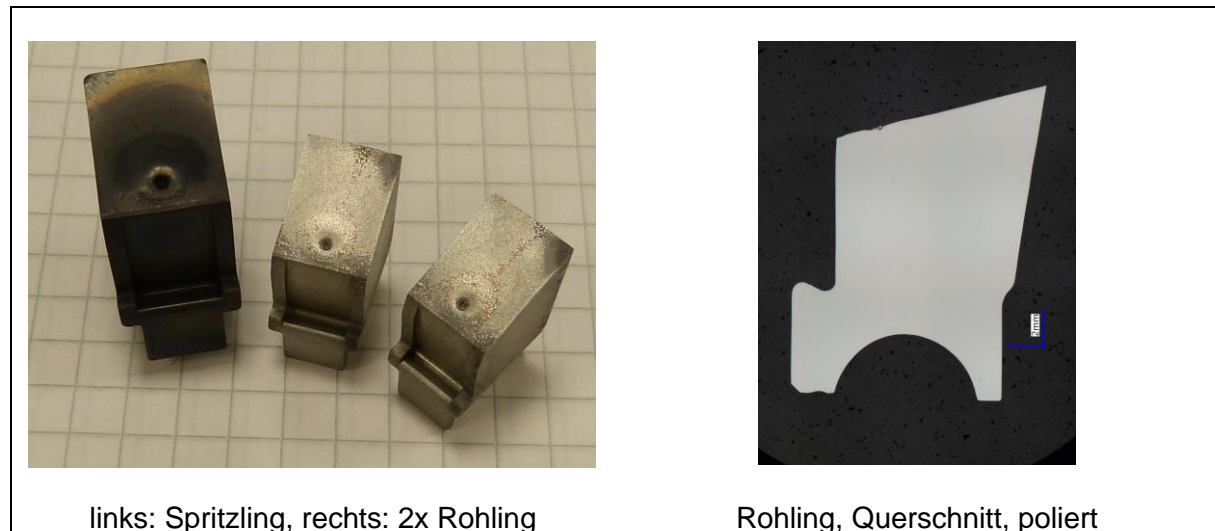


Bild 21 zweites Spritzgusswerkzeug, erste Serie, T10MG:
Beurteilung von Rohlingen auf innere Defekte

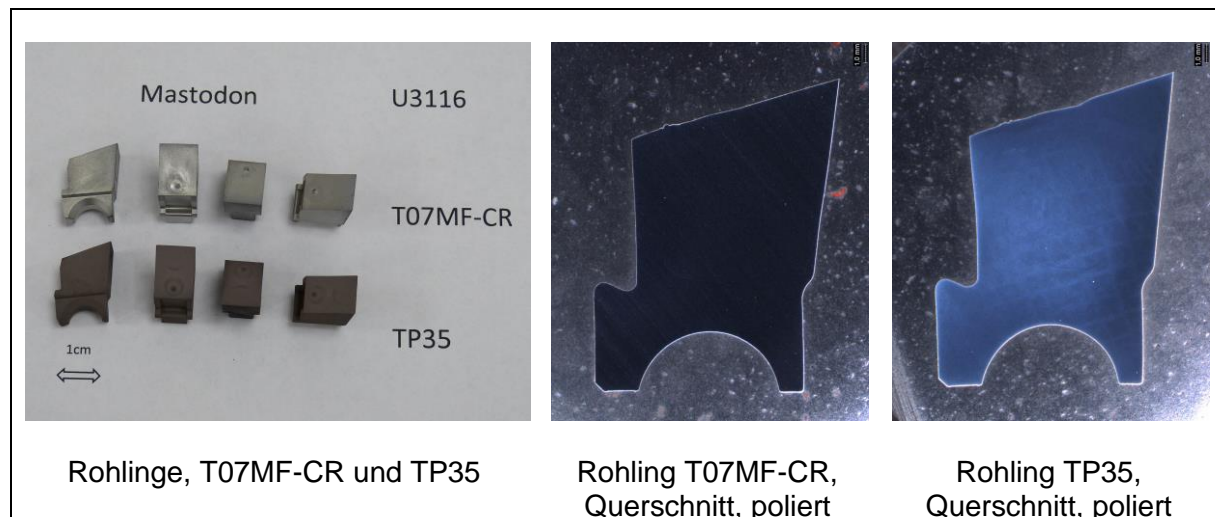


Bild 22 zweites Spritzgusswerkzeug, Serien T07MF-CR und TP35:
Beurteilung von Rohlingen auf innere Defekte

Die Nutbreite nach dem Sintern war bei beiden Serien innerhalb der geforderten Toleranz. Bei Montageversuchen wurde bei einzelnen Rohlingen Verzug im Bereich der Klemmflächen zu Schraube und Mutter festgestellt (Innenradius zu klein).

