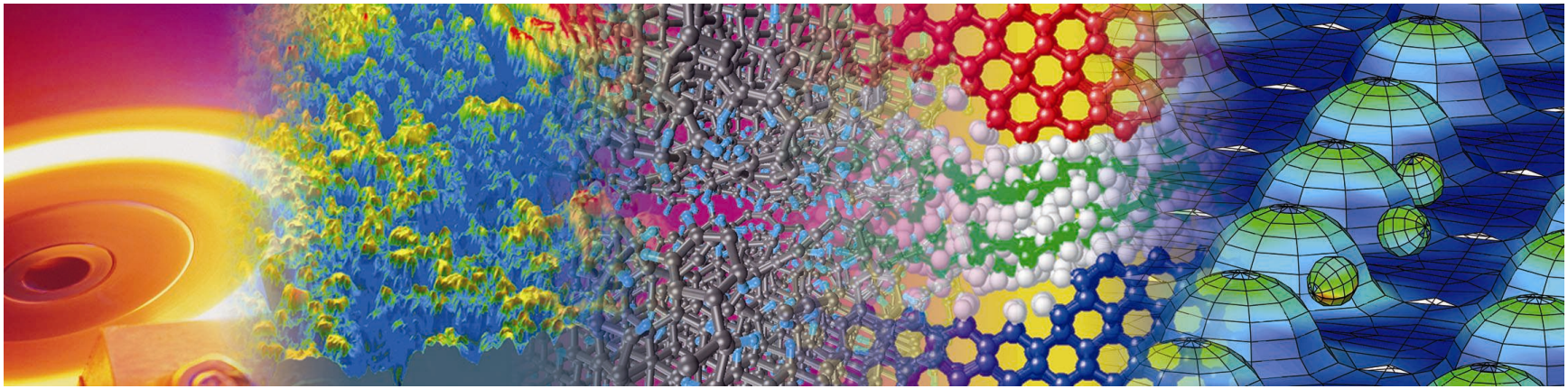
Duplex-Plasma-Oberflächen-behandlung von Aluminiumkolben

Oberflächenfunktionalisierung durch Duplex-Plasmatechnologie (ODPat)

Tobias Slawik
Fraunhofer IWM



Effizienzfabrik-Treff "Ressourceneffiziente Oberflächentechnik"
Frankfurt, 15. November 2011

www.mikrotribologiecentrum.de
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer KIT Karlsruher Institut für Technologie
MIKROTRIBOLOGIE CENTRUM µTC

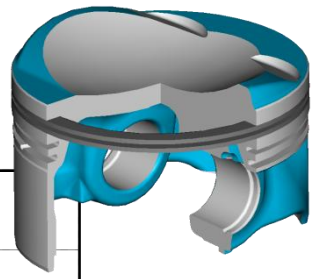
Agenda

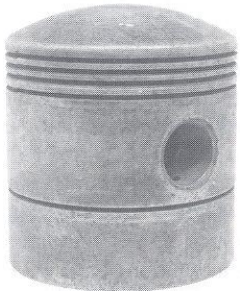
- Projektmotivation
- Projektansatz
- Duplextechnologie
  - Sputtern
  - Nitrieren
  - Verschleißschutzschicht
- Effizientere Beschichtungstechnik
  - HF-Equipment-Model
  - Prozessmonitoring
- Zusammenfassung und Ausblick

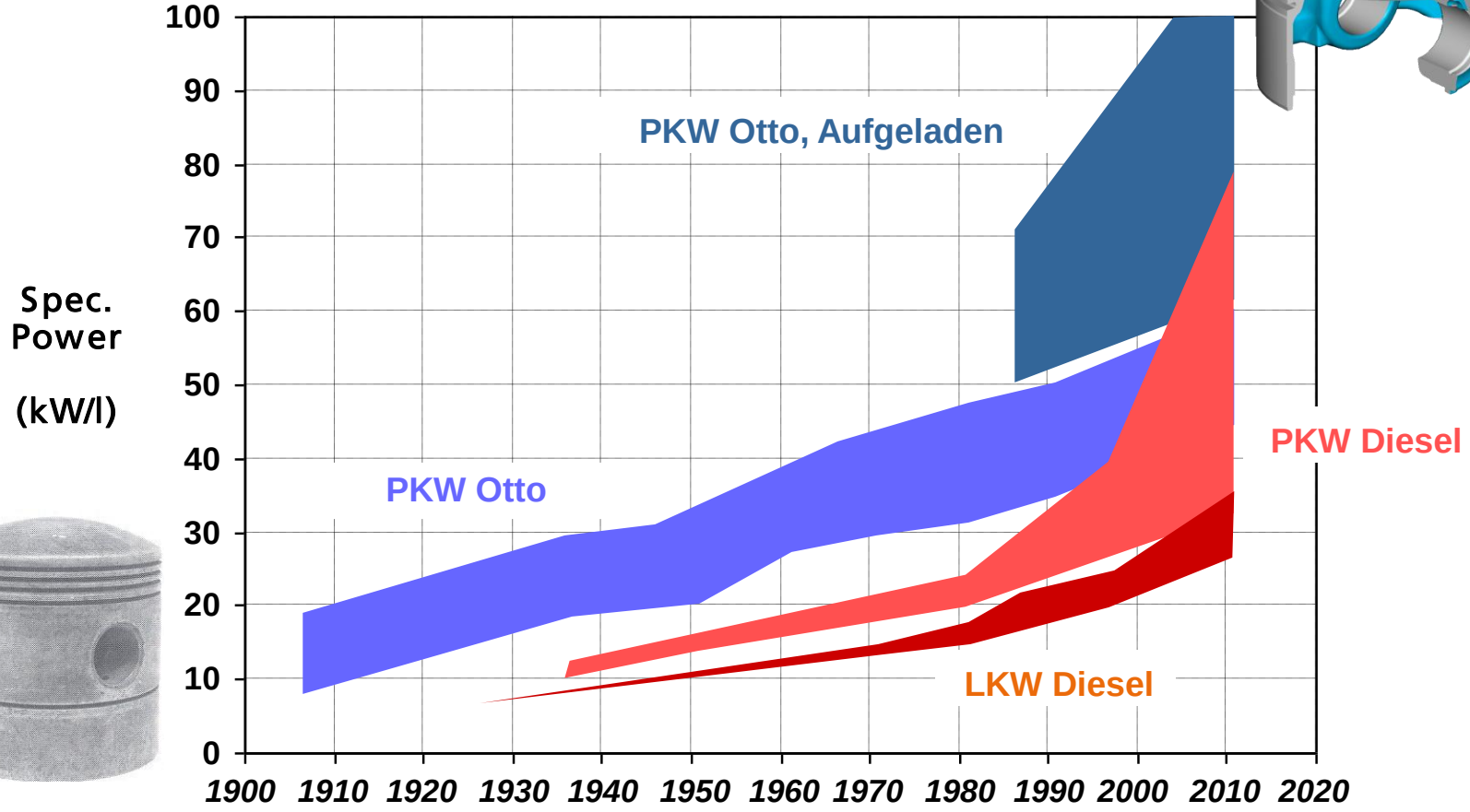
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Projektmotivation

Allgemeiner Trend in der Motorentechnik







© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer KIT Karlsruher Institut für Technologie

