

# Optimierung des LPBF-Prozesses zur Fertigung von Brennkammersegmenten

Angelika Jedynak<sup>1</sup>, Mark Eisentraut<sup>1</sup>, Heiko Witte<sup>1</sup>, Marko Bärtl<sup>2</sup>,  
Miklos Gerendas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Hybrid Electric Systems Cottbus GmbH

<sup>2</sup>Rolls-Royce in Deutschland



Additive Manufacturing Rapidtech 2025

Erfurt, 13 – 15. Mai 2025

Durchgeführt durch:



Gefördert durch:

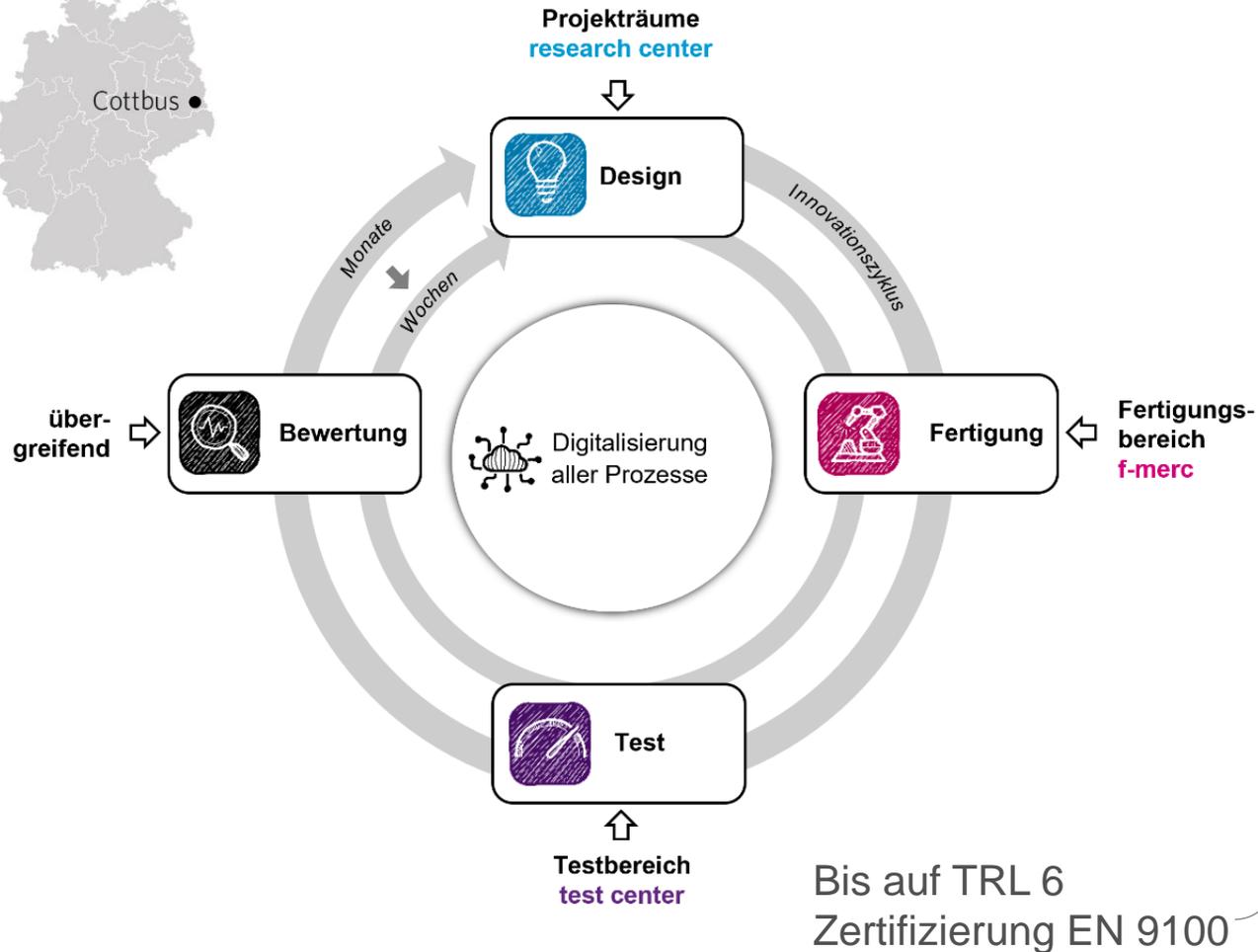


### Wer sind wir?

### Use Case

### Prozessoptimierung

### Brennkammersegmente



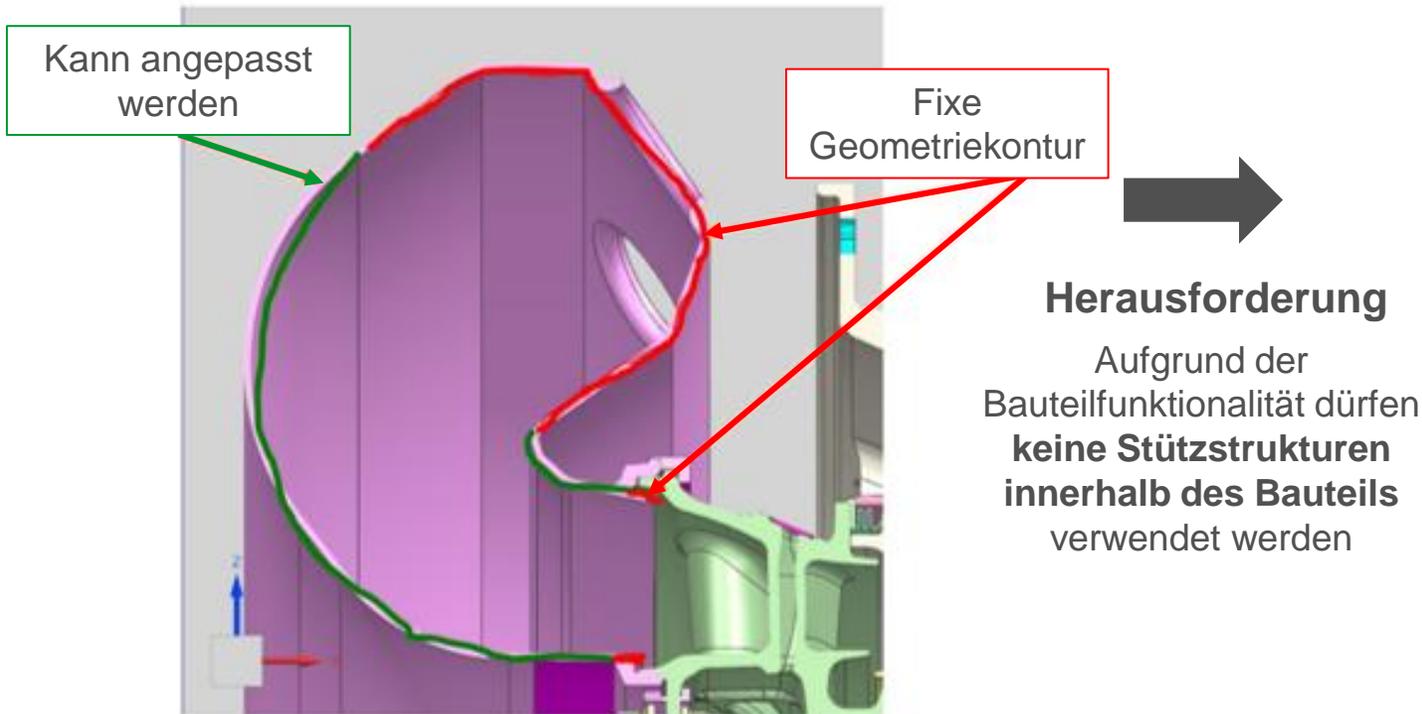
### Spezialisierung auf Forschung und Entwicklung von hybrid-elektrischen und elektrischen Antriebssystemen