Dieser war auf eine ungünstige Positionierung der Proben beim Fertigsintern zurückzuführen. Die Auflage auf der Spanfläche während des Sinterns führt zu einer Verformung am Fuß, unterhalb der Spanfläche.

Die betroffenen Zähne wurden aussortiert.

Die übrigen Zähne beider Sorten wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Ergebnisse der von und mit den Partnern durchgeführten Tests an den Mastodon-Sägezahn-Rohlingen

(siehe auch Sachberichte der Projektpartner)

- IPA: statische Belastungstests

Erster Test des Mastodon-Befestigungssystems:

Rohlinge (erstes Spritzgusswerkzeug, T10MG) wurden in einem Einzahnhalter gespannt (Bild 16) und mit 4kN Druckkraft auf die Schneide unter 0°, 45° und 90° belastet.

Es kam zu keinem Versagen des Mastodon-Befestigungssystems unter statischer Last - erste Bestätigung für das Mastodon-Befestigungssystem.

- JAUFASA /Flubetech: Herstellung eines Sägeblatts mit großem Durchmesser
JAUFASA hat ein großes Sägeblatt (D=1100 mm, Z=72) mit Zahnhaltern gefertigt, die Halter mit Mastodon-Rohlingen vom ersten Spritzgusswerkzeug, T10MG bestückt, die Zähne auf den Haltern geschliffen und wieder demontiert.
Die geschliffenen Zähne wurden von Flubetech mit DLC beschichtet und an JAUFASA zurückgeliefert.

Die Rohlinge konnten von JAUFASA für das große Sägeblatt geschliffen werden.

Die geschliffenen Sägezähne konnten von Flubetech beschichtet werden.

- IPA/Kohnle/JAUFASA: Sägeversuche mit kleinen Sägeblättern

Trennversuche waren am IPA mit „großen“ Sägeblättern (D>1000 mm) nicht möglich. Daher wurden von Kohnle und JAUFASA maßstäbliche Modell-Sägeblätter (D=350 mm, Z=26) gefertigt, mit derselben Geometrie hinsichtlich der Zerspanung (Spanraum- und Zahngeometrie, Dicke des Stammblatts und Schnittbreite), wie bei Sägeblättern mit großem Durchmesser. Die Modell-Sägeblätter wurden mit geschliffenen Mastodon-Sägezähnen bestückt.

Die Schnittversuche mit den „kleinen“ Sägeblättern wurden am IPA durchgeführt und mit der dort vorhandenen Messtechnik dokumentiert. Bild 23 zeigt den Versuchsaufbau am IPA. Bei allen Versuchen am IPA wurden Vollmaterial-Rechteckprofile 70 mm x 70 mm gesägt. Als Werkstückstoffe kam Aluminium (EN AW-6060), Stahl (S235JR) und Messing (CW614N) zum Einsatz.

Unter den gewählten Parametern waren während des Trennvorgangs nur 1-2 Sägezähne gleichzeitig im Eingriff, was möglicherweise zu erhöhten Vibrationen beim Einsatz der kleinen Modell-Sägeblättern beigetragen hat.