MIKROTRIBOLOGIE CENTRUM µTC

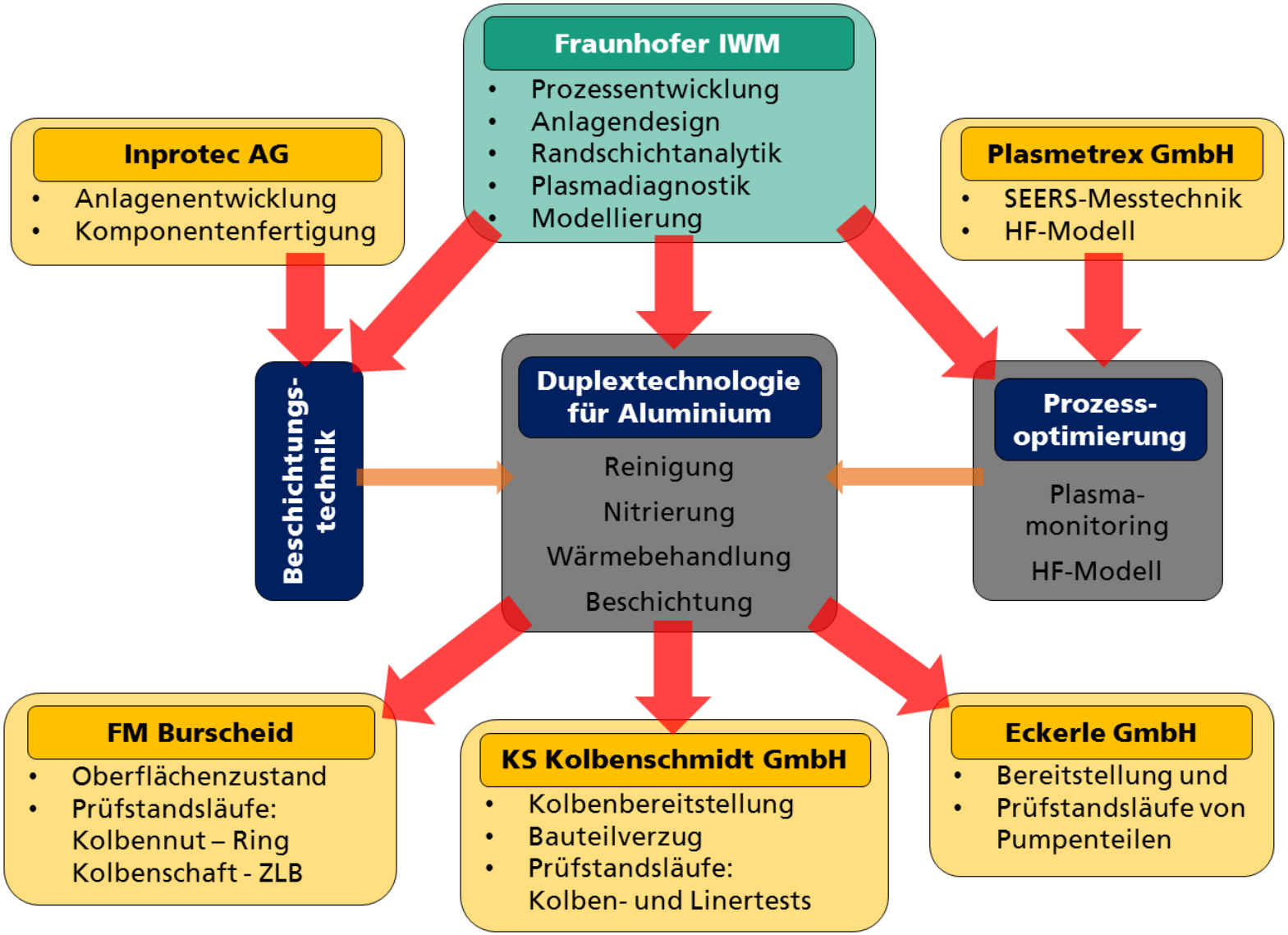
Projektmotivation

Allgemeiner Trend in der Motorentechnik

Vertraulich

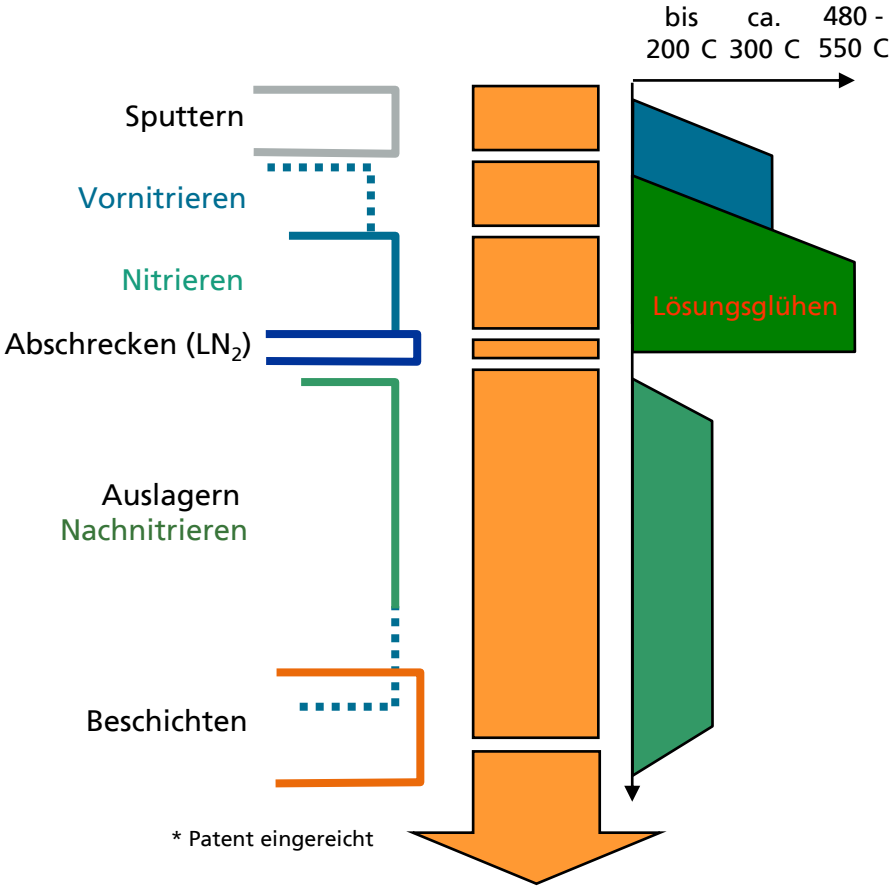
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Verbundstruktur und Aufgaben
„Ressourceneffiziente Oberflächentechnik“



Duplextechnologie für Aluminiumbauteile

Ursprünglicher Lösungsansatz



Entfernen der Oxidschicht

- Al2O3 Barriere für Stickstoffdiffusion
- Aufrauhung durch Sputtern

Nitrieren

- Hohe Diffusionsraten nur bei hohen Temperaturen

Wärmebehandlung

- Integration in den Nitriervorgang
- Probleme:
  Hohe Temperaturen, Soliduslinie, Abschrecken