Branchenübergreifend



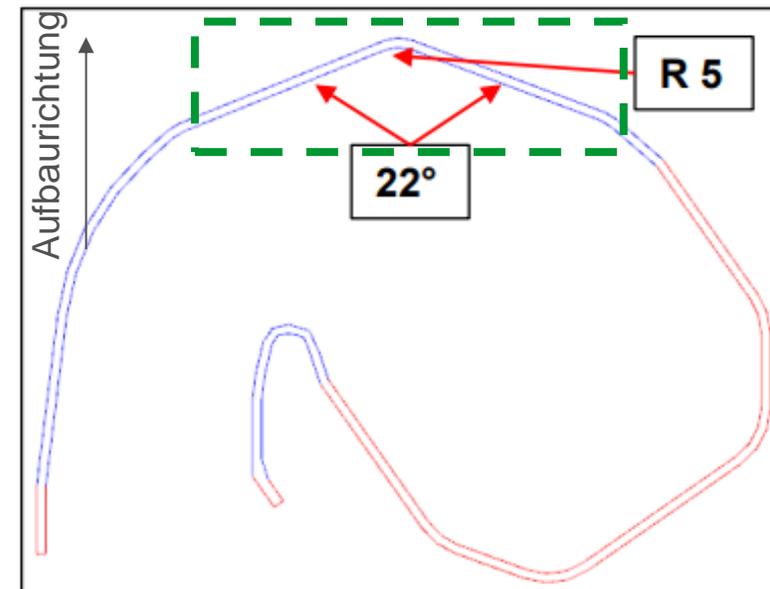
Forschungsfelder

- Hybrid-Elektrische Systemintegration
  - Elektrische Systeme und Komponenten
  - Gasturbinen und Brennstoffzellen mit H2 bzw. SAF
- Digitale Technologien
- Thermal-management
- Fertigungstechnologien



Konturlinien der Brennkammer

Neigungswinkel von 22° ist kritisch für den Druckprozess ohne Stützstrukturen



Orientierung der Brennkammer im Druckprozess

► Ableitung eines Ansatzes zum Drucken von Brennkammerwänden mit Neigung unter 22° ohne Stützstrukturen

# ANSATZ FÜR DRUCKEN OHNE STÜTZSTRUKTUR

Erhöhung des Wärmeeintrags im Downskin-Bereich



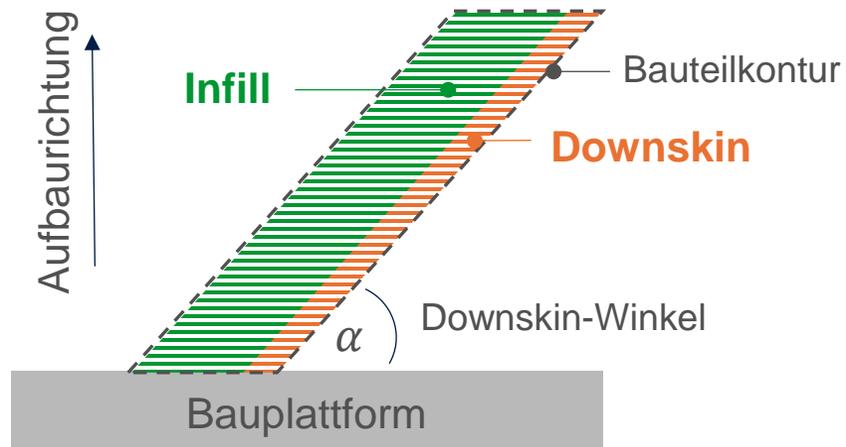
Wer sind wir?