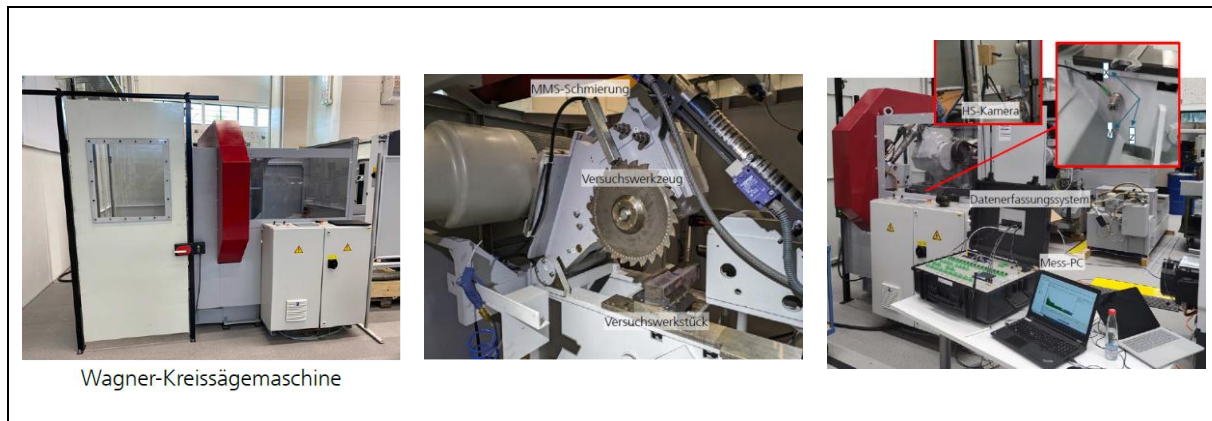


Bild 23 Versuchsaufbau für Versuche mit Sägeblättern $D=350\text{ mm}$, $Z=26$ am IPA

Beim ersten Schnitt des ersten Sägeversuchs wurde Stahl S235JR erfolgreich getrennt (geschliffene Hartmetall-Sägezähne: TP35).

Insgesamt wurden beim ersten Sägeversuch 5 Schnitte gefahren. Bei jedem Durchgang längten und lockerten sich die Schrauben (Version 1) und mussten erneut festgezogen werden. Beim fünften Durchgang kam es schließlich zum Abriss einzelner Schrauben und dadurch zu Zahnverlust (Bild 24).

Die Sägeversuche wurden an dieser Stelle unterbrochen. Für die folgenden Versuche wurden von Kohnle optimierte Schrauben mit höherer Festigkeit beschafft (Version 2).

Mit den verbesserten Schrauben (Version 2) waren wiederholte Trennschnitte in Aluminium (EN AW-6060) und Messing (CW614N) möglich, ohne dass die Schrauben nachgezogen werden mussten.

Beim Trennen von Stahl kam es bei hohen Zahnvorschüben und damit hohen Schnittkräften wieder zur Lockerung einzelner Schraubverbindungen.

Beim Sägen von Aluminium stauten sich bei einem Zahn Späne im Spanraum, bis dieser vollständig ausgefüllt war (Bild 25).

Beim Sägen von langspanenden Werkstoffen muss im Spanraum auf einen glatten Übergang zum Mastodon-Zahn geachtet werden.



Aufbau für ersten Sägeversuch am IPA

Abgerissene Schraube (Version 1) nach fünftem Sägeschnitt, Gewinde steckt noch in Mutter

Bild 24 erster Sägeversuch am IPA, geschliffene Sägezähne vom ersten Spritzgusswerkzeug, TP35 in Stahl S235JR, nach 5 Schnitten: abgerissene Schraube (Version1)

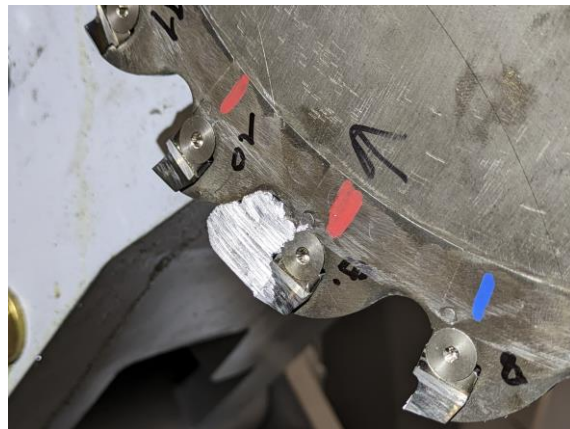


Bild 25 mit Spänen gefüllter Spanraum, beim Sägen von Aluminium

Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Tests mit den Partnern

- Es kam zu keinem Versagen des Mastodon-Befestigungssystems unter statischer Last - erste Bestätigung für das Mastodon-Befestigungssystem.
- Die Rohlinge konnten von JAUFASA für das große Sägeblatt geschliffen werden.
- Die geschliffenen Sägezähne konnten von Flubetech beschichtet werden.