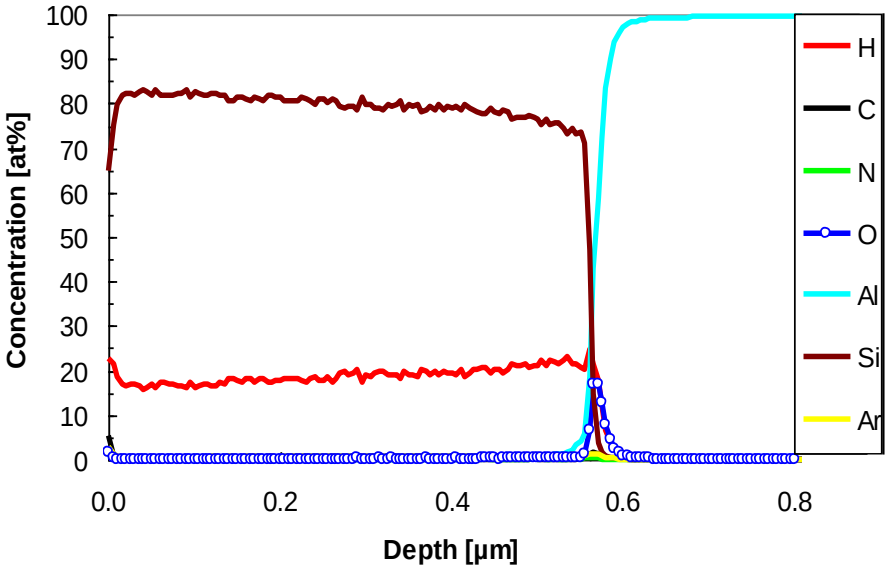
Beschichten

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

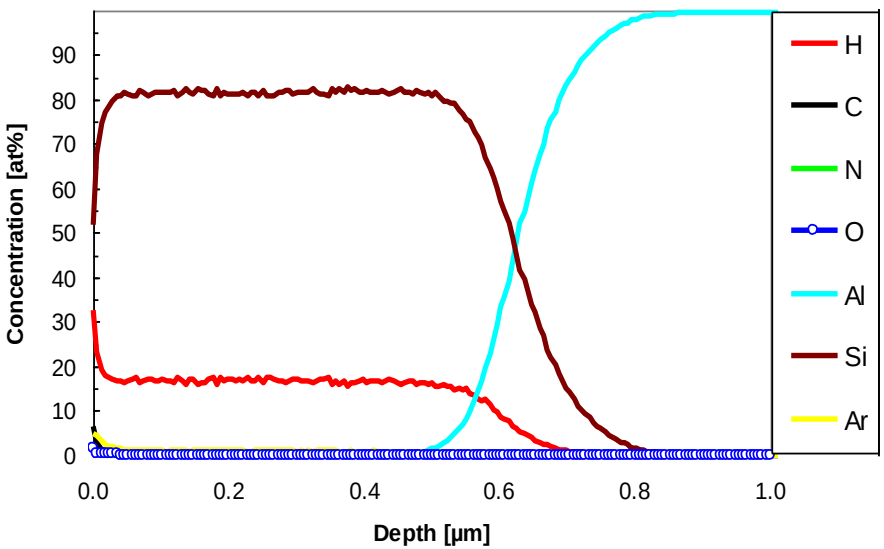
Entfernung der Oxidschicht mittels Ar-H-Plasma
Nachweis mittels SIMS

Aluminiumprobe mit einer SiH_4-Schicht als Reoxidationsschutz

vor Sputterschritt



nach Sputterschitt

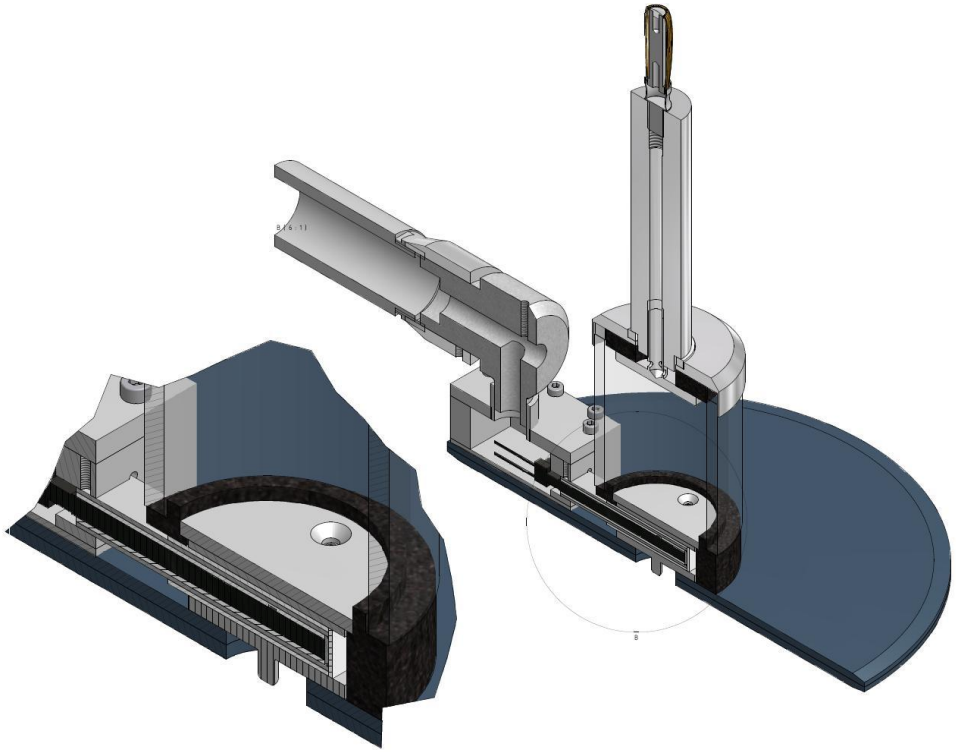


© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer KIT Karlsruher Institut für Technologie

MIKROTRIBOLOGIE CENTRUM µTC

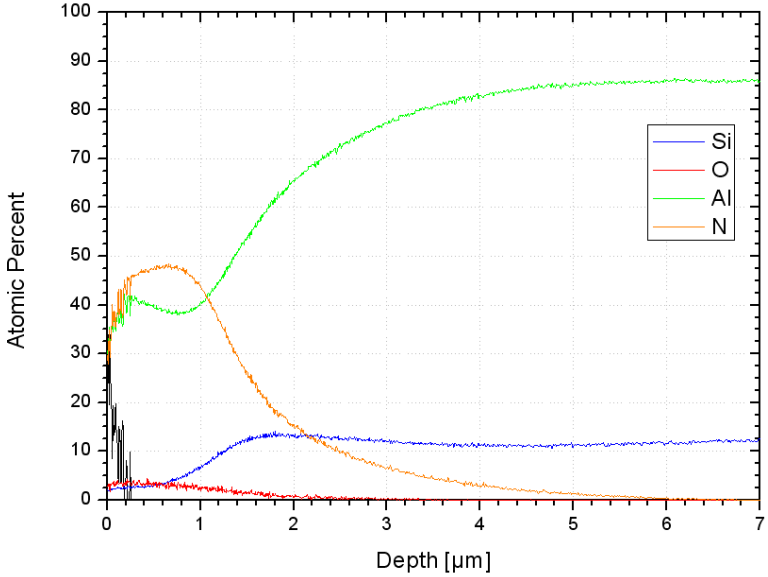
Aluminiumnitrierung
Hochtemperatur-Hochdruck-HF-PECVD-Technik



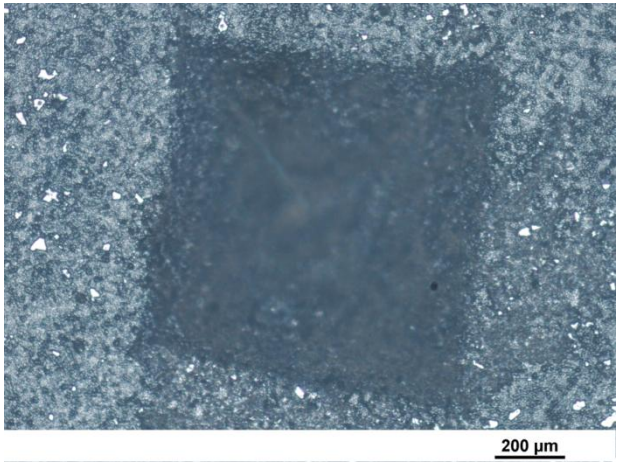
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Aluminiumnitrierung
Hochtemperatur-Hochdruck-HF-PECVD-Technik