Use Case

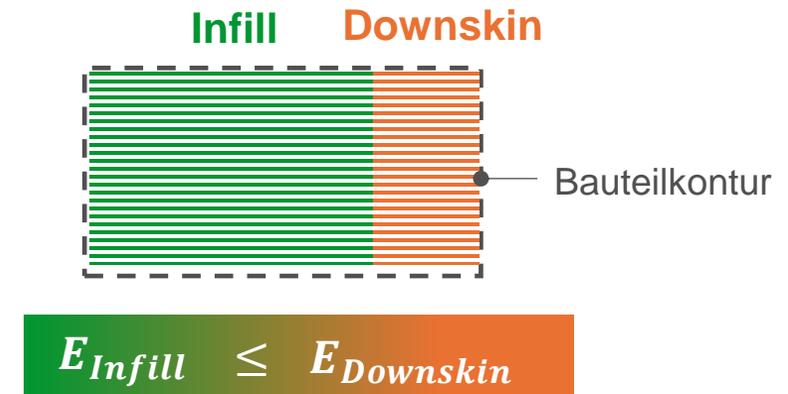
Prozessoptimierung

Brennkammersegmente

**Ziel:** Erzielung einer stärkeren Schweißzone, die den Wiederbeschichtungskräften standhalten kann



Schichtweiser Bauteilaufbau

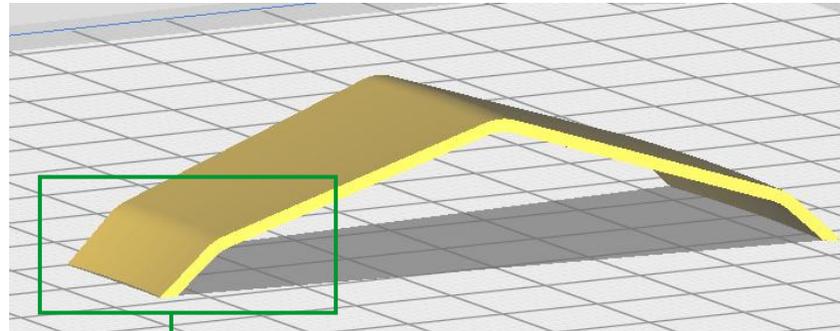


Berechnung des Wärmeeintrags E

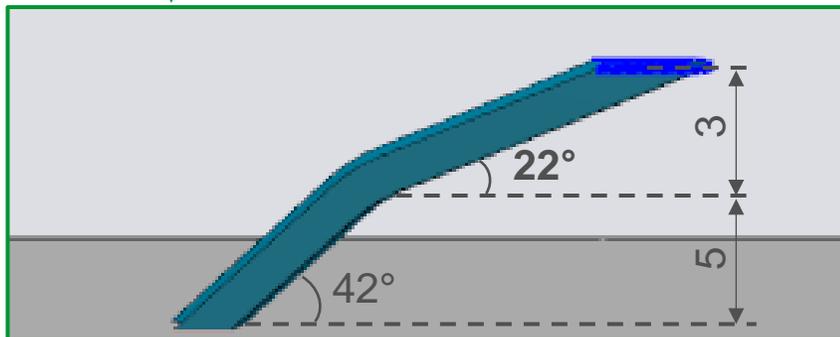
$$E = \frac{P}{vd * Hd * Lt}$$

- $Lt$  – Schichtdicke
- $P$  – Laserleistung
- $Hd$  – Hatchdistance
- $vd$  – Scangeswindigkeit

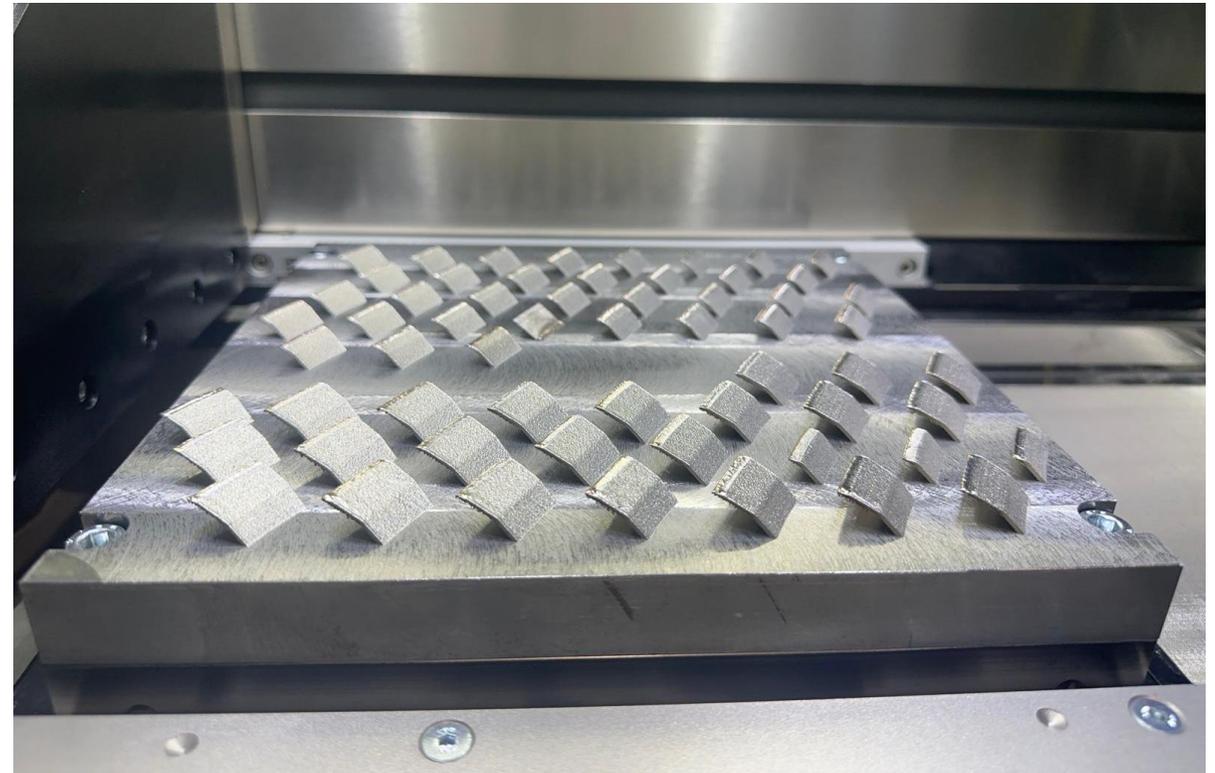
► **Parameterstudie zur Bestimmung optimaler Prozessparameter für das Drucken ohne Stützstrukturen**



Brennkammersegment



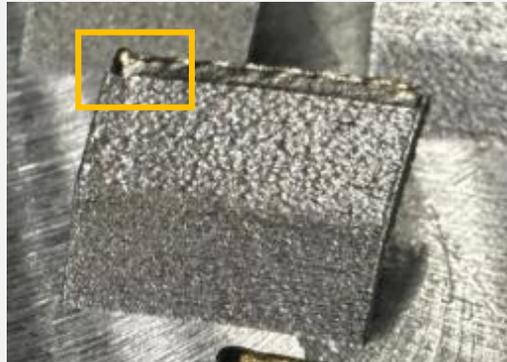
Geometrie der Teilstücke



Gedruckte Teilstücke auf der Bauplattform

### Prozessbedingt

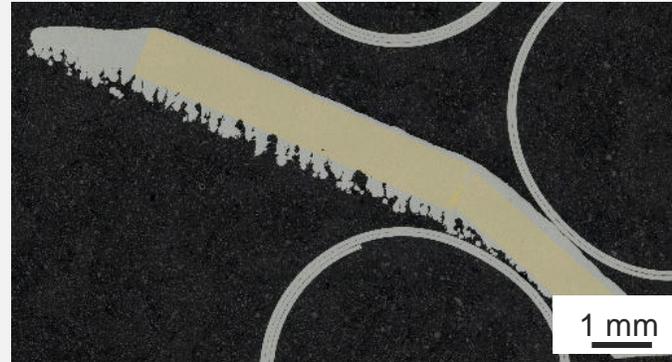
**lok. Materialanhäufung**  
Geringer als **Schichtdicke**



- Prozessabbruch durch Kollision mit dem Beschichter
- Durch **inhomogene Wärmeverteilung** verursacht

### Bauteilanforderungen

**Porosität**  
Geringer als **0,1 %**



- Entscheidend für die Bauteilfunktionalität
- **Typischer Prozessfehler**, bspw. durch den Keyhole-Effekt

**Dicke irregulärer Oberfläche**  
im Downskin → **Minimal**



- Entscheidend für die Bauteilfunktionalität
- Durch **Anbindung von teilweise geschmolzenen Pulverpartikeln**

### I Parameterstudie:

- Energiedichte im Downskin durch Variation der Laserleistung, Scangeswindigkeit und Hatchdistance
- Scanstrategie, Laserleistungsreduktion, ...

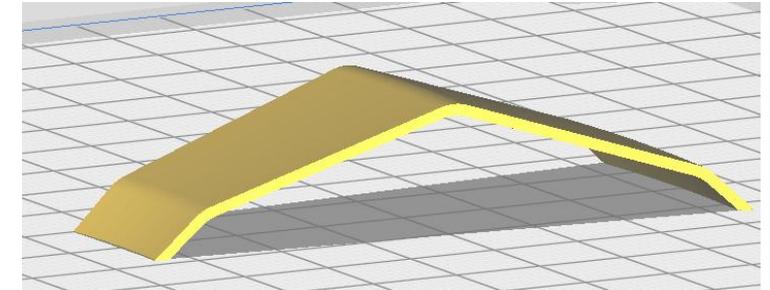
### II Parameterstudie:

u.a. zur Verbesserung der Wärmeverteilung:

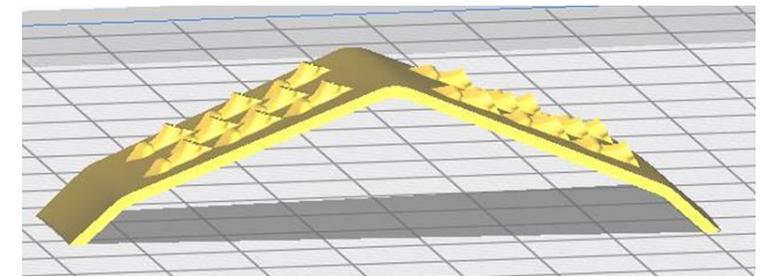
- Weitere Scanstrategieen, ....

Festlegung der Parameterkombinationen mithilfe der statistischen Methoden

**Direkte Anwendung**  
der anforderungsgerechten  
Parameter



Brennkammersegment (ohne Features)



Brennkammersegment mit Kühlschindeln

- ▶ **Verständnis der Zusammenhänge zwischen Parametern und Eigenschaften**
- ▶ **Ermittlung der anforderungsgerechten Parameter an den Teilstücken**

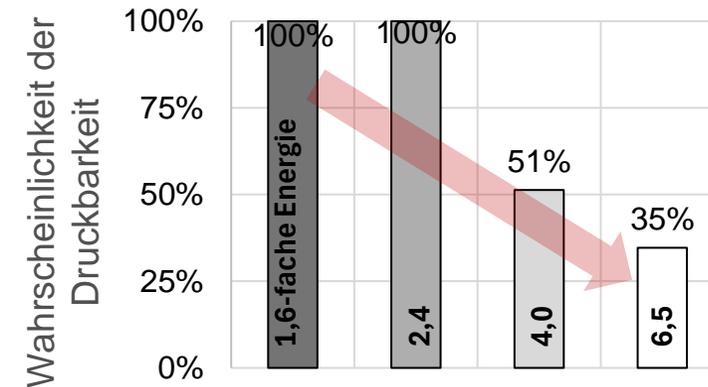
### Parameterbewertung in Hinblick auf die Druckbarkeit

- **Ca. 72 % Druckbarkeit** (63 von 88 gedruckt)
- Parameterbewertung mit dem *logistic regression model*\*:

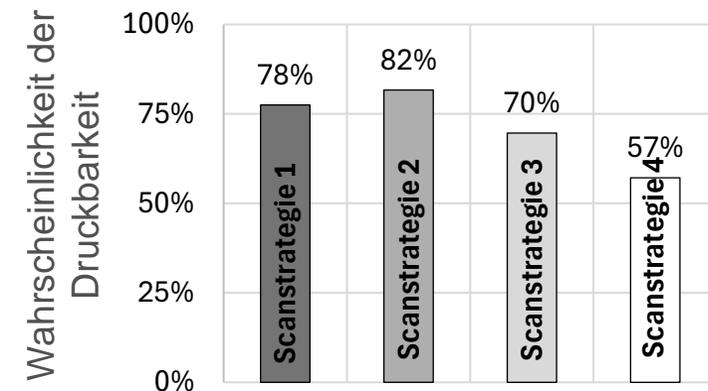
Parameter	Koeff. (β)	p-Wert	Interpretation
Intercept	2,00	0,001	Signifikant – Basiswert
<b>Energie-Verhältnis</b>	-1,78	< 0,001	<b>Sehr signifikanter starker negativer Einfluss</b>
Laserreduktion	+0,04	0,72	Kein signifikanter Einfluss
Wartezeit	-0,19	0,31	Kein signifikanter Einfluss
<b>Scanstrategie</b>	-0,67	0,014	<b>Signifikanter negativer Einfluss</b>

\*  $P(\text{druck} = 1) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$ , wobei  $z = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \dots$

### Einfluss des Energieverhältnisses



### Einfluss der Scanstrategie

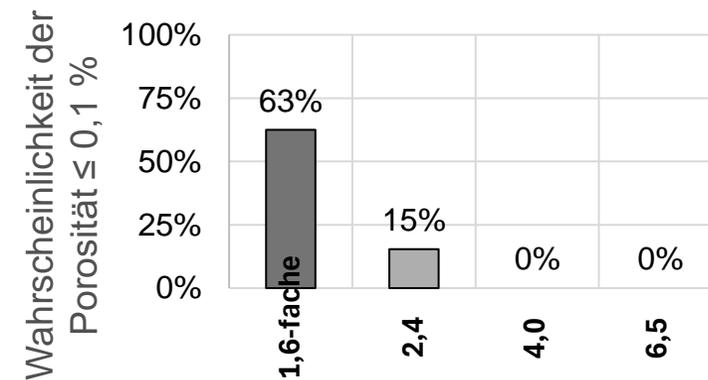


### Parameterbewertung in Hinblick auf die Porosität

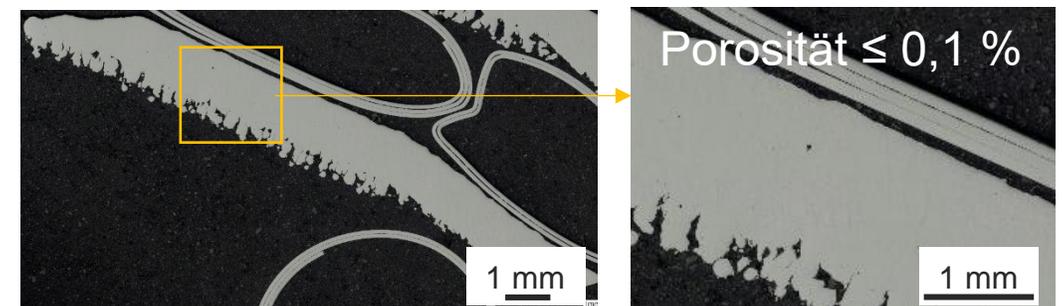
- Analyse von 36 Proben → **12 davon mit Porosität ≤ 0,1 %**
- Parameterbewertung mit dem *logistic regression model*:

Parameter	Koeff. ( $\beta$ )	p-Wert	Interpretation
Intercept	10,54	0,016	Signifikant – Basiswert
<b>Energie-Verhältnis</b>	-0,06	< 0,05	<b>Signifikanter negativer Einfluss</b>
Laserleistungsreduktion	+5,3	0,027	Nein wirkt sich signifikant positiv aus
Wartezeit	-2,89	0,057	Tendenziell negativ, aber knapp nicht signifikant
Scanstrategie	-3,35	0,111	Nicht signifikant

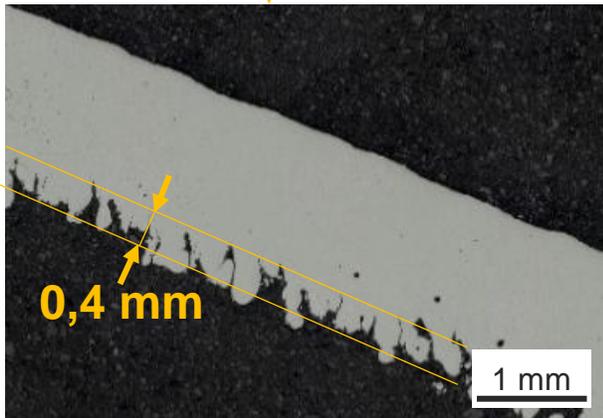
### Einfluss des Energieverhältnisses



### Energieverhältnis (1,6-fache Energie)

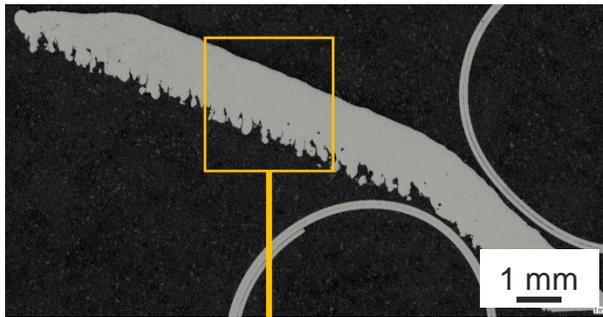


Erzielte Eigenschaften: lok. Materialanhäufung < **Schichtdicke** / Porosität < **0,1 %** / Dicke Downskin → **Min.**

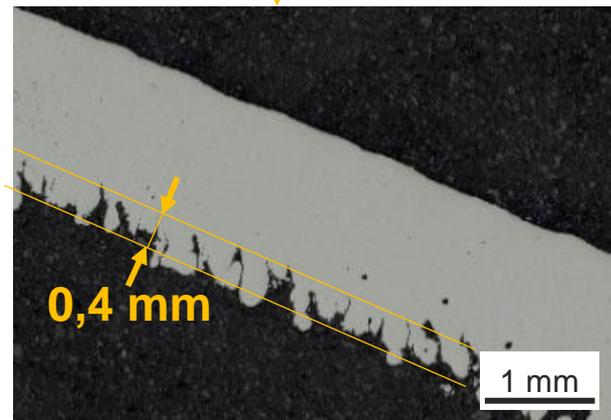


Parameterstudie I

**Erzielte Eigenschaften:** lok. Materialanhäufung < **Schichtdicke** / Porosität < **0,1 %** / Dicke Downskin → **Min.**

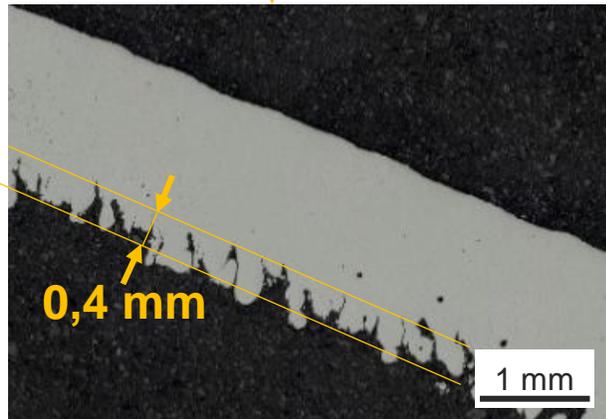
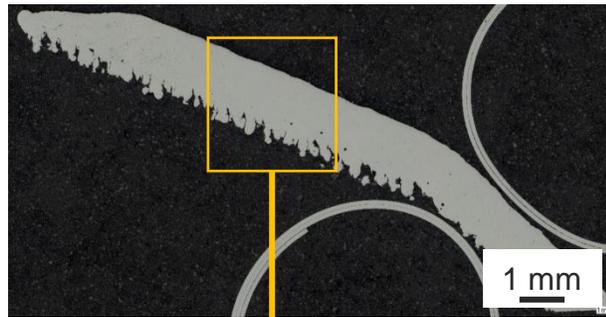


**Optimierungsbedarf: Dicke der irregulären Oberfläche im Downskin → MIN.**



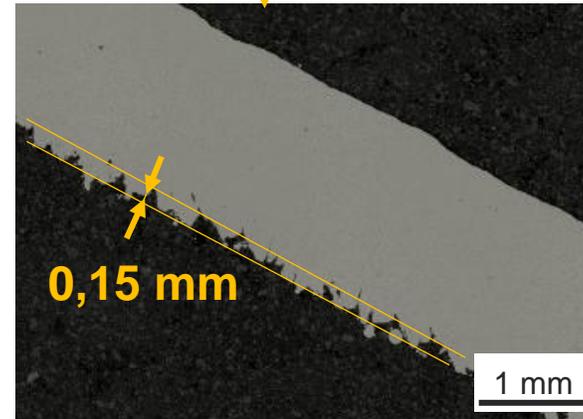
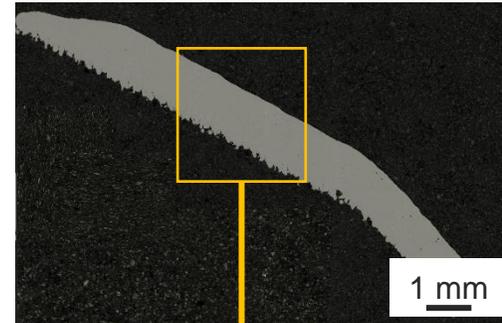
Parameterstudie I

Erzielte Eigenschaften: lok. Materialanhäufung < **Schichtdicke** / Porosität < **0,1 %** / Dicke Downskin → **Min.**

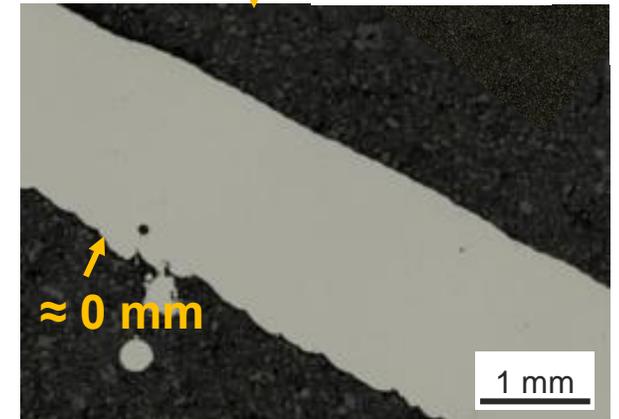
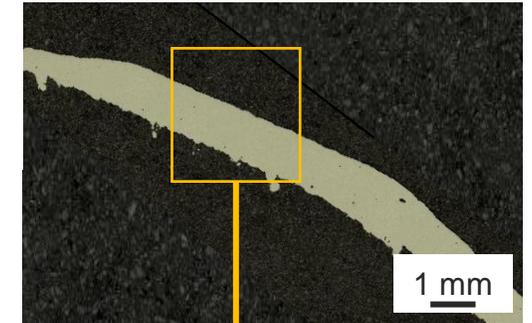


Parameterstudie I

Weitere  
Optimierung



Parameterstudie II



# AUSWERTUNG DER PARAMETERSTUDIE

## Identifikation und Bewertung der Parameterstudie

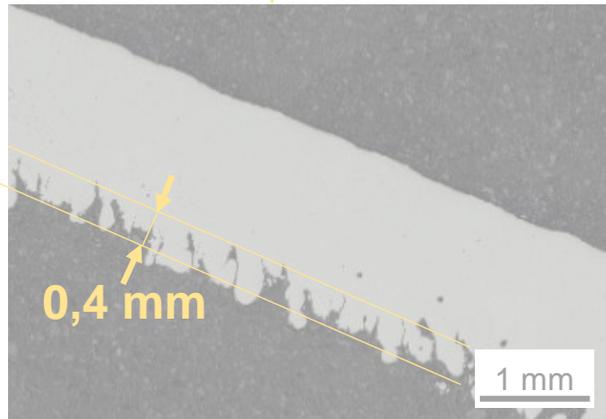
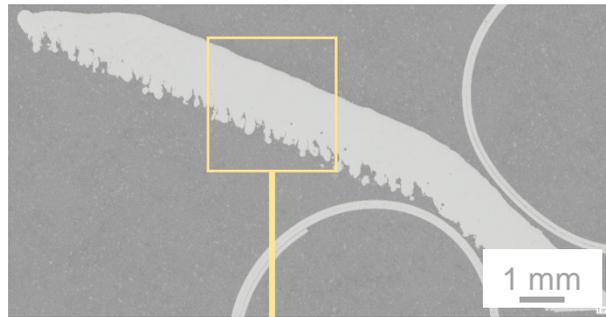


Wer sind wir?

Use Case

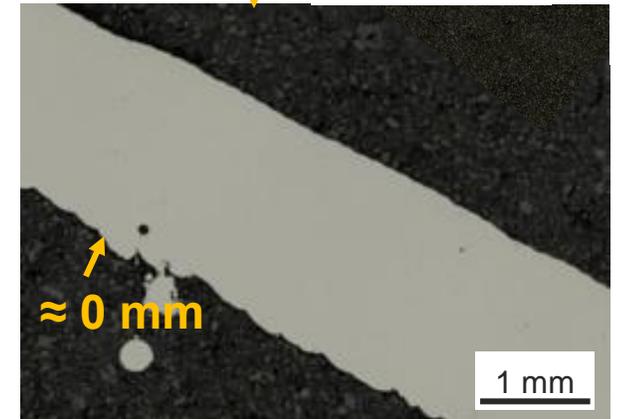
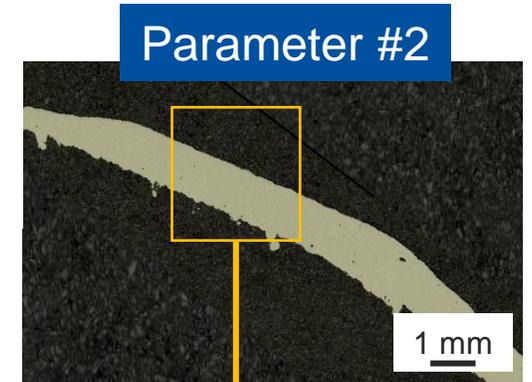
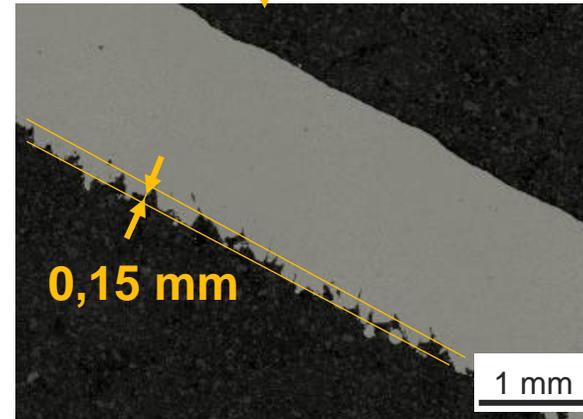
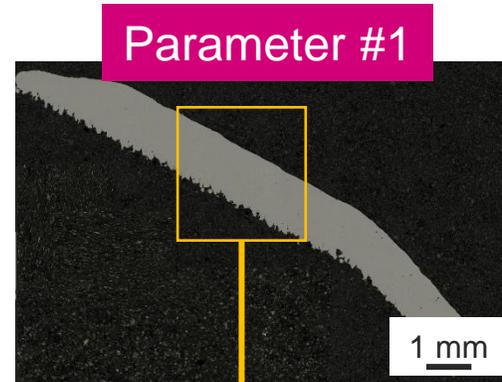
Prozessoptimierung

Brennkammersegmente



Parameterstudie I

Weitere Optimierung



Direkte Anwendung der Parameter für die Fertigung der Brennkammersegmente

# FERTIGUNG DER BRENNKAMMERSEGMENTE

Direkte Anwendung der ermittelten Parameter

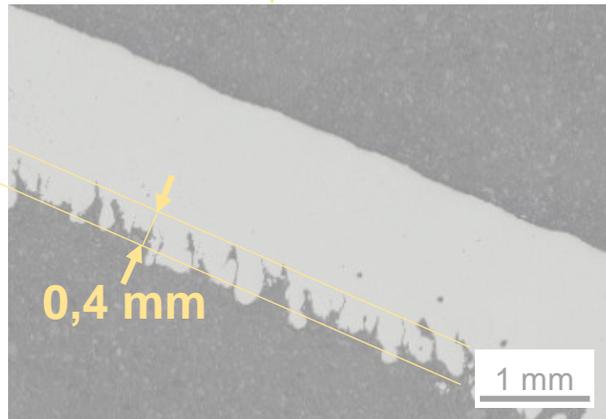
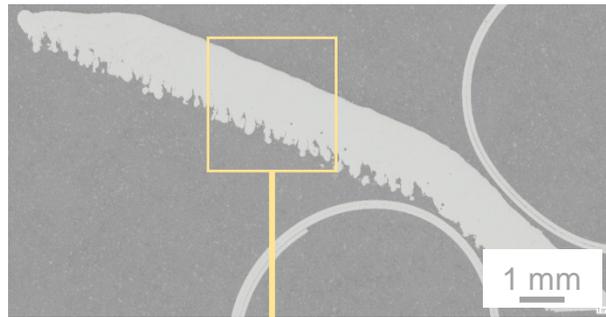


Wer sind wir?

Use Case

Prozessoptimierung

Brennkammersegmente



Parameterstudie I

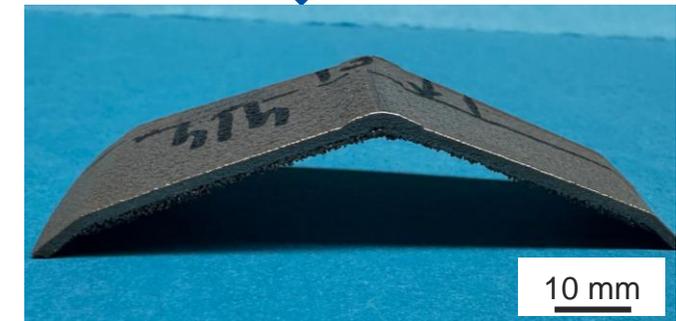
Weitere Optimierung



Parameter #1



Parameter #2



# FERTIGUNG DER BRENNKAMMERSEGMENTE

Bauteilinspektion - Sichtprüfung



Wer sind wir?

Use Case

Prozessoptimierung

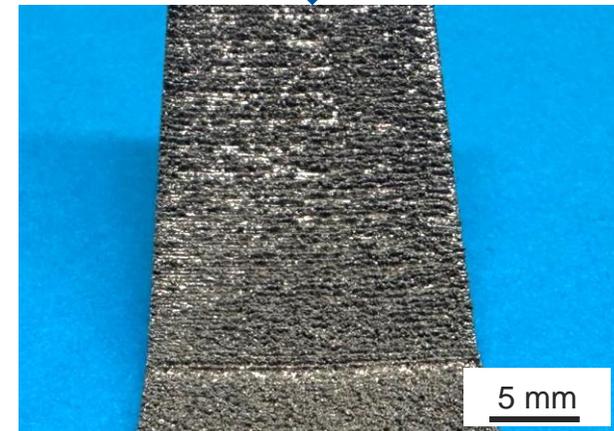
Brennkammersegmente

Parameter #1



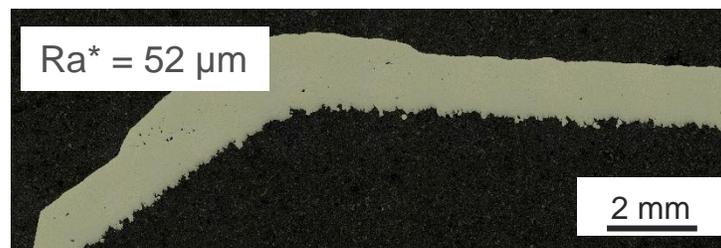
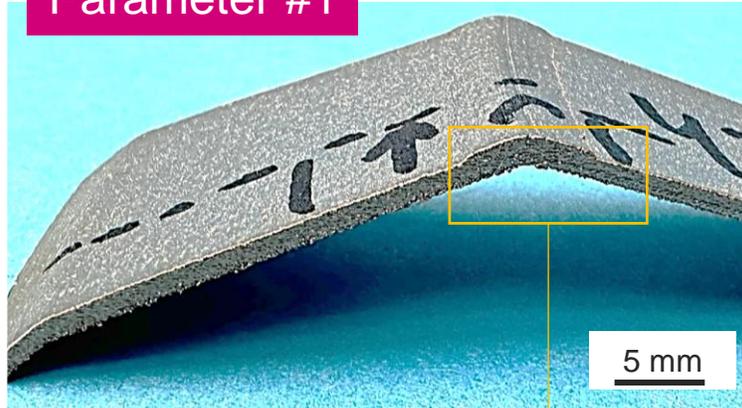
Aufnahme der Unterseite

Parameter #2



Aufnahme der Unterseite

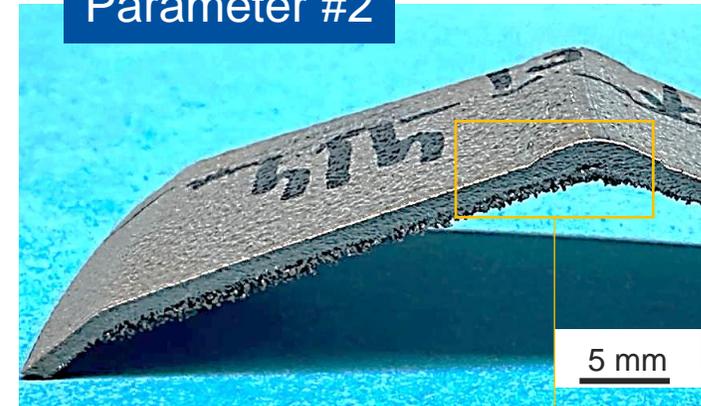
Parameter #1



Dicke der irregulären Oberfläche  
im Downskin: **0,1 mm**  
Porosität: < 0,1 %

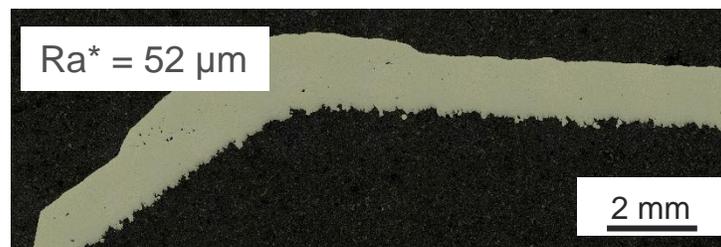
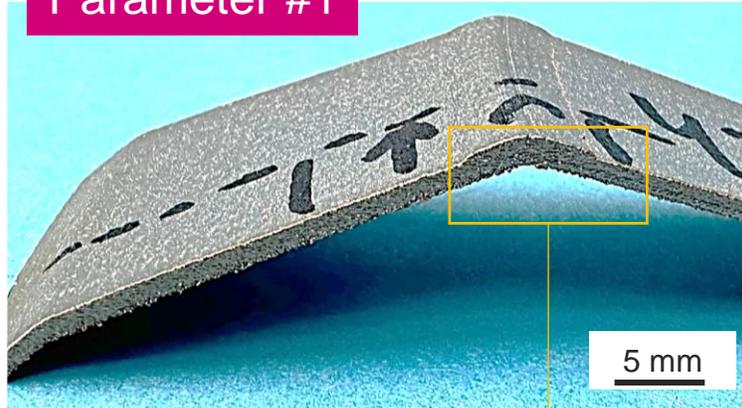
\* Mit Laserscanningmikroskop gemessen

Parameter #2



Dicke der irregulären Oberfläche  
im Downskin: **0,25 mm**  
Porosität: < 0,1 %

Parameter #1

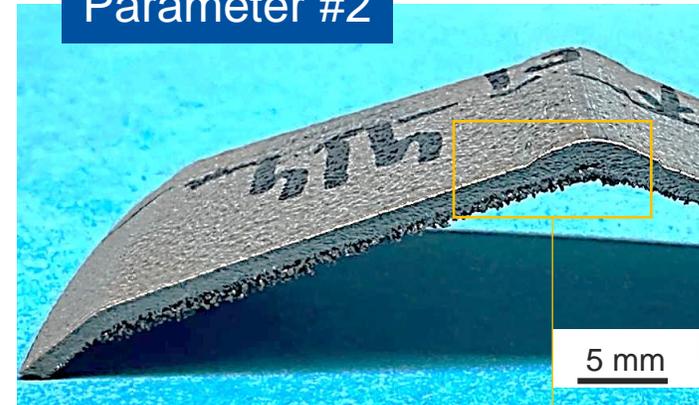


**Dicke der irregulären Oberfläche  
im Downskin: 0,1 mm**

Porosität: < 0,1 %

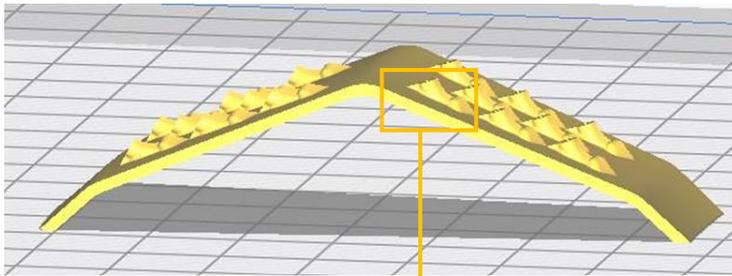
\* Mit Laserscanningmikroskop gemessen

Parameter #2

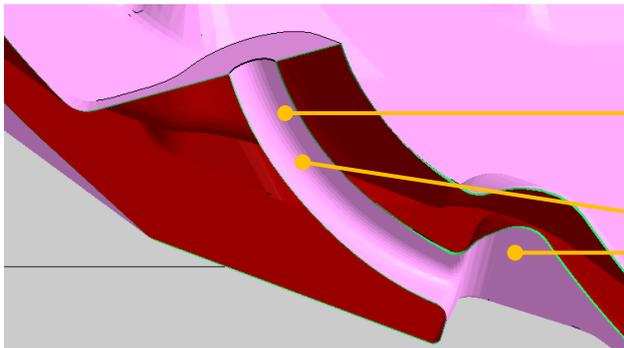


Dicke der irregulären Oberfläche  
im Downskin: 0,25 mm

Porosität: < 0,1 %



Brennkammersegment mit Kühlschindeln



Kühlschindel-Geometrie (Querschnitt)

### Weitere Kriterien:

Offene Kühllöcher  
( $\varnothing$  0.6 mm)

Formtoleranz

# FERTIGUNG DER BRENNKAMMERSEGMENTE MIT KÜHLSCHINDELN

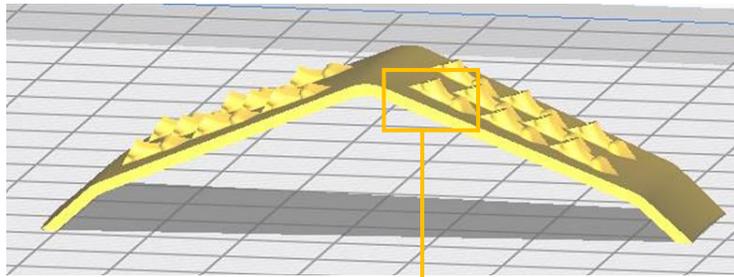


Wer sind wir?

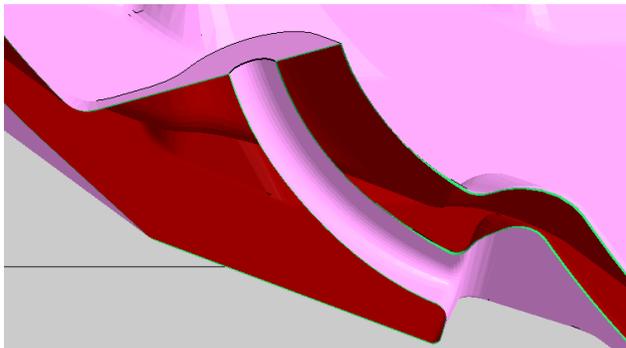
Use Case

Prozessoptimierung

Brennkammersegmente

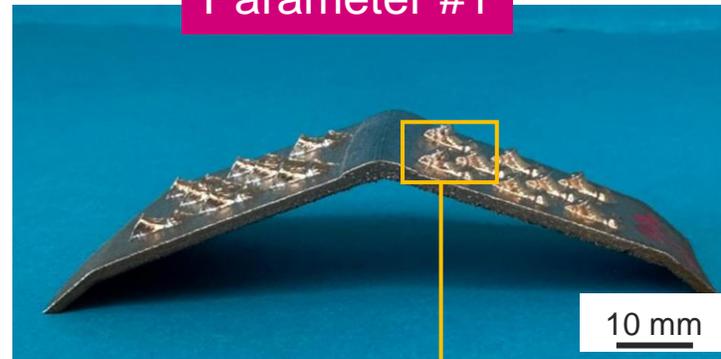


Brennkammersegment mit Kühlschindeln



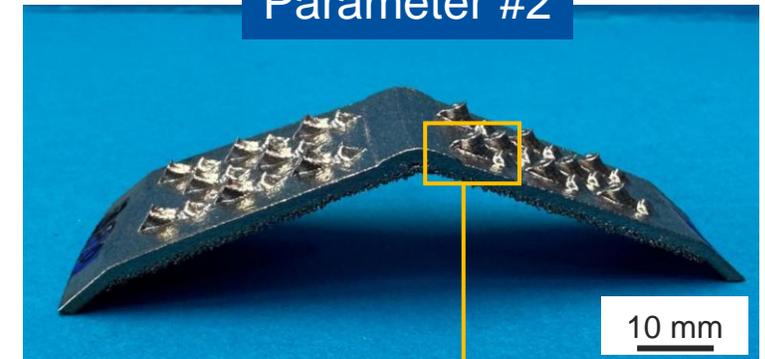
Kühlschindel-Geometrie (Querschnitt)

Parameter #1



Schliffbild

Parameter #2



Schliffbild

## Kontakt Daten:

**Center for Hybrid Electric Systems Cottbus GmbH**  
Werner-von-Siemens-Straße 7  
03052 Cottbus



**Angelika Jedynak**  
Fertigungsingenieurin  
M: 0 151 51246927  
E: [angelika.jedynak@chesco.de](mailto:angelika.jedynak@chesco.de)



**Heiko Witte**  
Geschäftsführung  
M: 0 175 7267148  
E: [heiko.witte@chesco.de](mailto:heiko.witte@chesco.de)