- Im Rahmen des Projekts waren nur Sägeversuche mit Modell-Sägeblättern (D=350 mm, Z=26) möglich
- Beim ersten Schnitt des ersten Sägeversuchs wurde Stahl S235JR erfolgreich getrennt
- Mit den verbesserten Schrauben (Version 2) waren wiederholte Trennschnitte in Aluminium (EN AW-6060) und Messing (CW614N) möglich, ohne dass die Schrauben nachgezogen werden mussten.
- Beim Trennen von Stahl kam es bei hohen Zahnvorschüben und damit hohen Schnittkräften auch mit den verbesserten Schrauben zur Lockerung einzelner Schraubverbindungen.
- Beim Sägen von langspanenden Werkstoffen muss im Spanraum auf einen glatten Übergang zum Mastodon-Zahn geachtet werden.

- Eine Aussage über die Leistungsfähigkeit unter dauerhaftem Einsatz kann aus den Modellversuchen jedoch nicht abgeleitet werden - dies bedarf weiterer Optimierungen und Untersuchungen in einem Nachfolgeprojekt

Arbeitspaket 6: Projektmanagement

Der Projektzeitraum war durch die Covid-19 Pandemie geprägt. Das Konsortium als Ganzes traf sich während des Projekts in monatlichen Meetings via MS Teams. Hinzu kamen online-Treffen je nach Bedarf in kleineren Gruppen. Persönliche Treffen mit einzelnen Partnern fanden erst bei den Sägeversuchen am Projektende statt. Alle Partner trugen durch hohes Engagement, Offenheit, Vertrauen und Zuverlässigkeit zum Projektfortschritt bei. Verzögerungen sind der Komplexität der Aufgabenstellung und der Schwierigkeit der Kommunikation über Distanzen geschuldet.

3. Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die geleisteten Projektarbeiten waren notwendig und angemessen, um die angestrebten Projektziele der Entwicklung eines neuartigen, effizienten und langlebigen High-End-Sägeblattes mit austauschbaren Schneiden zu erreichen.

Um die Angemessenheit der geleisteten Arbeit zu gewährleisten, wurden die Arbeiten nach dem bei der Projektbeantragung vorgestellten Arbeitsplan durchgeführt. Wesentliche Änderungen wurden in den regelmäßigen Fortschrittsberichten erläutert und mit dem Projektträger abgestimmt. Die geleistete Projektarbeit erfolgte gemäß den Vorgaben des Fördermittelgebers, wobei die bewilligten finanziellen Mittel dem Projektumfang, Erkenntnisgewinn und Zielstellung entsprechend angemessen eingesetzt wurden.

4. Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Im Rahmen des Projekts wurde ein neuartiges Wechselsystem für Sägezähne realisiert und in Einzelschnitten erfolgreich erprobt.

Eine Aussage über die Leistungsfähigkeit unter dauerhaftem Einsatz kann aus den Modellversuchen jedoch nicht abgeleitet werden - dies bedarf weiterer Optimierungen und Untersuchungen in einem Nachfolgeprojekt.

Der Nachweis der Leistungsfähigkeit im dauerhaften Einsatz ist Voraussetzung für die Generierung von Nachfrage durch Sägenhersteller und Anwender.

Durch die Zusammenarbeit mit internationalen Industriepartnern und Forschungseinrichtungen wurde das Marktverständnis verbessert, die wissenschaftlich-technologische Basis verbreitert und internes Knowhow zu neuen Fertigungsverfahren aufgebaut.

Das Konzept des neuartigen Wechselsystems kann auf andere Anwendungen übertragen werden.

5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden keine vergleichbaren Lösungen wie im Projekt umgesetzt bekannt.

Es wurden keine Produkte, Forschungsarbeiten oder Patentanmeldungen gefunden, die dem im Projekt entwickelten Kreissägewerkzeug mit austauschbaren Schneiden entgegenstehen oder vergleichbare Ziele verfolgen.

6. Veröffentlichungen des Ergebnisses

Wesentlichen Ergebnisse der Beschichtungsversuche mit Flubetech und AIN wurden im Mai 2022 mit einem Poster auf dem LVIII Congreso de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (LVIII SECV 2022), in Madrid gezeigt.

Vom Fraunhofer IPA ist geplant die Projektergebnisse auf der nächsten Stuttgarter Sägetagung, die im jährlichen Rhythmus im Dezember stattfindet, zu präsentieren. Die Tagung richtet sich an Entwickler, Konstrukteure und Produktmanager von Sägewerkzeugen, -maschinen und -prozessen sowie Anwender der Sägetechnologie aus der Holz-, Metall- und Kunststoffbranche.