- GDS-Analyse der AlN-Schicht

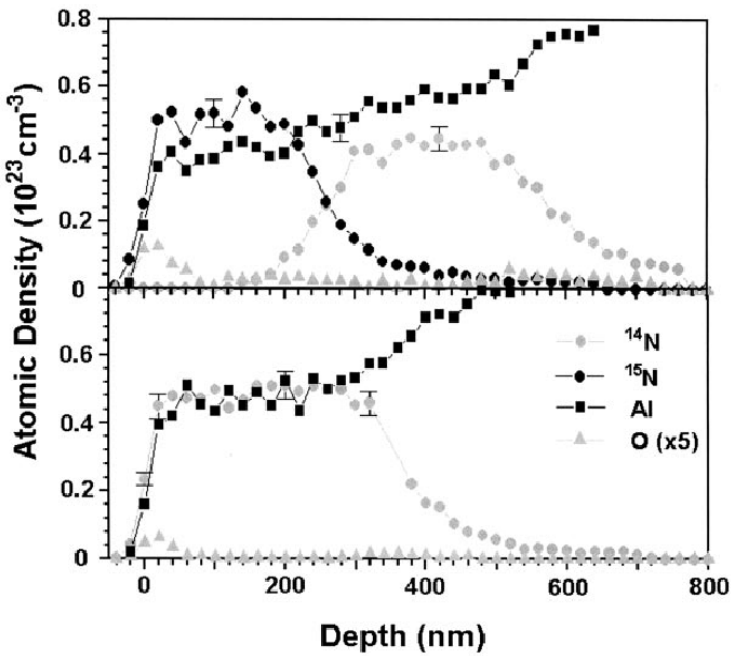


- DLC-Haftungstest auf AlN-Schicht
  Vickers Eindurck
  ➔ keinerlei Rissbildung



© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Diffusionsprozesse beim Nitrieren
Theoretische Betrachtung

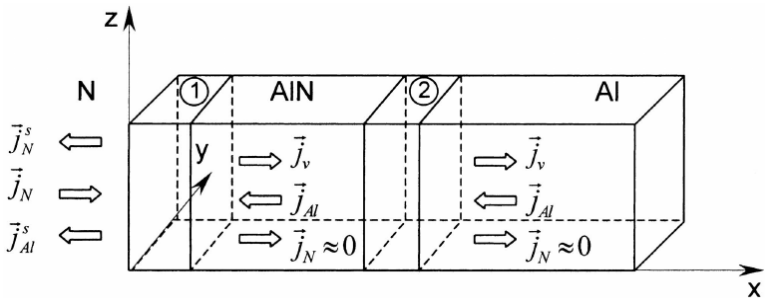


Telbizova et al, Appl. Phys. Lett. 76-11 (2000) 1404-1406

- Initiale AlN-Schicht bildet sich
- Für weiteres Schichtwachstum ist Al-Diffusion durch AlN-Schicht erforderlich

Beschränkungen beim Nitrieren :

- Diffusion des Al durch AlN-Schicht
- Sputterprozesse an der Oberfläche



$$\frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}t} = \frac{j_{\mathrm{Al}}}{\rho_{\mathrm{AlN}}} - v_S$$

Diffusionsanteil Sputteranteil

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Diffusionsprozesse beim Nitrieren
Theoretische Betrachtung

Zwei Bereiche können unterschieden werden:

- Dünne AlN-Schicht → Sputtern gegenüber Diffusion vernachlässigbar

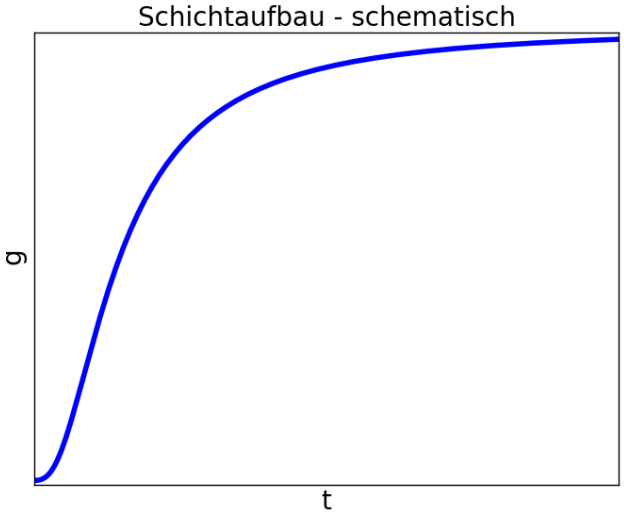
  Schichtwachstum mit: $g(t) \propto \sqrt{t}$

- Sputtern und Diffusion halten sich die Waage → Finale Schichtdicke erreicht (temperaturabhängig)

Vergleich mit erreichter Nitriertiefe:

- gemessene Schichtdicke nach 4 Stunden: 1,5µm
- Annahme: Sputtern spielt keine Rolle Schichtdicke in Abhängigkeit von t:

➔ Zeitaufwand für 100µm: ca. 18000h = 2Jahre !



© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Duplextechnologie für Aluminiumbauteile
Spezielles PECVD-Verfahren zur Kavitäten-Beschichtung

Ergebnisse:

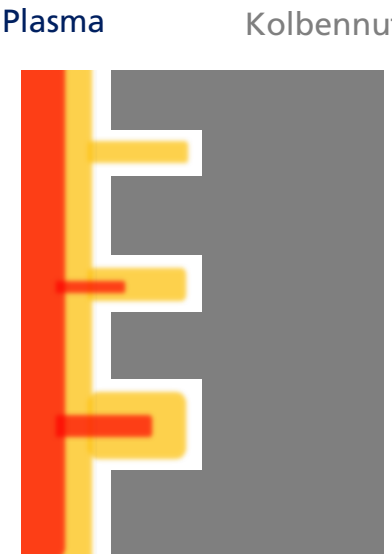
- Extrem gute Haftwirkung durch AlN
- Max. Pressung in Kolbennut von 80 MPa

➔ Schichtsystem:
5-10µm DLC auf AlN-Interface

➔ Entwicklung eines speziellen kontinuierlichem PECVD-Verfahrens zur Beschichtung von sehr schmalen Kavitäten

➔ Stabilisierung des Prozesses über plasmadiagnostische Verfahren

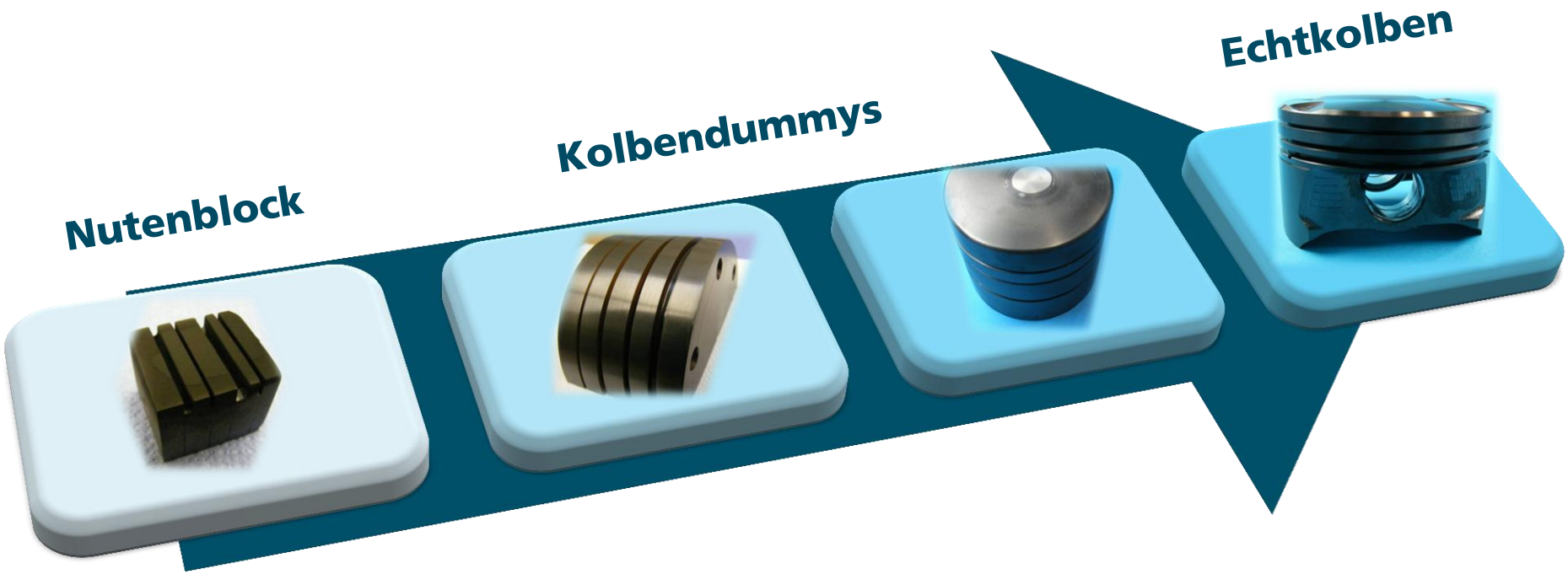
Schematische Darstellung:
Eindringen eines Plasmas in Kavitäten ist plasmaphysikalisch problematisch



© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

DLC-Echtkolben-Beschichtung

Spezielles PECVD-Verfahren zur Kavitäten-Beschichtung



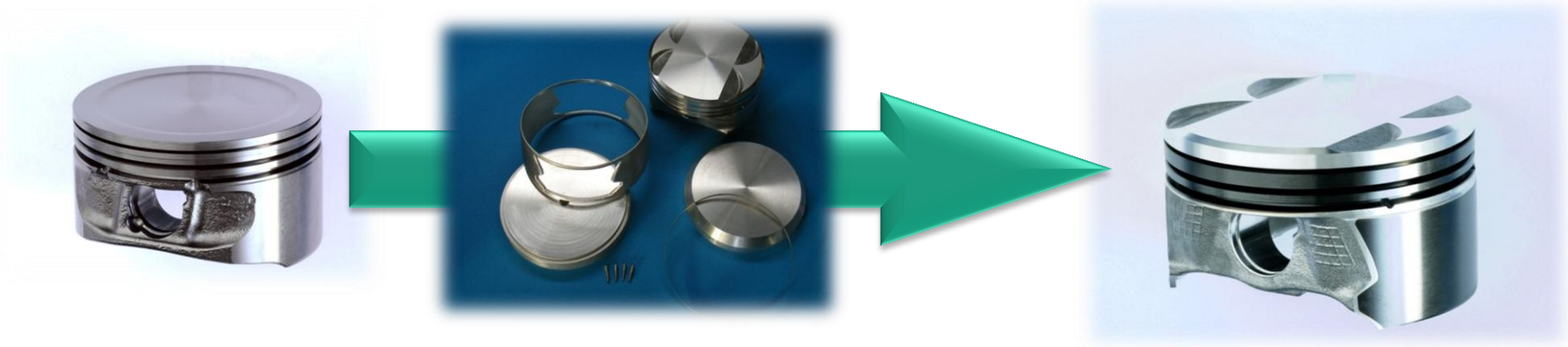
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

DLC-Echtkolben-Beschichtung

Spezielles PECVD-Verfahren zur Kavitäten-Beschichtung

- Prozesssicherung
- Reduktion des Verzugs
- Abnahme der Schichtdicke in der Nutflanke beobachtbar

	Klassisches DLC	Neuentwickeltes Verfahren
Härte	1000-2500 HV	1000 HV
E-Modul	70-180 GPa	70 GPa



© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Geplante Prüfstandsläufe
Zeitraum 12/11 – 02/12

KSPG Automotive

- Floating-Liner-Test am optimierten Kolbendesign

Vertraulich

FEDERAL MOGUL

Modelltests:

- Kolbennut / Kolbenringflanke
- Kolbenhemd / Zylinderlaufbahn

ECKERLE HYDRAULIC DIVISION

Modelltests:

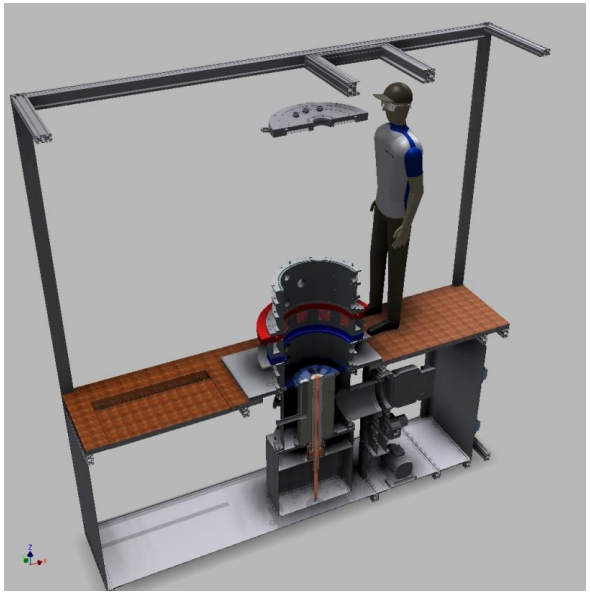
- Pumpengehäuse und deren Axialscheiben

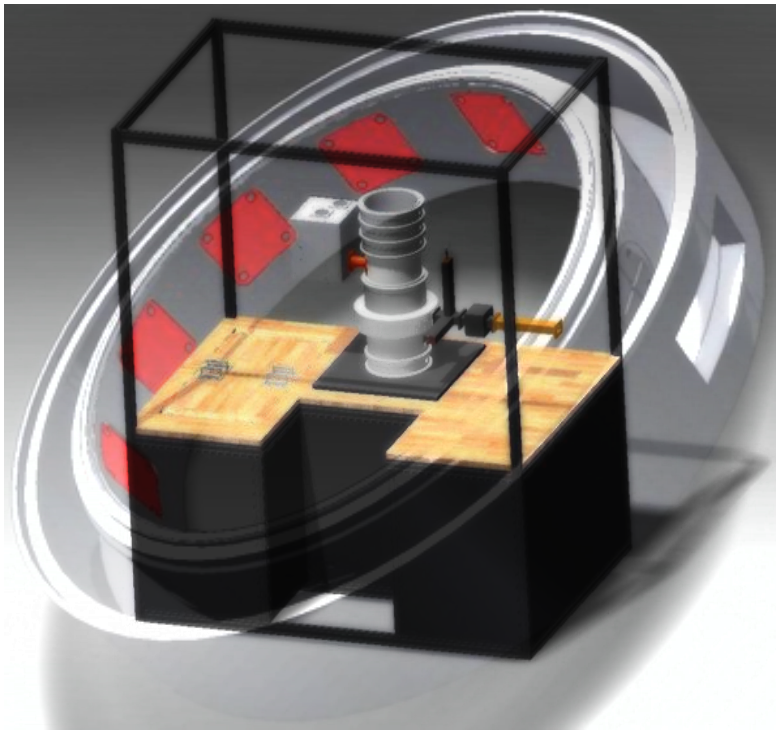
Vertraulich

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Mehrquellen-Hochtemperatur-PECVD-Anlage
Prozesszusammenführung

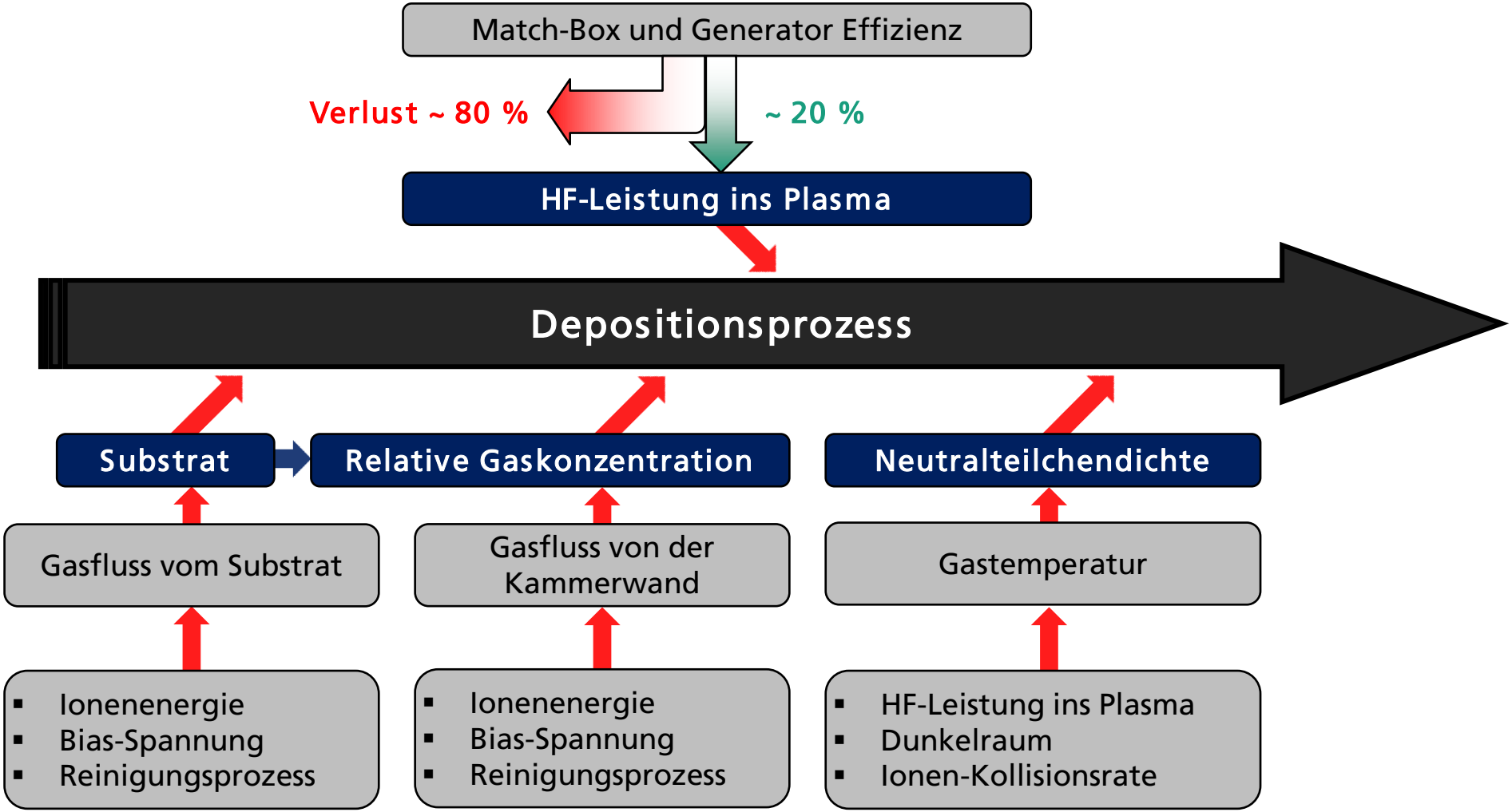
- Duplexschichtsysteme ohne Prozessunterbrechung
- Zusammenführung der Einzelprozesse





© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Komplexität der PECVD-Technik



© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

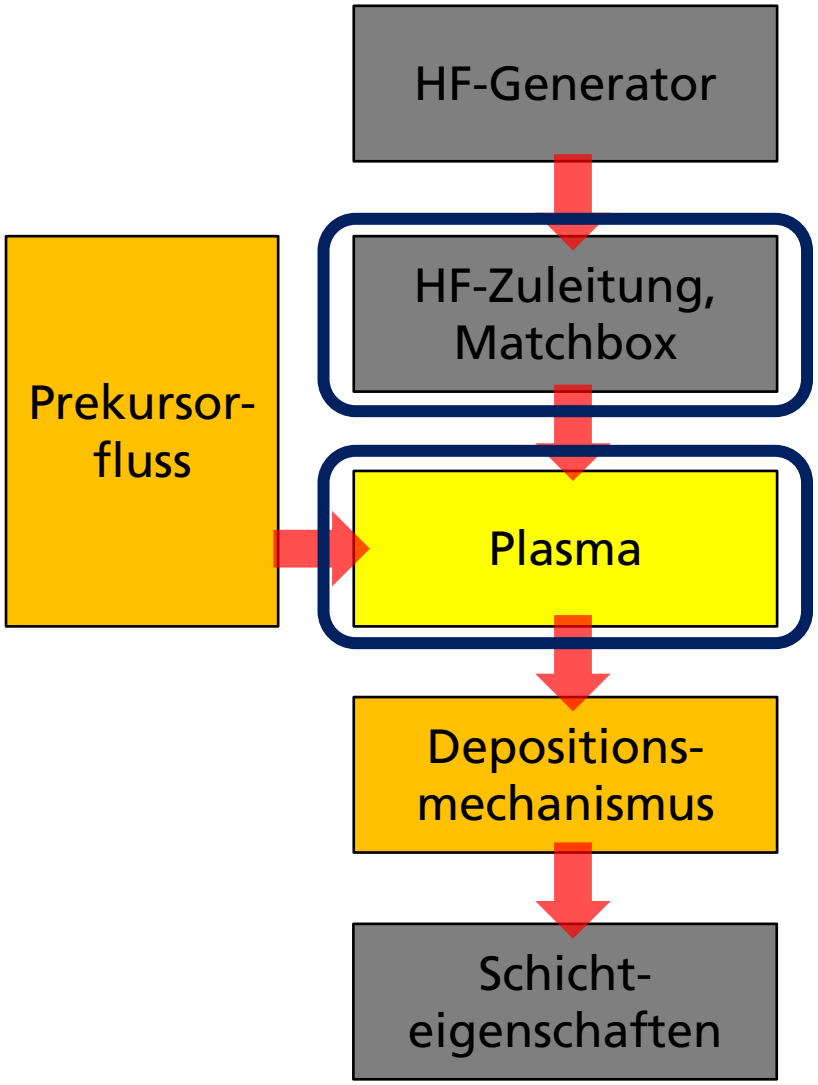
Effizientere Beschichtungstechnik
Fingerprinting

Lösung: **Fingerprinting**

- Identifikation und Überwachung der prozessrelevanten Plasmaparametern

Vorteil:

- Erhöhte Reproduzierbarkeit
- Weniger Ausschuss
- Mögliches „Entgegensteuern“ bei Kenntnis der Abhängigkeiten



© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Effizientere Beschichtungstechnik
Plasmamonitoring

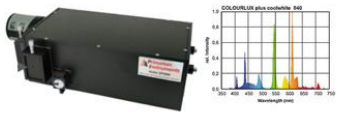
Klassisches Prozessmonitoring

- Überwachung einzelner Tool- oder Plasmagrößen

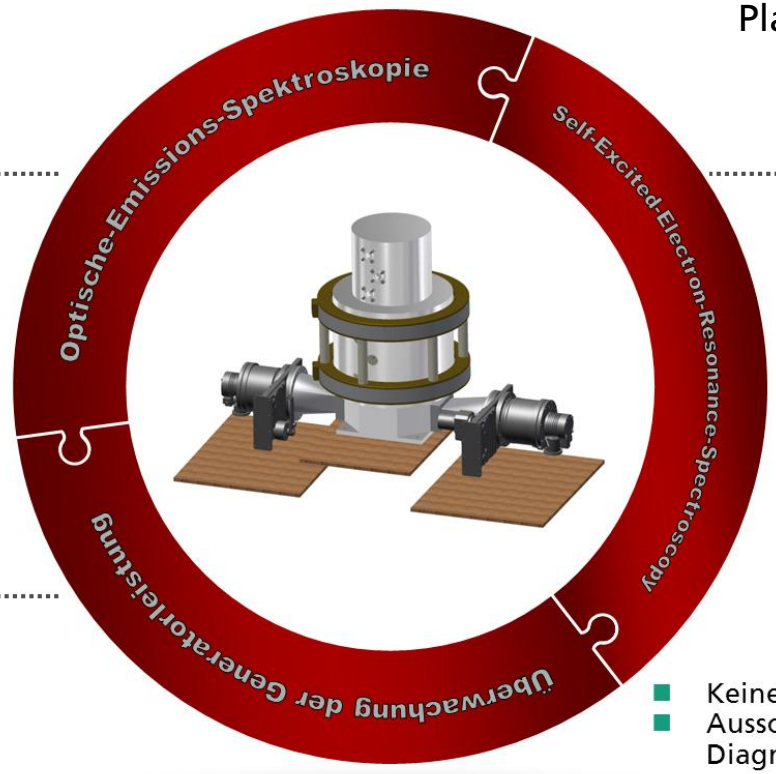
Projektziel

- Erfassung prozessrelevanter Plasmaparametern

PI SP 2758



Z'Scan



Hercules PMX

- Keine lokale Auflösung
- Ausschließlich nicht-invasive Diagnostikmethoden

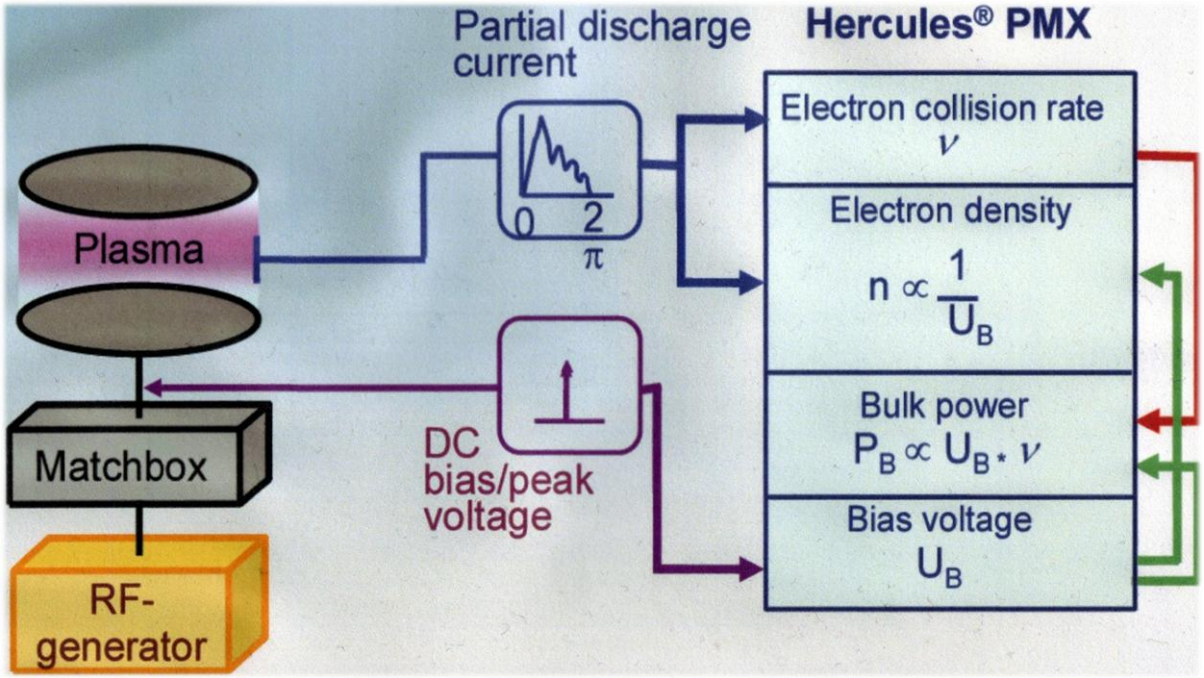
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer KIT Karlsruher Institut für Technologie

MIKROTRIBOLOGIE CENTRUM µTC

Effizientere Beschichtungstechnik
Self-Excited-Electron-Resonance-Spectroscopy

➔ Elektronendichte und elastische Kollisionsrate



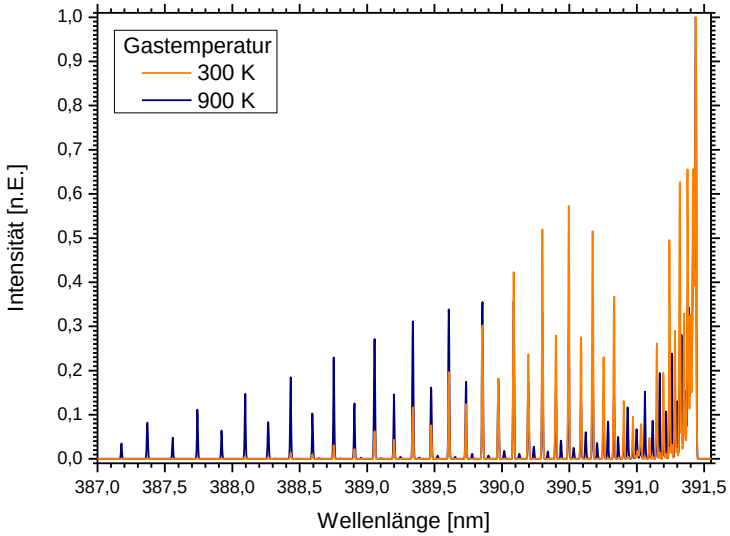
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Quelle: Plasmetrex, Plasma School

Effizientere Beschichtungstechnik
Optische Emissionsspektroskopie

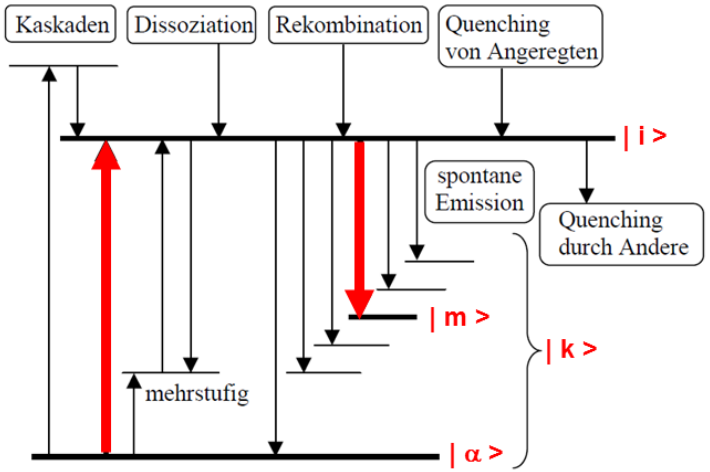
➔ Gastemperatur

- Simulation der Emissionsprofile zweiatomiger Moleküle



➔ Elektronentemperatur und absolute Teilchendichten

- Corona Modell



- Aktinometrie (Line-Ratio)

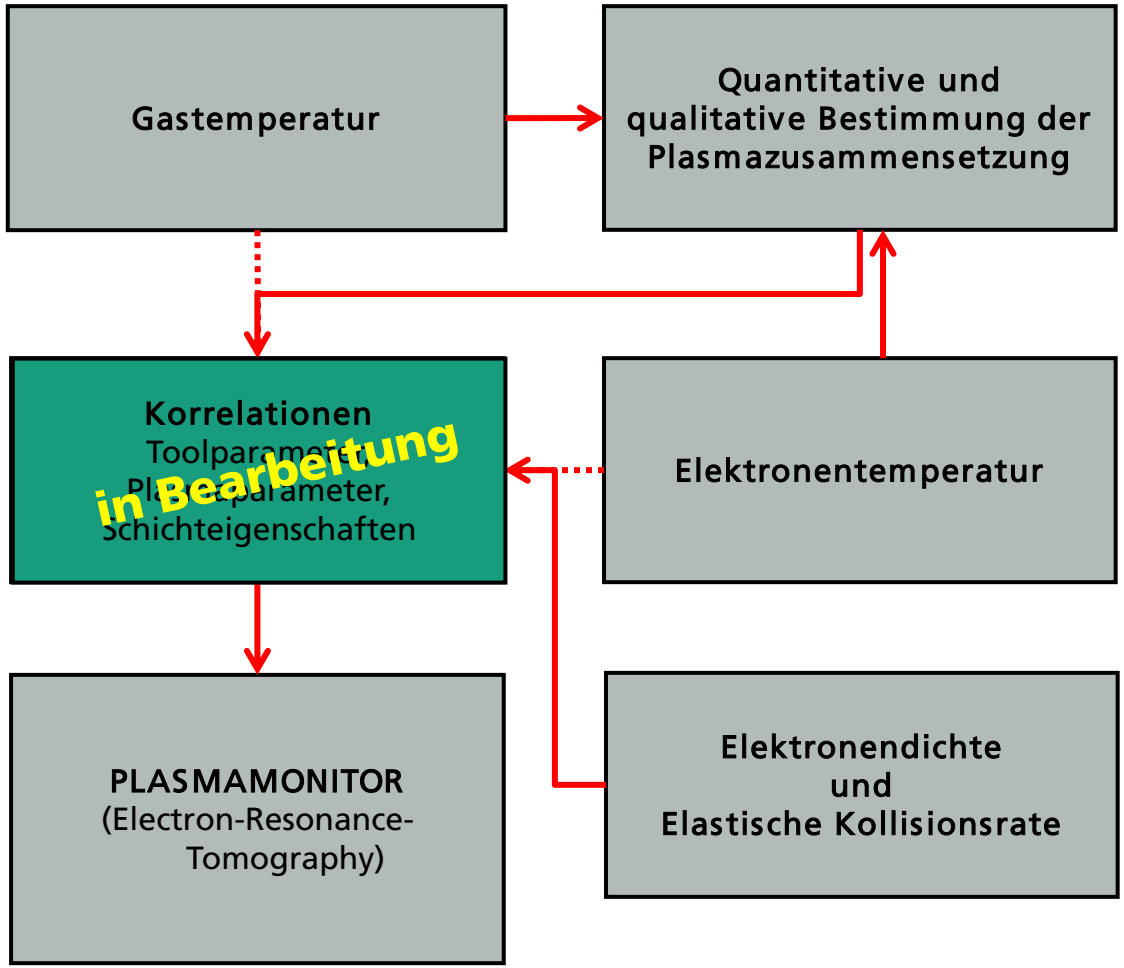
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer KIT Karlsruher Institut für Technologie
MIKROTRIBOLOGIE CENTRUM µTC

Effizientere Beschichtungstechnik
Plasmamonitoring

Projektziel:

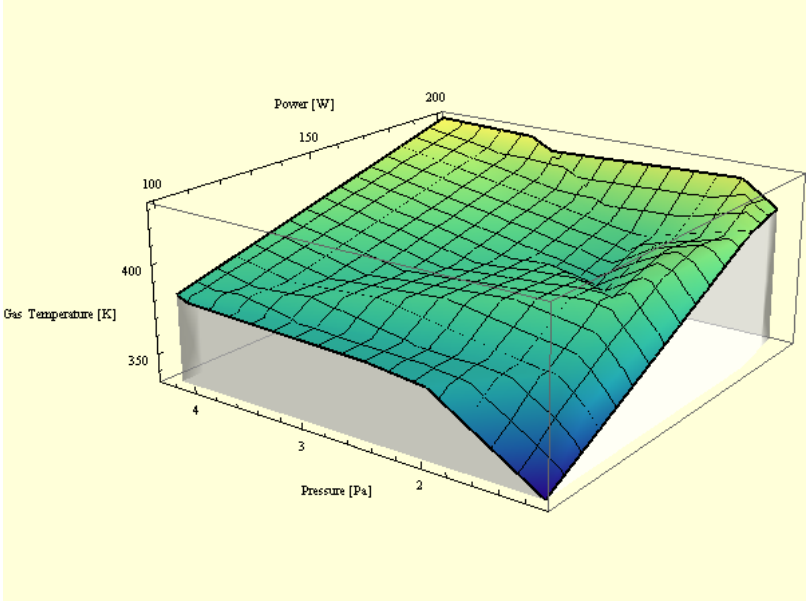
- Erfassung von Plasmaparametern
- Identifikation prozessrelevanten Schlüsselgrößen
- Entwicklung eines Plasmamonitors

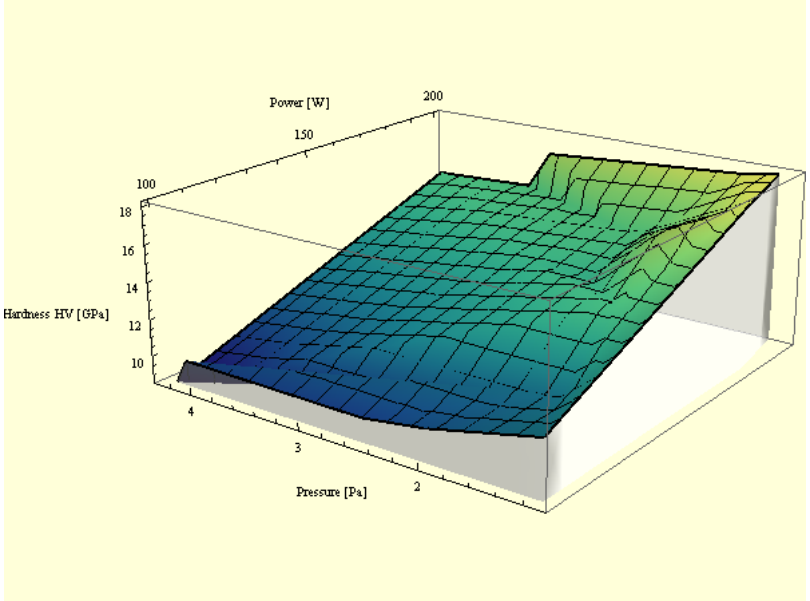


© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Effizientere Beschichtungstechnik
Multivariate Diagramme

- Zur Identifikation der Prozessschlüsselgrößen und deren Abhängigkeiten





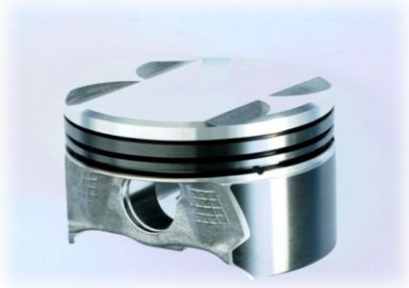
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

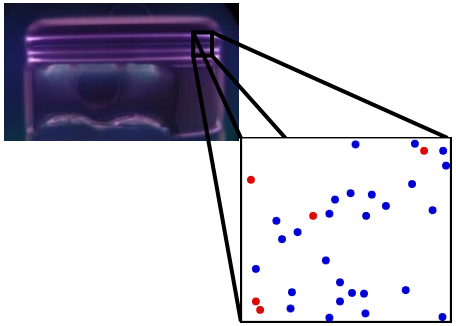
Fraunhofer KIT Karlsruher Institut für Technologie
MIKROTRIBOLOGIE CENTRUM µTC

Zusammenfassung und Ausblick
Duplextechnologie für Aluminium

Prozessentwicklung:

- Entwicklung eines speziellen, kontinuierlichen Duplex-PECVD-Verfahrens zur Kavitäten-Beschichtung von Aluminiumbauteilen
- Stabilisierung des Prozesses über plasmadiagnostische Verfahren
- Prüfstandtests ab Dezember
- Prozesszusammenführung mittels neuer Mehrquellen-Hochtemperatur-PECVD-Anlage





Prozessüberwachung:

- Aufsetzen HF-Equipment-Model
- Erfassung prozessrelevanter Plasmaparameter

➔ Identifikation der Prozessschlüsselgrößen und deren Abhängigkeiten

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM