



LEHRSTUHL FÜR GIESSEREIKUNDE
Lehrstuhlleiter:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Peter Schumacher
Montanuniversität Leoben
Franz-Josef-Straße 18
A-8700 Leoben
www.unileoben.ac.at



Masterarbeit

Evaluierung von plasmagespritzten Zylinderlaufflächen

erstellt am

Lehrstuhl für Gießereikunde

Vorgelegt von:
Ernst Neunteufl
0635121

Betreuer:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Peter Schumacher

Leoben, 12. Januar 2018

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Möglichkeit untersucht geometrisch beengte Motorblöcke, mit dem PTWA Verfahren zu beschichten, sowie eine quantitative Erfassung der Schichtqualität durchgeführt. Hierzu wurden zwei Versuche gefahren, wobei ein unverschlossener Motor als Referenzmotor diente und ein nachträglich Verschlossener, mit ansonst identem Aufbau, beschichtet und die Temperaturentwicklung während dieses Vorganges erfasst wurde. Um einen direkten Vergleich zu dem atmosphärischen Plasmaspritzen zu erhalten wurde zusätzlich ein Motorblock mit dem APS Verfahren beschichtet und untersucht. Für eine weitere Untersuchung der Einflüsse der Absaugung wurde der Prozess in OpenFoam abgebildet. Dies wurde mit Hilfe einer mehrstufigen Simulation durchgeführt und mit den Messergebnissen für eine Plausibilitätsprüfung verglichen. Aufgrund des stark erweiterten Temperaturbereiches dieser Simulation, im Vergleich zu den üblichen Einsatzgebieten dieses Softwarepaketes, war es notwendig Teile des thermodynamischen Modells zu überarbeiten und um die Rechenzeit auf ein technisch sinnvolles Maß zu reduzieren, wurden auch die Ergebnisse von Einzelsimulationen auf das Endergebnis übertragen.

Die Simulation bildet die Erwärmung im unteren Bereich der Zylinderlauffläche sehr gut ab. Dabei zeigt sie sich als agiler als die tatsächlich gemessenen, da hier keine Wärmeübergänge zu den Thermoelementen die Messergebnisse dämpfen. Durch die gute Korrelation zwischen der gemessenen Kurven und den Simulierten, lässt sich aus der Simulation ablesen, dass die maximale Oberflächentemperatur $15K$ über der gemessenen Kerntemperatur liegt. Im oberen Bereich des Zylinders kam es zu deutlich niedrigeren Temperaturen. Dies lässt sich aber auf die vereinfachte Geometrie der Simulation sowie etwaigen Undichtheiten im Übergang zur Absaugung zurück führen. Des Weiteren zeigte eine Auswertung der Strömung bei variierenden Parametern der Absaugung keinen maßgebenden Einfluss auf den Kernstrahl während dem Arbeitsschritt. Bei der Auswertung des Schichtaufbaues und der Schichtqualität beider Versuche zeigte sich kein signifikanter Unterschied bei dem PTWA Verfahren. Hier werden dichte Schichten mit einer niedrigen Gesamtporosität erreicht. Der Einsatz des APS Verfahrens führte zu einer deutlich erhöhten Porosität. Bei der Haftzugfestigkeit überzeugte das PTWA Verfahren gegenüber dem APS Verfahren. Die gewünschte Beschichtungslänge kann mit dem PTWA Verfahren für die gegebenen Geometrien nicht erreicht werden, die Qualität der Schicht zeigte sich dafür über die ganze beschichtete Länge als homogen.

Die Auswertung der Temperaturkurven zeigt eine maximale Erwärmung des Beschichtungsbereiches auf $160^{\circ}C$, nach dem Ausgleich der Temperaturverteilung im Gussteil, nach $430sec$ sinkt die Temperatur auf unter $100^{\circ}C$. Bei Cu freien Legierungen führt dies zu keinen Veränderungen im Gefüge, jedoch entstehen bei Cu hältigen Legierungen bei diesen kurzen Wirkzeiten bereits erste Ausscheidungskeime.

Abstract

Within the scope of this work, the possibility of coating geometrically constrained motor block with the PTWA method, as well as a quantitative detection of the layer quality, was investigated. Two tests were performed using an constrained and unconstrained motor as a reference motor. Additionally the temperature development during this process was recorded. In order to obtain a direct comparison to atmospheric plasma spraying, a motor block was additionally coated with the APS process and examined. The process has also been modeled in OpenFoam for a further investigation on the influence of the process gas. This was performed with the help of a multi-stage simulation and compared to the measurement for a plausibility study. Due to the greatly extended temperature range of this simulation, compared to the usual application areas of this software package, parts of the thermodynamic model were revised and to reduce the the computation time to a technically useful measure, the results of single simulations were also transferred to the final result.

In the evaluation of the layer structure and the layer quality of both experiments, no significant difference was found in the PTWA method. Here, dense layers with a low total porosity were achieved. The use of the APS process resulted in a significantly increased porosity. In the "cohesion strength" the PTWA process is superior, to the APS method. The desired coating length cannot be achieved with the PTWA process, however the quality of the coating was found to be uniform.

The evaluation of the temperature curves showed a maximum heating of the coating area to 160°C , after equilibrium temperature distribution in the cast part, after 430sec the temperature falls below 100°C . At this temperatures there is no significant alteration of the microstructure expected in *Cu* free alloys during this short period of time, however it has been reported that in alloys with copper the formation of precipitation cluster may allready initialize.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, am _____

Datum

Unterschrift

Danksagung:

Hiermit möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Peter Schumacher für die freundliche Betreuung und Bereitstellung der notwendigen Ressourcen bedanken. Außerdem will ich DI Frederik Linke meinen Dank für die unkomplizierte Versuchsdurchführung und Bereitstellung aller, für diese Arbeit, relevanten Daten aussprechen. Des Weiteren will ich mich auch bei mat.-inz.kand. Vakhrushev für seinen Input in Bezug auf die Verwendung von dynamischen Netzen in OpenFOAM, und bei Dr.mont. Vita für den hilfreichen Hinweis und die Erklärung der Tücken bei dem PISO Ansatz von OpenFOAM bedanken, was dabei half einige Fehler genauer eingrenzen zu können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Thema	1
1.2	Motivation	1
1.3	Problemdarstellung	1
1.4	Ziele	2
1.5	Aufbau der Arbeit	2
1.6	Abgrenzung	2
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Plasmaspritzverfahren	3
2.1.1	Atmosphärisches Plasmaspritzen APS	3
2.1.1.1	Funktionsprinzip	3
2.1.1.2	Werkstoffe	3
2.1.1.3	Besonderheiten	4
2.1.2	Plasmabrenner mit übertragenem Lichtbogen, PTWA	6
2.1.2.1	Funktionsweise	6
2.1.2.2	Werkstoffe	8
2.1.2.3	Besonderheiten	8
2.2	Oberflächenaktivierung	9
2.2.1	Sandstrahlen	9
2.2.2	Hochdruckwasserstrahlaktivierung	11
2.2.3	Mechanische Aktivierung	11
2.2.4	Laser Aktivierung	12
2.2.4.1	Oberflächenreinigung	12
2.2.4.2	Oberflächenaktivierung	13
2.3	Bindungssysteme	13
2.4	Klassifizierung von Ungängen	15
2.4.1	Ungängen	15
2.4.1.1	Porosität	15
2.4.1.2	Delamination	15
2.4.1.3	Ablösungen	16
2.4.1.4	Ungeschmolzene Partikel	16
2.4.1.5	Metallische Einschlüsse	16
2.4.2	Oxide	16
2.5	Prüfverfahren	17
2.5.1	Porosität	17
2.5.1.1	Quecksilbereindringtest	17

2.5.1.2	Gaspyknometrie	17
2.5.1.3	Dichtebestimmung	18
2.5.1.4	Optisch	18
2.6	Bildanalyse	18
2.6.1	Komposition	18
2.6.2	Bildkorrektur	19
2.6.3	Definition des Analysebereiches	19
2.6.4	Filtern und Maskieren	19
2.6.5	Analysealgorithmus	19
2.6.6	Auswertung	20
2.6.7	Kontrolle	20
2.6.8	Haftfestigkeit	20
2.7	Quantifizierung von Oberflächen	22
2.7.1	Arithmetischer Mittenrauwert R_a	22
2.7.2	Quadratischer Mittenrauwert R_q	22
2.7.3	Gemittelte Rautiefe R_z	22
2.7.4	Abott-Kurve	23
2.8	Beurteilungskriterien für die Meshqualität	23
2.8.1	Seitenverhältnis	24
2.8.2	Nichtorthogonalität	24
2.8.3	Schiefe des Meshes	25
3	Experimentelle Methoden	26
3.1	Temperaturmessung und Aufzeichnung	26
3.2	Oberflächenvorbereitung	26
3.3	Prozessparameter PTWA	27
3.4	Prozessparameter APS	27
3.5	Versuchsauswertung	28
3.5.1	Probenvorbereitung	28
3.5.2	Auswertung	29
3.5.3	Aufzeichnung	29
3.5.4	Schwellwertfilter	30
3.5.5	Bestimmung der Kontur	32
3.5.6	Festlegen des Bezugssystems	32
3.5.7	Berechnung der Schichtdicke	33
3.5.7.1	Porosität	33
3.5.7.2	Ungängen	34
4	Simulation	35

4.1	Softwarebasis	35
4.1.1	Preprocessing	35
4.1.2	Simulations Software	36
4.1.3	Postprocessing	36
4.2	Solver	37
4.2.1	Fluid	37
4.2.2	Solid	37
4.2.3	Reacting	38
4.2.4	Lagrange	38
4.2.5	Kopplung	38
4.3	Düsensimulation	39
4.3.1	Modell	39
4.3.1.1	Vereinfachter Aufbau	39
4.3.1.2	Detaillierter Aufbau	40
4.3.1.3	Einflüsse	40
4.3.2	Mesh	41
4.3.2.1	Vereinfachtes Mesh	41
4.3.2.2	Detailliertes Mesh	42
4.3.3	Randbedingungen	45
4.3.3.1	Plasmaeinlass	46
4.3.3.2	Presslufteinlass	46
4.3.3.3	Physikalische Wände	46
4.3.3.4	Symmetrieebenen	47
4.3.3.5	Auslass	47
4.3.4	Startbedingungen Düsensimulation	48
4.3.4.1	Berechnung der Wärmekapazität	48
4.3.4.2	Berechnung des Massenstroms	49
4.3.4.3	Berechnung der Starttemperatur	49
4.3.4.4	Berechnung der Konstanten für das $k - \epsilon$ Modell	50
4.3.4.5	Ergebnisse für die Startbedingungen der Düsensimulation	51
4.3.5	Export der Simulationsergebnisse	52
4.4	Hauptsimulation	54
4.4.1	Modell	54
4.4.1.1	Aufbau	54
4.4.1.2	Ziel	55
4.4.2	Mesh	55
4.4.2.1	Primärmesh	55
4.4.2.2	Motorblockmesh	56
4.4.2.3	Mesh Verdeckelung	58

4.4.2.4	Sekundärmesh	58
4.4.3	Randbedingungen	60
4.4.3.1	Primärsimulation	60
4.4.3.2	Sekundärsimulation	62
4.4.3.3	Motorblock	62
4.4.3.4	Verdeckelung	63
4.4.4	Mapping	64
4.4.4.1	Berechnung	64
4.4.4.2	Filter	66
4.4.4.3	Zeitliche Schrittweite	68
4.4.5	Messpunkterfassung	68
4.5	Struktur der Simulation	68
5	Ergebnisse	70
5.1	Praktische Versuche	70
5.1.1	Schichtaufbau	70
5.1.1.1	PTWA offener Aufbau	70
5.1.1.2	PTWA geschlossener Aufbau	71
5.1.1.3	APS geschlossener Aufbau Konfiguration 1	71
5.1.1.4	APS geschlossener Aufbau Konfiguration 2	73
5.1.1.5	APS geschlossener Aufbau Konfiguration 3	73
5.1.1.6	APS geschlossener Aufbau Konfiguration 4	74
5.1.1.7	Rauigkeitsanalysen	75
5.1.1.8	Maximale Einzelrautiefe R_{max}	75
5.1.1.9	Mittlere Glättungstiefe R_p	76
5.1.1.10	Rautiefe R_t	76
5.1.1.11	Gemittelte Rautiefe R_z	77
5.1.2	Materialverteilung	78
5.1.3	Beschichtungslänge	80
5.1.4	Porosität	81
5.1.4.1	Gesamtporosität	81
5.1.4.2	Geometrie der Ungängen	81
5.1.4.3	Streuung der Porosität	83
5.1.5	Bindungsfehler	85
5.1.6	Haftzugfestigkeit	87
5.1.7	Temperaturaufzeichnung	89
5.1.7.1	Offener Aufbau	89
5.1.7.2	Geschlossener Aufbau	89
5.1.7.3	Vergleich	91

5.2	Simulation	93
6	Diskussion	95
6.1	Quantifizierung der Schicht	95
6.2	Simulation des Wärmeeintrages	95
7	Zusammenfassung	96
8	Literatur	98
9	Anhang	101
9.1	sampleDict Düsensimulation	101
9.2	Interpolationsklasse	103
9.3	Mappingklasse Multicore	105
9.4	Randbedingungen Hauptsimulation	111
9.4.1	Primärmesh	111
9.4.1.1	Geschwindigkeitsfeld U	111
9.4.1.2	Temperaturfeld T	112
9.4.1.3	Druckfeld p	114
9.4.1.4	Turbulente kinetische Energie k	115
9.4.1.5	Turbulente Dissipationsrate ϵ	117
9.5	Abbildungsverzeichnis	119
9.6	Tabellenverzeichnis	122

1 Einleitung

1.1 Thema

Das Thema dieser Arbeit ist die Untersuchung der Tauglichkeit des Plasma Transferred Wire Arc Verfahrens zur Beschichtung von geometrisch beengten Zylindermonoblöcken. Dabei ist vor allem die Änderung der Schichtqualität und der Einfluss der geänderten Strömungsbedingungen von Interesse.

1.2 Motivation

Durch den steigenden Druck zur Gewichtsreduktion im Fahrzeugbau ist notwendigen im Bereich des Motors zu nutzen. Des Weiteren geht der allgemeine Trend zu immer höheren Leistungsdichten auf kompakteren Bauraum, dies führt zu einer gesteigerten Beanspruchung der Materialien im Bereich des Zylinders und des Abgassystems. Ein dritter Aspekt ist dabei auch die gezielte Manipulation der tribologischen Eigenschaften der Zylinderlaufflächen. Die Wirtschaftlichkeit und Prozesssicherheit der Lösungen für diese Problematik muss aber sicher gestellt sein.

Aluminumgusslegierungen stellen hier eine guten Grundwerkstoff dar, haben aber Schwächen in der Verschleiss-, thermischen und mechanischen Beständigkeit im Bereich der Zylinderlaufflächen. Aus diesem Grund gibt es hier bereits verschiedenste Ansätze die mehr oder minder zum Erfolg führen. Ein gebräuchlicher Weg ist der Einsatz von aus GJL gefertigten Zylinderlaufbuchsen. Diese zeichnen sich durch eine hohe Belastbarkeit aus. Ein Weiterer ist die lokale Auflegierung im Bereich der Laufflächen mit Silizium, von dem immer mehr Abstand genommen wird. Der dritte Ansatz ist die Aufbringung einer Beschichtung im belasteten Bereich.

Das Gewicht und die mechanische Belastung des Systems kann auch durch die Bauform reduziert werden. In diesem Fall durch die Vereinigung von Motorblock und des Zylinderkopfes zu einem Monoblock. Dadurch entfallen aufwändige Dichtsysteme, Bearbeitungsschritte in der Herstellung, sowie die Verschraubung der beiden Gruppen. Dies führt zu Einsparungen im Gesamtgewicht und der Reduktion möglicher Störungsquellen. Der Wegfall der Dichtungen ermöglicht höhere Arbeitstemperaturen und Arbeitsdrücke.

1.3 Problemdarstellung

Bei offenen Motorblöcken ist eine Beschichtung der Laufflächen durch Plasmaspritzverfahren bereits Stand der Technik. Somit gilt es die Einsetzbarkeit der Standardaufbauten für die Beschichtung einseitig geschlossener Geometrien zu betrachten und zu beurteilen. Da hier

die Zugänglichkeit der Lauffläche mit den derzeitigen Verfahren nicht immer gegeben ist und die Auswirkung einer reduzierten Absaugleistung für überschüssiges Material noch nicht bekannt ist, sind weitere Untersuchungen notwendig.

1.4 Ziele

Das primäre Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung des Bereiches indem eine sinnvolle Beschichtung möglich ist. Außerdem sollen auch die Unterschiede in der Haftfestigkeit der Schicht im Vergleich zu einer herkömmlichen Konfiguration untersucht werden. Zusätzlich werden die Schichten auf Unterschiede in ihrem Aufbau und Ungängen hin untersucht. Der Vergleich der Strömungsbedingungen soll über ein Simulationsmodell in dem der Wärmeeintrag und dessen Auswirkungen auf das Gefüge in der Randzone des Gussteiles erfolgen.

1.5 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in zwei Bereiche, einem Experimentellen und dem Numerischen. Im experimentellen Teil wird ein herkömmlicher Motor ohne Modifikation beschichtet und um einen Monoblock zu simulieren wird ein baugleicher Motor mit Blenden versehen und ebenfalls beschichtet. Die aus diesen Versuchen gewonnenen Beschichtungen werden hinsichtlich ihrer Eigenschaften anschließend untersucht.

Im zweiten Teil wird auf die numerische Modellbildung eingegangen. Dieser beleuchtet auch die dem Prozess zugrunde liegenden physikalischen Bedingungen näher und der Möglichkeit diese in einer Simulation abzubilden.

Der letzte Punkt ist der Abgleich der real gemessenen Temperaturkurven mit den in der Simulation ermittelten, um eine Aussage über die Qualität des Modells treffen zu können.

1.6 Abgrenzung

Es werden keine Untersuchungen zu notwendigen konstruktiven Änderungen bei dem PTWA Verfahren durchgeführt. Während der Modellbeschreibung für die Simulation wird auch die Simulation des Sprays selbst beschrieben aber aufgrund des Umfanges und der mangelnden Quantifizierbarkeit nicht in das endgültige Modell eingebunden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Plasmaspritzverfahren

Prinzipiell gibt es mehrere ähnliche Techniken für Plasmaspritzverfahren, welche sich nur in der Bildung des Plasmas und der Substratzufuhr unterscheiden. Die drei am häufigsten bei der Herstellung von Zylinderlauflächenbeschichtungen eingesetzten Verfahren sind das Eindraht gestützte Plasma Transfer Verfahren, das Zweidraht Lichtbogen Verfahren und das Atmosphärische Spritzverfahren. Diese Gruppen bestehen aus mehreren Variationen eines Grundprinzips. Meist wird das Plasma in einer Ionisationskammer erzeugt und der dabei entstehende Plasmastrahl über eine Düse expandiert. Im Zentrum dieses Strahles wird kurz nach dem Verlassen der Düse das Substrat draht- oder pulverförmig zugegeben. Ein Sonderverfahren stellt hierbei das Zweidraht-Verfahren dar, hier wird das Plasma lokal zwischen zwei Substratquellen gebildet. In den nachfolgenden Unterpunkten wird näher auf die Besonderheiten der jeweiligen Verfahren eingegangen.

2.1.1 Atmosphärisches Plasmaspritzen APS

2.1.1.1 Funktionsprinzip

Bei dem atmosphärischen Plasmaspritzen wird das Inertgas, meist Argon, in einer Kammer vor dem Erreichen der Düse ionisiert und nach dem Verlassen derer wird das Substrat pulverförmig zugegeben. Die gesamte thermische und kinetische Energie kommt hier von der Ionisation und Expansion des Gases [1]. In Abbildung 2- 1 ist dieser Aufbau vereinfacht dargestellt. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der großen Auswahl an möglichen Substraten, diese reichen von Metallen bis Feuerfestmaterialien, da hier sehr hohe Plasmatemperaturen erreicht werden. Ein Nachteil besteht in der schwankenden Zugaberate die dem Pulverförder-system geschuldet ist. Diese Problematik war bereits Gegenstand mehrerer Studien, welche interessante Ergebnisse im Bereich der zwei Phasenströmung brachten. Diese Variante des Plasmaspritzens ermöglicht eine größere Freiheit bei der Gestaltung der Düsengeometrie und der Strahlführung[5].

2.1.1.2 Werkstoffe

Das APS Verfahren zeichnet sich durch seine große Vielfalt an möglichen Beschichtungswerkstoffen aus. Prinzipiell können alle Werkstoffe, die sich während dem Beschichtungsprozess nicht zersetzen eingesetzt werden. Dies inkludiert oxidische und keramische Materialien. In Tabelle 2-I ist eine Übersicht der gängigen Werkstoffe aufgelistet.

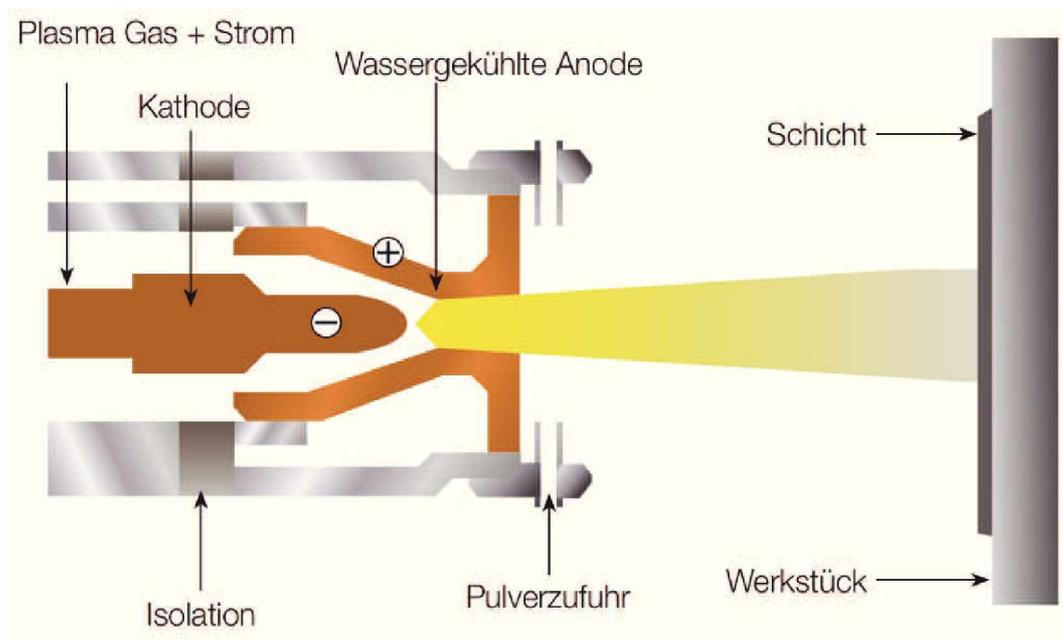


Abbildung 2- 1: Prinzipschaubild APS [2].

Tabelle 2- I: Auszug APS Werkstoffe[28].

Typ	Material	Schmelzpunkt [°C]
Metalle	<i>Al, Al – Si</i>	660
	<i>Cu, Cu – Ni, Cu – Al</i>	1083-1205
	<i>Ti, Ta</i>	1665
	<i>Fe-Basis</i>	815-1200
	<i>Mo-Basis</i>	2620
	<i>Ni-Basis</i>	1232-1453
Intermetallisch	<i>CoCrNiWC</i>	1230-1600
	<i>NiCrSiB</i>	1050
Cermet	<i>Mo – Mo₂C</i>	2620
	<i>CrC – NiCr</i>	1930
	<i>WC – Co, WC – Ni</i>	1250-1480
Keramisch	<i>Al₂O₃, Al₂O₃ – TiO₂</i>	2050
	<i>Cr₂O₃, Cr₂O₃ – TiO₂</i>	2453
	<i>TiO₂</i>	1843
	<i>ZrO₂-Basis</i>	2500

2.1.1.3 Besonderheiten

Die dabei verwendeten Partikelgrößen werden in zwei Bereiche eingeteilt, die feine Klasse liegt zwischen $15\mu\text{m}$ und $45\mu\text{m}$ und die grobe Klasse im Bereich von $45\mu\text{m}$ und $106\mu\text{m}$. Partikelgrößen unter $10\mu\text{m}$ sind für dieses Verfahren nicht geeignet, da es aufgrund der geringen Größe in der Zuführungsleitung zur Agglomeration der Partikel kommt, welche wiederum zu Druckschwankungen verursachen und somit eine konstante und homogene Materialzufuhr

nicht mehr gewährleistet ist. Dies führt auch zu nicht stoffschlüssig verbundenen Clustern in der Beschichtung[3].

Für die Herstellung der Pulver kommen verschiedenste Verfahren zum Einsatz, wobei die Morphologie und Größe der Partikel von der eingesetzten Technologie abhängen. Eine Übersicht ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

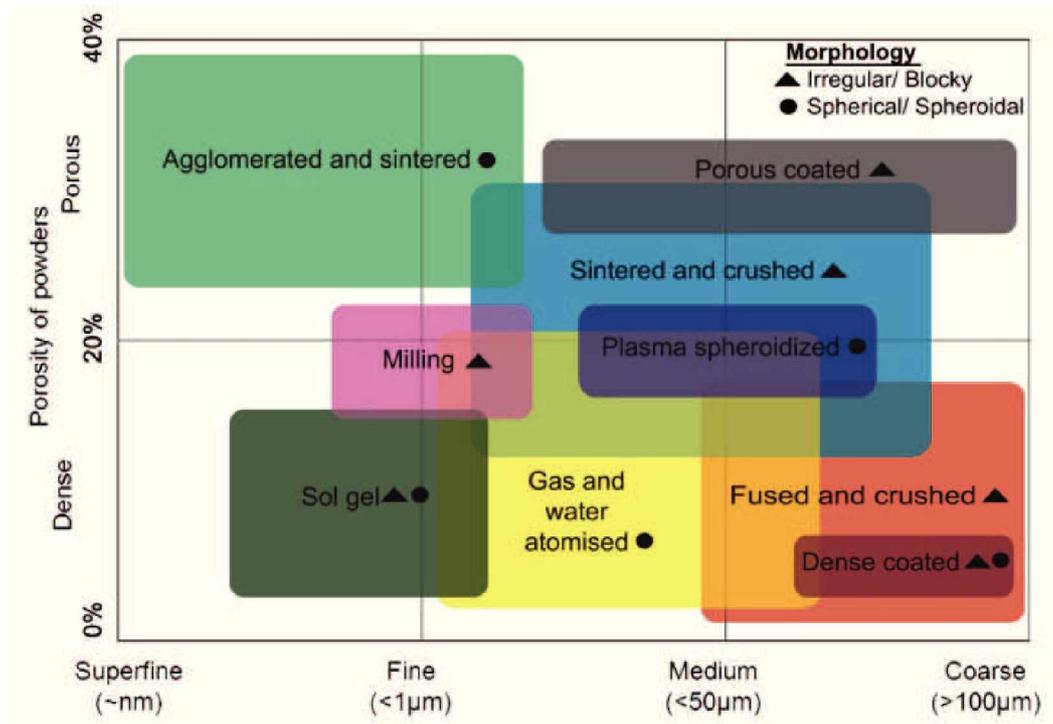


Abbildung 2-2: Übersicht der Verfahren zur Pulverherstellung[28].

Die Verteilung des Kornbandes ist entscheidend für die Homogenität der Beschichtung. Während der Förderung der Partikel in der Zuleitung erhalten alle Fraktionen die Geschwindigkeit des Trägergases, kleinere Partikel werden aufgrund der Stöße abgebremst. Somit unterscheiden sich die Partikel nur durch ihren spezifischen Impuls am Eintrittspunkt in die Düse. Dies führt zu einer großen Streuung und Verteilung der Einschlagsgeschwindigkeit und Verteilung am Substrat[4]. In Abbildung 2-3 ist ein gerendertes Bild des verwendeten Brenners, Oerlikon F210, mit seinen Komponenten dargestellt. Anzumerken ist, dass das Material nicht in der Düse zugeführt wird, und dadurch eine gewinkelte Anstellung des Brenner im Bezug zur Rotationsachse möglich ist, was in den Versuchen auch genutzt wird. Für den Betrieb sind vier Betriebsmedien, das Gas für das Plasma, Pressluft, Kühlwasser und das Pulver für die Beschichtung, notwendig. Um die große Abwärme die die Erzeugung des Plasmas in der Düse verursacht abführen zu können wird diese permanent mit Wasser gekühlt. Für das Plasma wird meist ein Gemisch aus Argon und Wasserstoff verwendet, ferner sind auch andere Gase wie Stickstoff und Helium möglich. Die Zugabe von Wasserstoff steigert den Energieeintrag in den endgültigen Plasmastrahl durch seine hohe Wärmekapazität.

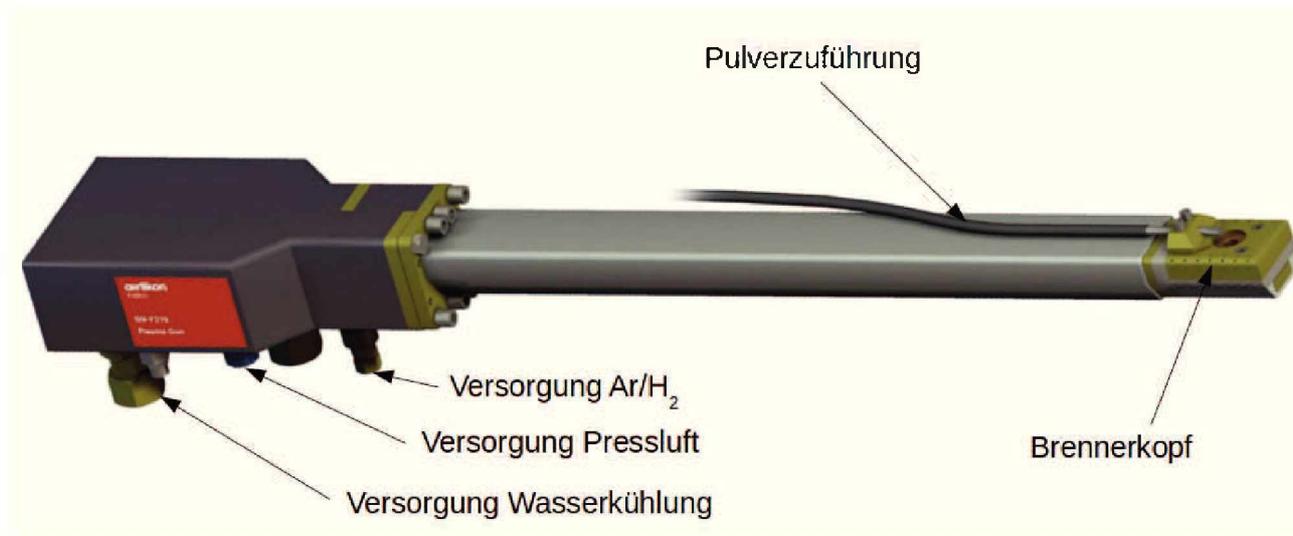


Abbildung 2-3: Komponenten F210 Brenner[26].

2.1.2 Plasmabrenner mit übertragenem Lichtbogen, PTWA

Hier handelt es sich um das bei der Arbeit primär verwendete Verfahren. Die Abkürzung PTWA steht im Englischen für Plasma Transferred Wire Arc. Der Strahl wird hier zweistufig ausgebildet. Im ersten Schritt wird das Trägergas, welches zumeist aus Argon und verschiedenen anderen Gasen in geringerer Konzentration besteht, mit Hilfe eines Lichtbogens zwischen der Anode und der Kathode, welche die Kammerwand darstellt, ionisiert. Anschließend wird das Gas in einer Düse mit geringem Durchmesser komprimiert und beim Verlassen dieser, wird die Druckenergie über eine an eine Lavaldüse angelehnte Geometrie, in Impulsenergie umgewandelt. Die Drahtzuführung erfolgt in der Rotationsachse des Sprühkopfes. In Abbildung 2-4 ist ein solcher Aufbau schematisch dargestellt.

2.1.2.1 Funktionsweise

In Abbildung 2-5 ist die Düsengeometrie, welche dem Patent DE102013226690 A1 entnommen wurde, dargestellt. Die tatsächlich verwendete Geometrie und deren Proportionen entsprechen diesem Patent, abgesehen von dem sekundären Verteilerring. Das Plasmagas wird über einen radialen Verteilerring eingebracht und an der Anode vorbeigeleitet. Das umliegende Gehäuse bildet die Kathode. Der Spalt zwischen diesen beiden Bauteilen bildet die Ionisationskammer, in der das Gas elektrisch ionisiert wird. Am Ende der Ionisationskammer verjüngt sich deren Querschnitt, wobei der Plasmaström verdichtet wird. Anschließend tritt das Gas in die erste Lavaldüse L1 ein, wo die vorhandene Druckenergie in kinetische Energie umgesetzt wird. Die Drahtzufuhr erfolgt nachdem der Großteil der Druckenergie abgebaut wurde im Zentrum dieses Plasmastrahls. Der Draht wird hier nur vom Plasmastrahl getroffen. Am Ende der ersten Lavaldüse erfolgt die Einbringung des Zerstäubergases. Die Verteiler-

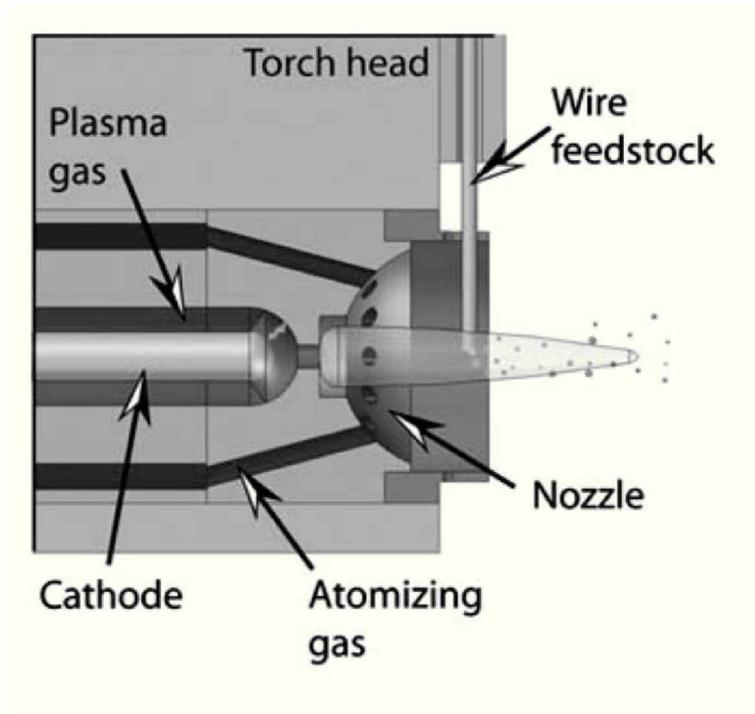


Abbildung 2- 4: Prinzipschaubild PTWA [6].

düsen sind hier so gestaltet, dass der theoretische Schnittpunkt wenige Millimeter hinter der Drahtzufuhr liegt. Dadurch wird das Aufschmelzen des Drahtes durch das noch kalte Zerstäubergas nicht beeinträchtigt. Dabei kommt es zu einer erneuten Druckbeaufschlagung des Strahles, dessen potentielle Energie wieder über eine nachfolgende zweite Lavaldüse L2 in kinetische Energie übergeführt wird. Am Auslass des Brenners herrscht nur mehr atmosphärischer Druck, dadurch kommt es auch zu keiner Auffweitung des Plasmastrahles und bleibt somit bis zum Erreichen des Staupunktes fokussiert.

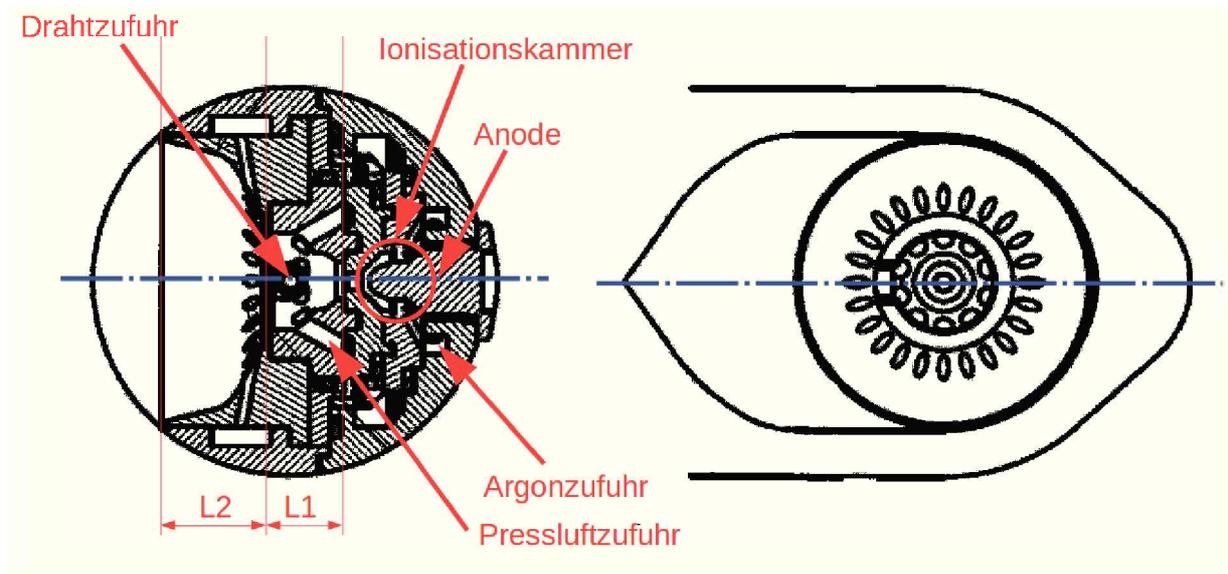


Abbildung 2-5: Geometrie PTWA Düse[7].

2.1.2.2 Werkstoffe

Die Werkstoffauswahl für dieses Verfahren ist im Vergleich zu APS eingeschränkt. Es können nur metallische drahtförmige Materialien verarbeitet werden. Hier kommen *Al-*, *Cu-*, *Fe-*, *Ni-*, *Ag-*, *Sn-* und *Zn-*Basislegierungen zum Einsatz.

2.1.2.3 Besonderheiten

Die Zugabe als Draht birgt Vorteile in der gleichmäßigen und genauen Materialdosierung, da diese über die Vorschubgeschwindigkeit gesteuert werden kann. Der Nachteil liegt jedoch in dem erhöhten konstruktiven Aufwand der Drahtzuführung. Hier gibt es zwei technische Möglichkeiten, entweder wird der Draht entlang des Brennerkopfes in seiner Rotationsachse geführt und die Versorgung bleibt statisch, dadurch rotiert der Draht nicht mit und reibt aufgrund der Rotation des Kopfes an der Drahtführung. Eine konstruktive Alternative stellt die Montage der Drahtrolle auf dem Sprühkopf dar, womit komplexere Drahtzuführungen in den Sprühkopf möglich sind, dies führt aber zu einem höheren Gesamtgewicht und kann bei Drehzahlen von über $500^1/min$ zu weiteren Problemen führen.

Durch die nötige zentrische Drahtzufuhr, ist eine Anstellung des Plasmastrahles schwer bis nicht möglich, da die Drahtzufuhr durch den Zerstäuberring geführt werden muss, was zu weiteren Problemen in der konstruktiven Gestaltung führt.

2.2 Oberflächenaktivierung

Die Grundlage für das Haften der Beschichtung liegt in der geometrischen Verzahnung den beiden Oberflächen. Dafür ist es notwendig die Oberflächen davor zu aktivieren, d.h. sie entsprechend aufzurauen. Eine Übersicht der einzelnen Verfahren wird in Tabelle 2- II aufgelistet. Die eingesetzten Verfahren werden nachfolgend kurz erklärt.

Tabelle 2- II: Übersicht Aktivierungsverfahren[9].

Prozess	Oberflächengüte	Verfahrenskosten	Kommentar
Sandstrahlen	-	-	Kontamination des Bauteiles mit Sand
Erodieren	+	-	Noch nicht kommerziell verfügbar
Mechanisch	-	-	Ungenügende Oberflächerauigkeit
Laser	-	+	Unbekannte Vorteile
Behandlung			
Wasserstrahl	+	-	Sauber, hohe Rauheit möglich
Chemisch	+	-	Günstig, chemische Bindung

Die Wahl des Verfahrens hat maßgebenden Einfluss in die spätere Haftzugfestigkeit der Beschichtung. Barbezat[8]führte Untersuchungen über die Auswirkungen verschiedenster Aufrauungsverfahren für einen Motorblock aus einer *AlSi7*-Legierung durch, welche nachfolgend mit dem APS-Verfahren beschichtet und anschließend deren Qualität beurteilt wurden. Als Beschichtungswerkstoff kommt ein Eisenkohlenstoffstahl XPT512 zum Einsatz. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2- III aufgelistet.

Tabelle 2- III: Vergleich der Aktivierungsverfahren *AlSi7*-XPT512[8].

Verfahren	Sandstrahlen	Wasserstrahlen	Mechanisch	Chemisch	Laser
Entwicklungsstand	standard	standard	standard	potential	beginnend
Haftzugfestigkeit [<i>MPa</i>]	50 ± 10	50 ± 10	25 ± 5	50 ± 10	50 ± 10
Substrateinschlüsse	+	-	-	-	-
Umweltverträglichkeit	verträglich	verträglich	verträglich	schlecht	ausgezeichnet
Kosten	niedrig	hoch	niedrig	niedrig	hoch
Prozessunsicherheit	niedrig	hoch	niedrig	niedrig	mittel
Wartung	mittel	hoch	niedrig	niedrig	mittel
Patentiert	nein	ja	nein	ja	ja

2.2.1 Sandstrahlen

In diesem Verfahren wird vorwiegend Korund mit eingestellter Korngröße auf die Oberfläche geblasen, es gibt auch Entwicklungen in Richtung Eisenkarbid für den Einsatz als abrasives Medium, welches eine Schonung der Anlagenteile mit sich bringt [8]. Durch die abrasiven Partikel wird die Oberfläche abgetragen. Anschließend wird diese Oberfläche wieder mit Pressluft gereinigt. Die Topologie der dabei entstehenden Oberfläche ist in Abbildung 2- 6

dargestellt. Nachteilig für dieses Verfahren ist die Notwendigkeit einer gründlichen Reinigung nach Abschluss des Prozessschrittes, bevor mit dem eigentlichen Beschichtungsvorgang begonnen werden kann.

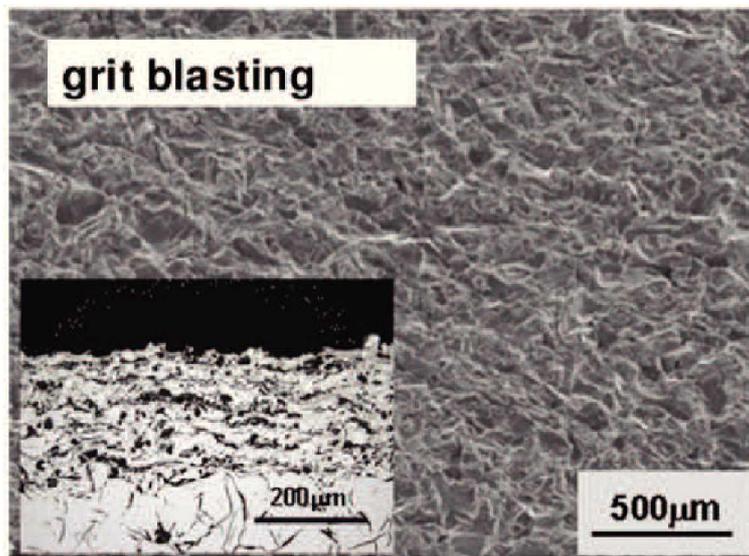


Abbildung 2-6: Durch Sandstrahlen aktivierte Oberfläche[10].

Die verwendeten Korngößen liegen zwischen 70 und $250\mu\text{m}$ und die erreichte mittlere Rauheit R_a liegt bei 0.4 bis $4.9\mu\text{m}$ [11] sowie zwischen $10.1\mu\text{m}$ und $11.8\mu\text{m}$ [8]. Mit steigender Oberflächenrauigkeit steigt auch die Haftzugfestigkeit, wie in Abbildung 2-7 erkennbar ist[8].

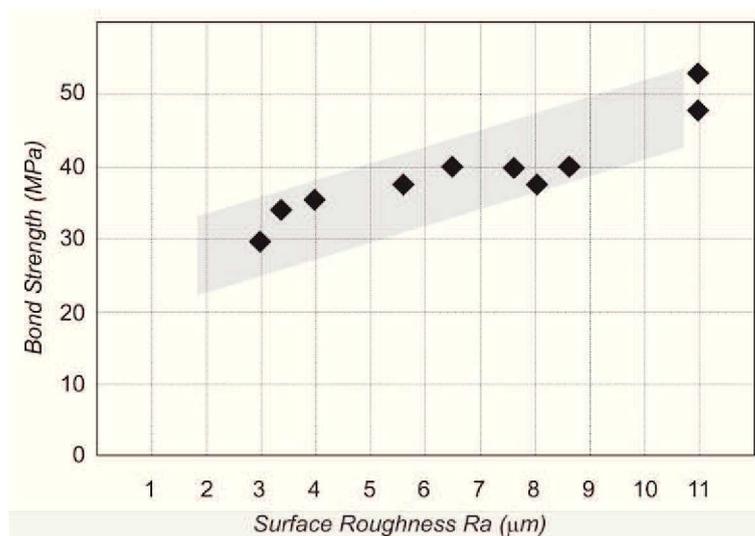


Abbildung 2-7: Abhängigkeit Haftzugfestigkeit und Oberflächenrauigkeit[10].

2.2.2 Hochdruckwasserstrahlaktivierung

Die Oberfläche wird mit Hilfe eines Hochdruckwasserstrahls behandelt. Dazu fährt dieser in kurzem Abstand das Bauteil ab und trägt dabei die Oberfläche ab. Die verwendeten Drücke in der Düse liegen bei $200 - 600 \text{ MPa}$ und Strahlgeschwindigkeiten von 650 ms^{-1} . Die in [12] ermittelten mittleren Rautiefen liegen unter $5 \mu\text{m}$. In Abbildung 2-8 ist eine so behandelte Oberfläche dargestellt.

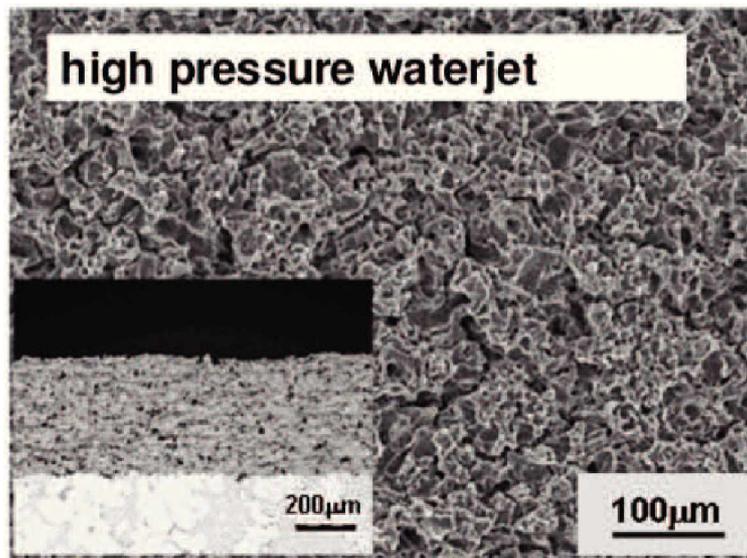


Abbildung 2- 8: Durch Hochdruckwasserstrahlen aktivierte Oberfläche[10].

Nachteilig für dieses Verfahren ist der hohe Anlagen- und Wartungsaufwand. Zudem ist eine entsprechende Wasseraufbereitung notwendig. Im Vergleich zu den anderen Verfahren weist es keine Signifikanten Vorteile auf.

2.2.3 Mechanische Aktivierung

Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Verfahren wird hier kein stochastisches Muster eingearbeitet, sondern eine gezielte Schwalbenschwanzstruktur, mit Hilfe eines Hartmetallmessers, herausgedreht. Ein solches Profil ist in Abbildung 2-9 dargestellt. Das Schneiden erfolgt mehrstufig. Dabei wird mit einer Vorstufe zuerst ein rechteckiges Profil geschnitten und die Hinterschneidung erfolgt mit den Folgeschneiden. Diese sind mehrfacher Ausführung vorhanden, damit im Falle eines Verlustes einer Schneidkante, das Profil dennoch korrekt fertig gestellt werden kann. Die Klingen stellen das Hauptproblem bei diesem Verfahren dar. Diese werden nach jedem Vorgang optisch auf Schäden geprüft. Mit zunehmender Schnitttiefe steigt auch die Haftzugfestigkeit der Beschichtung[13]. Bei einer Profiltiefe von $100 \mu\text{m}$ können Festigkeiten von 45 MPa erzielt werden[27].

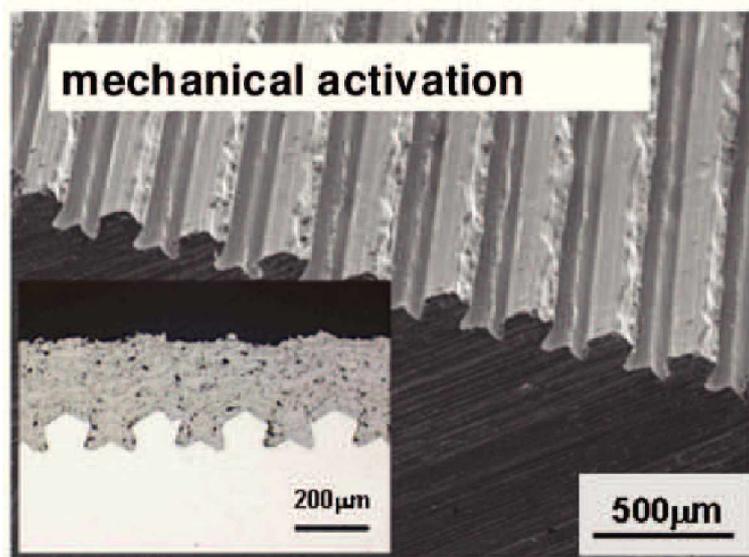


Abbildung 2-9: Mechanisch aktivierte Oberfläche[10].

Aufgrund der oben genannten Probleme bei dem Einsatz der Klingen, wird derzeit ein ähnlicher Ansatz entwickelt bei dem nur das Rechteckprofil eingearbeitet wird. Anschließend werden die Riefen mit einer Walze zu einem schwalbenschwanzähnlichen Profil umgeformt. Hier ergeben sich Vorteile durch eine Kaltverfestigung und der Möglichkeit größere und schärfere Hinterschneidungen zu fertigen.

2.2.4 Laser Aktivierung

Hier kann die Einsatzmöglichkeit des Lasers in drei Bereiche geteilt werden. Die Erste ist die Reinigung der Oberfläche von Oxiden, die Zweite ist die Aufrauung und die Dritte ist eine gezielte Texturierung der Oberfläche.

2.2.4.1 Oberflächenreinigung

Vor einer Beschichtung gilt es die Oberfläche von etwaigen Resten wie Schmiermitteln, Staub oder auch Korundresten zu befreien, da diese ansonsten ein natürliches Trennmittel zwischen Beschichtung und dem Motorblock darstellen. Dieser Vorgang läuft in mehreren Schritten ab, meist werden in einem ersten Schritt Kühl- und Schmiermittelreste mit Wasser grob entfernt und mit Pressluft getrocknet. Im Anschluss wird die Oberfläche mit einem fettlösenden Medium gewaschen, wie zum Beispiel Aceton. Alternativ ist auch eine Laserablation möglich, welche Fett- und Ölreste, sowie die Aluminiumoxidschicht entfernt. Es konnte auch beobachtet werden, dass es zu chemischen Bindungen zwischen der Beschichtung und der Bauteiloberfläche kommt, wenn der zeitliche Abstand zwischen der Laserreinigung und der Beschichtung unter $100ms$ liegt [15]. Für diesen Effekt muss die erste Beschichtung direkt

nach der Reinigung erfolgen, was jedoch die Probleme der Verschmutzung der Optik des Lasers durch den Beschichtungsvorgang mit sich bringt. In Abbildung 2- 10 ist eine mit einem Laser gereinigte Oberfläche dargestellt.

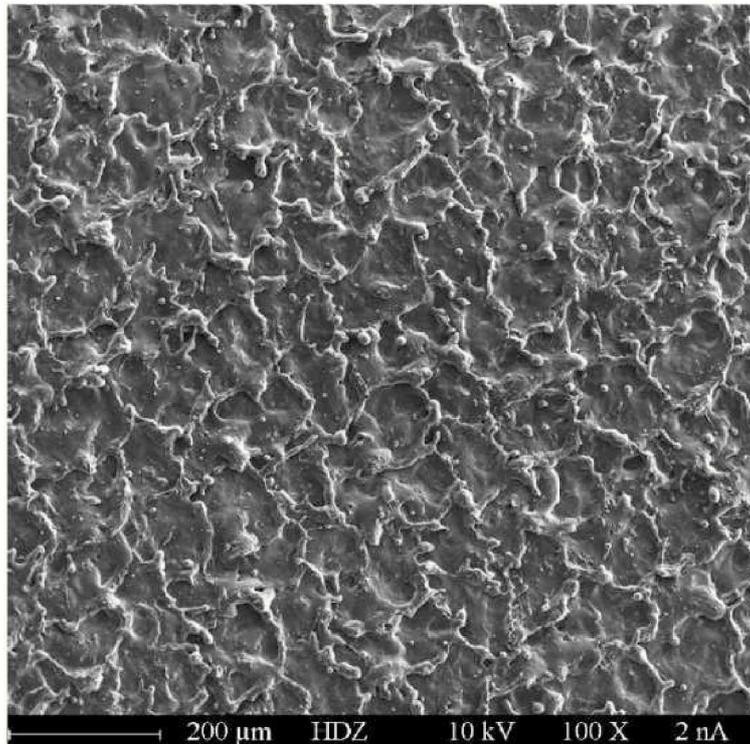


Abbildung 2- 10: Oberfläche einer mit einem Laser gereinigten Oberfläche[14].

2.2.4.2 Oberflächenaktivierung

Dieser Vorgang ähnelt der Oberflächenreinigung mit dem Laser, jedoch wird hier mit höheren Intensitäten gearbeitet. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten sind bei der Reinigung nur die Oxide und die Verunreinigungen betroffen. In Abbildung 2- 11 ist die Verteilung der Intensität und deren Ausbreitung in einem Brennfleck dargestellt. Diese Verteilung führt dazu, dass nur im Kernbereich eine Abtragung des Materials erfolgt.

Durch diesen, oben genannten, Effekt kommt es zu keiner vollständigen Entfernung der Oxide, eine Makroaufnahme des entstehenden Musters ist in Abbildung 2- 12 dargestellt. Die hellen Bereichen stellen hierbei die Oxidschicht dar.

2.3 Bindungssysteme

Für die Haftung des Substrates sind mehrere Effekte verantwortlich. Den dominierenden Anteil davon übernimmt die mechanische Verzahnung zwischen der Beschichtung und dem

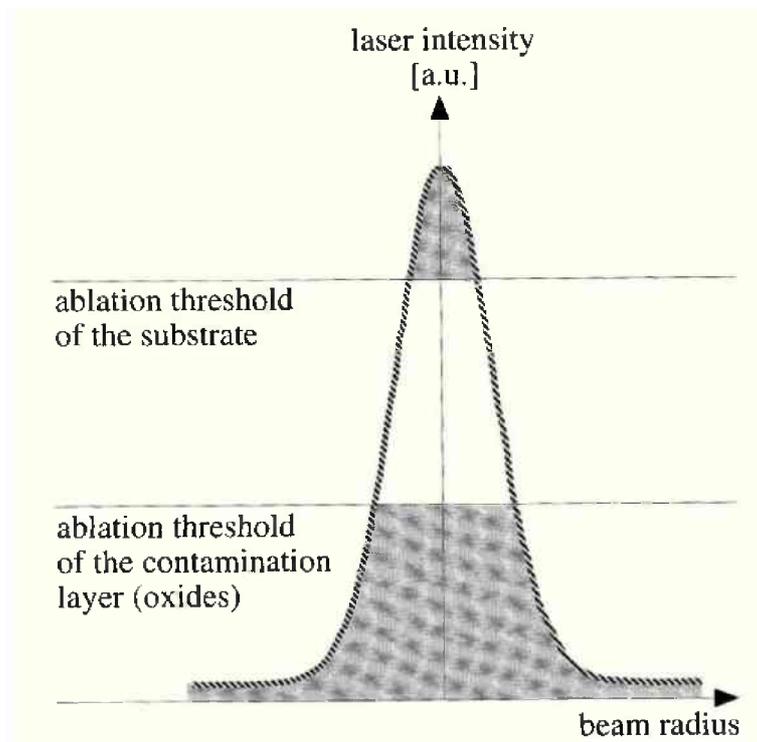


Abbildung 2- 11: Einfluss Laserintensität auf die Oberfläche[15].

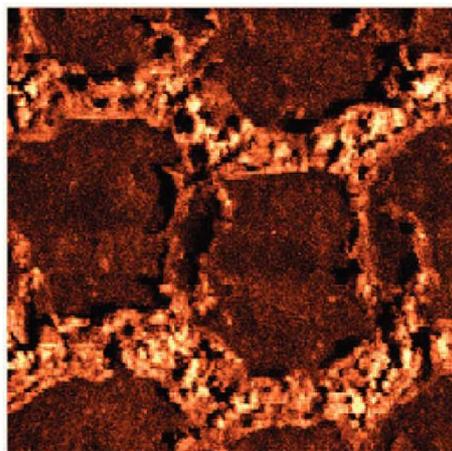


Abbildung 2- 12: REM Aufnahme einer mit einem Laser aufgerauten Oberfläche[14].

Gussteil. Es wurden aber auch schon metallische Bindungen bei der Laser gestützten Aktivierung beobachtet, welche durch Diffusionsprozesse an den Oberflächen zu Stande kommen.

2.4 Klassifizierung von Ungängen

Aufgrund der Komplexität des gesamten Prozesses sind verschiedenste Arten von Ungängen möglich, in Abbildung 2-13 werden einige dieser beispielhaft dargestellt. In den nachfolgenden Punkten werden diese aufgelistet und beschrieben.

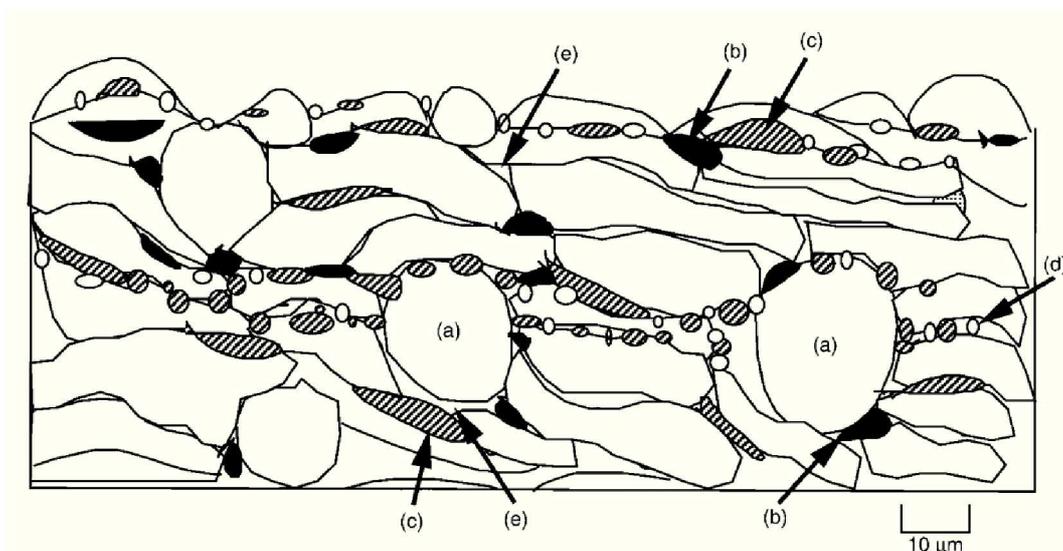


Abbildung 2-13: Beispiele für Ungängen: (a) Ungeschmolzene Partikel, (b) Oxide, (c) Overspray, (d) feine Partikel, (e) Porosität [17].

2.4.1 Ungängen

2.4.1.1 Porosität

Dies sind während dem Beschichtungsprozess entstandene Hohlräume welche sich vor allem bei der mechanischen Aufrauung im Fuß der Beschichtung negativ auswirken, da dies zu keinem Formschluss im Haftgrund führt. Dort treten diese Fehler nicht punktuell auf, sondern bilden lange Faden-artige Hohlräume.

2.4.1.2 Delamination

Hierbei lösen sich nicht vollständig schmelzverbundene Partikel aufgrund von während dem Abkühlvorgang entstandenen Zugspannungen wieder ab. Dies kann lokal auftreten oder auch bei ungünstiger Lage der einzelnen Partikel zu Rissnetzwerken führen. In Abbildung 2-14 ist beispielhaft eine durch eine $NaCl$ Lösung behandelte Beschichtung mit einer ausgeprägten Delamination dargestellt.

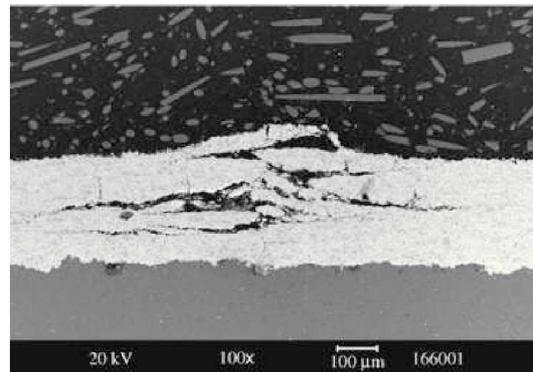


Abbildung 2- 14: REM Aufnahme einer Delamination einer $WC-CoCr$ Beschichtung auf einer 7050-Legierung[20].

2.4.1.3 Ablösungen

Für diesen Fehler gibt es zwei Entstehungsmöglichkeiten. Bei der Ersten kommt es zu einer Ablösung der Beschichtung aufgrund von vorhandenen Verunreinigungen auf der Aufrauungsfläche. Die zweite Entstehung beruht auf thermischen Spannungen in den Ausläufern der Beschichtung, dies kann zu Ablösungen beginnend vom Ende Beschichtung führen. Bei den laufenden Untersuchungen konnte dies am Einlaufbereich der Zylinderlauffläche beobachtet werden.

2.4.1.4 Ungeschmolzene Partikel

Dies sind Partikel die zwar aufgeschmolzen wurden, haben jedoch auf dem Weg zur Oberfläche den Kernstrahl verlassen und sind dabei wieder erstarrt. In der Beschichtung stellen sich diese Partikel als kugelförmige Objekte dar. Problematisch ist hierbei, dass es zu keiner Bindung über Sinterprozesse kommt, da dies durch die sich auf der Oberfläche gebildete Oxidschicht unterbunden wird.

2.4.1.5 Metallische Einschlüsse

Hierbei handelt es sich vorwiegend um Partikel die die Oberfläche erreicht haben, aber keine Bindung eingehen konnten. Aufgrund der vorherrschenden Strömungsbedingungen werden diese wieder abgelöst und erreichen die Oberfläche wieder. Erkennbar sind diese Partikel an ihrer unregelmäßigen Kontur und der nicht planaren Ausrichtung zur Zylinderlauffläche.

2.4.2 Oxide

Während dem Transport der Partikel auf dem Weg zur Oberfläche kommt es durch Turbulenzen im Plasmastrahl zur Einbringung von Sauerstoff, dadurch werden die Partikel oberflächlich oxidiert. Bei dem späteren Auftreffen auf der Oberfläche bilden diese Anfangs runden

Partikel planare Schichten aus. In Abhängigkeit vom Auftreten derer ist dieser Effekt positiv, da Eisenoxide eine höhere Härte besitzen und somit die Verschleißbeständigkeit der Beschichtung erhöhen. Befinden sich aber zu viele Oxide in der Schicht, kann dies die Festigkeit in der Schicht so weit herabsetzen, dass sie den thermischen Spannungen nicht mehr standhält.

2.5 Prüfverfahren

2.5.1 Porosität

Für die Bestimmung und Klassifizierung eignen sich verschiedenste Verfahren, aufgrund der Einfachheit und Vielseitigkeit wird für die Auswertung eine optische Analyse verwendet. Nachfolgend werden die möglichen Verfahren kurz beschrieben.

Tabelle 2- IV: Übersicht Porositätsbestimmungsverfahren[17].

Verfahren	Gesamt Porosität	Poren Verteilung	Poren	Risse	Delamination	Geschl. Netzwerke	Offene Netzwerke
Quecksilbereindringtest		✓					✓
Gaspyknometrie							✓
Dichtebestimmung						✓	
Bildanalyse	✓	✓	✓	✓	✓		
SANS	✓	✓	✓	✓	✓		
USAXS	✓	✓					
CMT	✓	✓	✓	✓	✓		
Ultraschall	✓						

2.5.1.1 Quecksilbereindringtest

Hierbei wird das aufgenommene Quecksilbervolumen in Abhängigkeit des Imprägnationsdruckes aufgezeichnet. Das Funktionsprinzip dahinter ist, dass die Benetzung feiner Porositäten, aufgrund der Oberflächenspannung von Quecksilber, einen höheren Druck benötigt als die größerer Kavitäten. Dadurch kann mit einer Messung die oberflächlich zugängigen Poren in Gesamtvolumen und Größenverteilung bestimmt werden. Der Nachteil ist, dass keine eingeschlossenen Poren bestimmt werden können.

2.5.1.2 Gaspyknometrie

Bei diesem Verfahren wird das von den Poren aufgenommene Volumen bestimmt. Da Gase keine Oberflächenspannung besitzen ist hier auch keine Aussage über die Größen- und Volumenverteilung der Poren möglich.

2.5.1.3 Dichtebestimmung

Hier wird über den Vergleich mit einer Referenzdichte das im Feststoff enthaltene Porenvolumen bestimmt. Dieses Verfahren eignet sich nur für die Bestimmung der eingeschlossenen Poren. Problematisch ist auch die dafür notwendige Probenpräparation.

2.5.1.4 Optisch

Es besteht auch die Möglichkeit die Porosität optisch, und nicht auf physikalischen Effekten basierend, zu bestimmen. Hierzu besteht der Ansatz in der Nutzung von bereits erstellten Schliffbildern, welche entweder manuell oder automatisch auf Poren vermessen werden und mit deren Ergebnisse mittels verschiedener Modelle die tatsächliche Porosität berechnet wird.

2.6 Bildanalyse

Bei der Bildanalyse werden die zuvor von einem Mikroskop aufgenommen Bilder digital verarbeitet und ausgewertet. Dabei lässt sich der Ablauf in die in Abbildung 2-15 aufgelisteten Schritte gliedern.

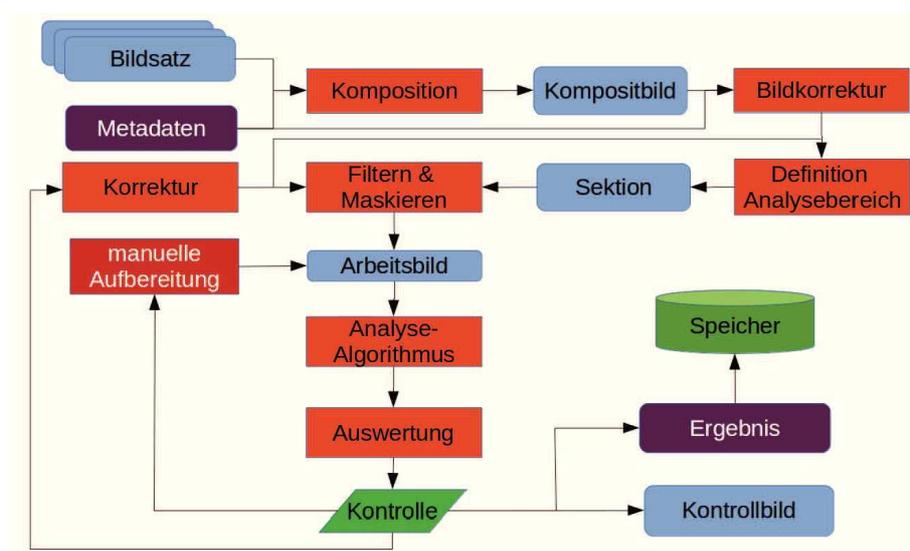


Abbildung 2-15: Ablaufschema Bildanalyse.

2.6.1 Komposition

Bei der Komposition wird mit der Hilfe von Metadaten, welche Informationen zum Beispiel über die Belichtungszeit, Auflösung, Farbräume, Kanäle und Position eines Einzelbildes enthalten, ein Zusammengesetztes Bild erstellt. Dabei kann die Zusammensetzung aus einzelnen geometrisch versetzten Bildern, für die Erstellung eines Mosaiks, bestehen oder auch

aus Aufnahmen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten, für eine optimierte Auflösung des Farbraumes und der Korrektur von Kameraeinflüssen, berechnet werden. In diesem Schritt erfolgt auch die Aufteilung in die einzelnen Farbkanäle.

2.6.2 Bildkorrektur

Bei der Aufnahme von Bildern kommt es zu verschiedenen Effekten die ein Bild verfälschen. Hierzu zählen eine ungleichmäßige Belichtung und eine zur Normalen abweichenden Perspektive. Letzteres stellt bei der Analyse von Schlifffbildern keine Problematik dar. Die Helligkeitskorrektur erfolgt durch die Bestimmung der Lichtintensität über das Bild und der Anhebung der Helligkeit in den Bereichen mit verminderter Ausleuchtung anhand der zuvor bestimmten Abweichung.

2.6.3 Definition des Analysebereiches

Für die Auswertung wird selten das ganze Bild benötigt, oder es werden nur Ausschnitte dessen verwendet. Daher wird in diesem Schritt eine Sektion aus dem Kompositbild kopiert und für die weiteren Schritte herangezogen.

2.6.4 Filtern und Maskieren

Viele Analysealgorithmen arbeiten über Gradienten der Intensität, jedoch sind meist nur Übergänge in einem Intensitätsbereich von Interesse. Dazu wird mit Hilfe von Schwellwertfiltern, die verschiedene Intensitätsbereiche eingrenzen, und Masken, welche unrelevante Übergänge verdecken gearbeitet. Dies geschieht meist abwechselnd, bis nur mehr der zu analysierende Bereich im Bild vorliegt. Bei der Bestimmung von Porositäten werden zum Beispiel auf diesem Weg intermetallische Phasen maskiert.

2.6.5 Analysealgorithmus

In diesem Schritt wird das aufbereitete Bild mit Hilfe verschiedenster Algorithmen gezielt auf Merkmale untersucht. In dieser Arbeit wird vorwiegend auf Kantendetektion gesetzt. Im Folgenden sind einige dafür mögliche Verfahren aufgelistet.

- Sobel-Operator
- Scharr-Operator
- Laplace-Operator
- Canny-Algorithmus
- Snake-Algorithmus

2.6.6 Auswertung

Nach der Ausarbeitung der Merkmale werden diese nun quantifizierbar gemacht, im Falle einer Kontur wird diese nun zu einem Polygonzug umgewandelt. Dieser kann anschließend weiter hinsichtlich seiner Geometrie ausgewertet werden, wie zum Beispiel dessen Fläche für die Porosität, oder auch die Höhenlinie einer Beschichtung.

2.6.7 Kontrolle

Die Ergebnisse der Auswertung müssen kontrolliert werden, da es aus verschiedensten Gründen zu Fehlern kommen kann. In dieser Arbeit erfolgt dies meist anhand einer Plausibilitätsprüfung und einer Betrachtung der geometrischen Proportionen der Kurven. Die Korrekturfunktion versucht anschließend, abhängig vom aufgetretenem Fehler, diesen zu korrigieren. Bei der Porositätsanalyse wird zum Beispiel der Threshold des Filters schrittweise erhöht und die Änderung der betroffenen Pixel gezählt, leitet man diese Kurve numerisch ab, erhält man mit dem Punkt des Maximums den optimalen Schwellwert für die Analyse. Kann mit der automatischen Korrektur kein ausreichendes Ergebnis erzielt werden, ist eine manuelle Auswertung notwendig. Zusätzlich zu den Werten des Ergebnisses ist oft auch eine graphische Darstellung derer in dem eigentlichen Bild von Interesse. Dazu werden die vorher bestimmten Polygonzüge als Overlay im Arbeitsbild gezeichnet und können mit den Messergebnissen ergänzt werden.

2.6.8 Haftfestigkeit

Für die Bestimmung der Haftfestigkeit kommt ein Haftprüfgerät zum Einsatz. Die Bestimmung der Haftfestigkeit geschieht durch die Belastung eines geometrisch definierten Bereiches der Schicht bis zum Versagen dieser. In Abbildung 2- 16 ist der Ablauf des Versuches schematisch dargestellt und die einzelnen Schritte werden in den nachfolgenden Absatz kurz erläutert. Dieses Verfahren entspricht der Norm EN 1542.

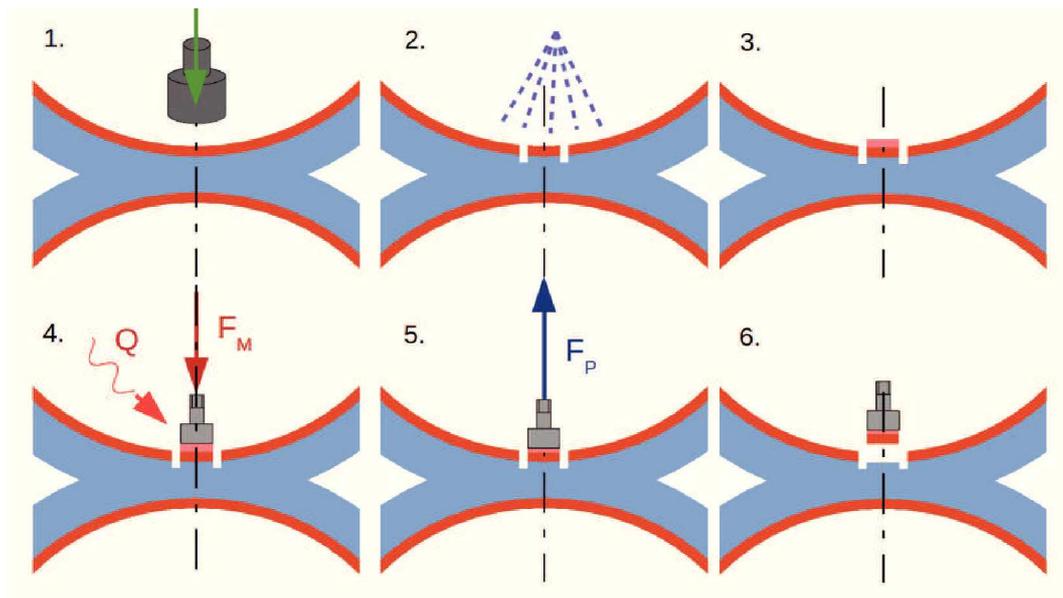


Abbildung 2-16: Ablauf Haftfestigkeitsprüfung: (1) Freischneiden, (2) Reinigen, (3) Aufbringen der Kontaktschicht, (4) Verkleben des Stempels, (5) Zugbelastung, (6) Beurteilung der Bruchoberfläche

Im ersten Schritt wird die der Bereich um die Prüffläche mit einem Fräser bis zum Grundmaterial abgetragen um nur die Haftfestigkeit des Schicht bestimmen zu können. Anschließend erfolgt die Reinigung der Prüfstelle um etwaige Späne und Schmierstoffe zu entfernen. Auf die saubere und getrocknete Probenoberfläche wird der Klebstoff in Form einer vorgestanzten Folie aufgebracht, und mit dem Prüfstempel unter Druck und erhöhter Temperatur verbunden. Nach erfolgter Aushärtung des Klebstoffes erfolgt die eigentliche Haftprüfung. Hierzu wird die Abziehapparatur mit dem Stempel verbunden und die notwendige Kraft zum Ablösen dessen gemessen. Die beschädigte Probenfläche wird nun untersucht, um sicherzustellen welche Haftfestigkeit gemessen wurde. Die verschiedenen Formen der Versagensmöglichkeiten sind in Abbildung 2-17 abgebildet.

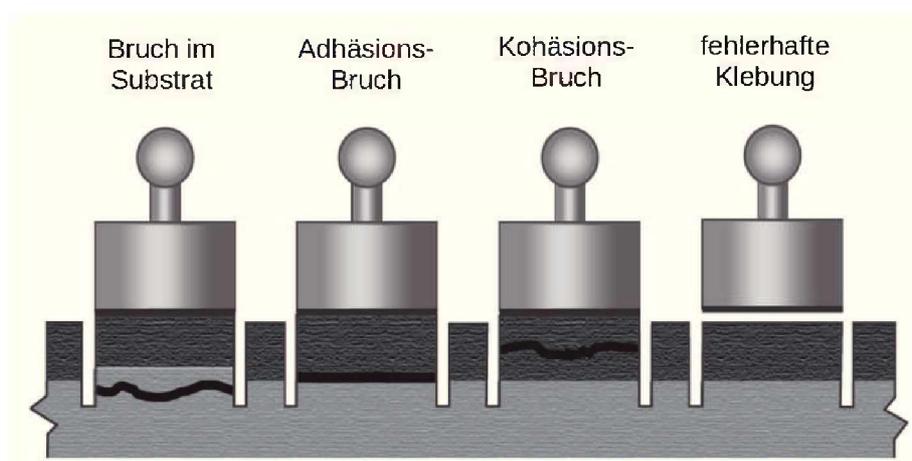


Abbildung 2-17: Brucharten der Beschichtung während der Prüfung[18].

2.7 Quantifizierung von Oberflächen

Nachfolgend werden die gebräuchlichsten Kennwerte für die Beschreibung der Oberflächentopologie kurz erläutert.

2.7.1 Arithmetischer Mittenrauwert R_a

Dieser beschreibt die mittlere Abweichung des Profils von der mittleren Linie. Er berechnet sich wie in Gleichung 2.1 angeschrieben[29].

$$R_a = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} |z(x)| dx \quad (2.1)$$

Der Wert l_n entspricht der Bezugsmessstrecke. In Abbildung 2-18 ist ein solcher arithmetischer Mittenrauwert beispielhaft eingezeichnet. Anzumerken ist, dass die Bezugslinie für die Bestimmung hier der mittlere Schichthöhe entspricht.

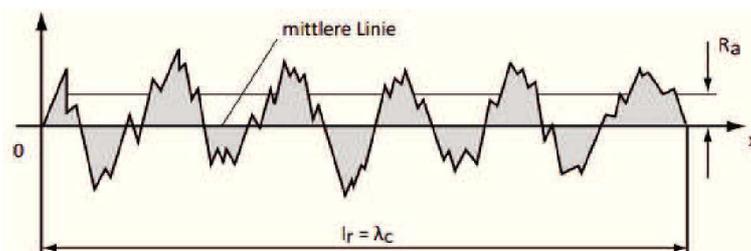


Abbildung 2-18: Bildung des arithmetischen Mittenrauwert[29].

Der arithmetische Mittenrauwert eignet sich nicht für die Beschreibung der Morphologie der Oberfläche da er weder Spitzen noch Riefen unterscheiden kann[29].

2.7.2 Quadratischer Mittenrauwert R_q

Er berechnet sich aus der quadratischen Abweichung zum Mittelwert der Profilabweichung, er zeichnet sich durch eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Spitzen und Riefen aus. Seine Berechnung erfolgt nach der Gleichung 2.2 .[29]

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} z^2(x) dx} \quad (2.2)$$

2.7.3 Gemittelte Rautiefe R_z

Hierbei wird die Messlänge in üblicherweise 5 gleich lange Segmente aufgeteilt. In jedem Segment wird der höchste und der niedrigste Messwert bestimmt. Aus den erhaltenen Mess-

ergebnissen wird nach Gleichung 2.3 die gemittelte Rautiefe bestimmt.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_z(i) \quad (2.3)$$

In Abbildung 2-19 die einzelnen Segmente und deren Auswertung dargestellt.

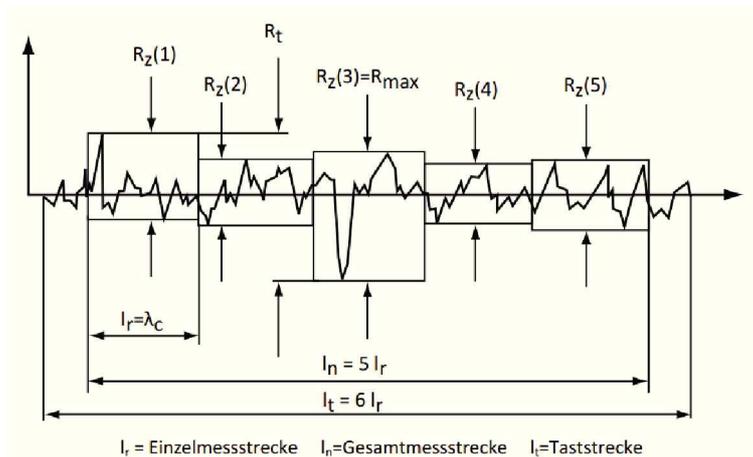


Abbildung 2-19: Bestimmung der gemittelten Rautiefe[29].

2.7.4 Abbott-Kurve

Mit dieser Auswertung ist es möglich die Materialverteilung über die Schichtdicke zu beschreiben und aus diesem Zusammenhang lässt sich die Porosität über die Schichthöhe ablesen. Diese berechnet sich nach Gleichung 2.4. Dabei steht c für die virtuelle Schnitttiefe.

$$Rmr(c) = \frac{100}{l_n} \sum_{i=1}^n MI_i(c) \quad (2.4)$$

Diese Funktion kann aber auch aus einem Histogramm der Messpunkte ermittelt werden, indem man die Breite der Klassen auf die Auflösung der Messung einstellt und die Ergebnisse nach der Schichthöhe geordnet aufsummiert.

$$Rmr(c) = \sum_{i=h_i}^{h_{max}-c} n_i \cdot i \quad (2.5)$$

Aus dieser Kurve können anschließend weitere Kennwerte bestimmt werden. Sie eignet sich am besten für die Beschreibung der Topologie von Oberflächen.

2.8 Beurteilungskriterien für die Meshqualität

Für die Ergebnisse und die Konfiguration einer Simulation ist die Meshqualität von großer Bedeutung. In den nachfolgenden Punkten sollen nun die wichtigsten Kenngrößen zu deren

Beurteilung und deren Auswirkung auf die Simulation beschrieben werden. Es wird jedoch nur auf die Kriterien für hexagonale Netze eingegangen, da diese in dieser Arbeit verwendet werden. Grundsätzlich beschreiben diese Kenngrößen die Abweichung der Zellen von einem idealen Würfel.

2.8.1 Seitenverhältnis

Diese berechnet sich nach der Gleichung 2.6, wobei a_i für die Flächen des einhüllenden Würfels stehen und v für das Volumen der Zelle selbst.

$$a_r = \frac{1}{6} \cdot \frac{|a_x| + |a_y| + |a_z|}{v^{\frac{2}{3}}} \quad (2.6)$$

Dabei bedeutet ein Wert von 1 einen idealen Würfel, hohe Werte deuten auf flache Elemente hin. Hierbei ist entscheidend wo diese flachen Elemente im Mesh auftreten, häufig sind dies Elemente die bei der Erstellung von fein aufgelösten Grenzschichten entstehen und dort keine Probleme verursachen, da hier sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Liegen diese Elemente in Bereichen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten, so verursacht dies eine drastische Reduktion der möglichen zeitlichen Schrittweite, da es für eine stabile Berechnung notwendig ist, dass eine Courantzahl, Gleichung 2.8, von 1 nicht überschritten wird[22].

$$C_o = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (2.7)$$

In Worten bedeutet dies, dass der Zeitschritt darf nicht größer sein als die Zeit die das Medium benötigt um die Zelle zu durchqueren.

2.8.2 Nichtorthogonalität

Diese beschreibt die Schiefstellung der verbindenden Fläche zwischen zwei Zellen. In Abbildung 2-20 ist eine polyedrische Zelle mit dem Normalvektor s_f der verbindenden Fläche und dem Vektor d_f zwischen den beiden Schwerpunkten dargestellt.

Die Nichtorthogonalität n_o beschreibt den Winkel zwischen diesen beiden Vektoren. Im Idealfall beträgt dieser 0, lässt sich aber in einem von einem Würfel abweichenden Mesh schwer realisieren. Als Grenzwert empfiehlt sich 65° [24], sollte aber im Mittel möglichst nahe bei 0 liegen, da die Schiefstellung einen Einfluss auf die Berechnung diffusiven Stofftransport hat[23].

$$\alpha_{NO} = \arccos\left(\frac{s_f \cdot d_f}{|s_f| \cdot |d_f|}\right) \quad (2.8)$$

Bei einer zu hohen Abweichung ist eine Korrektur dieses Fehlers notwendig. Dies geschieht

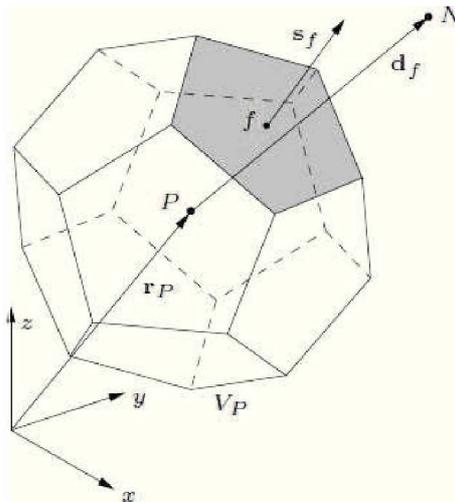


Abbildung 2-20: Polyeder mit Flächennormalen[23].

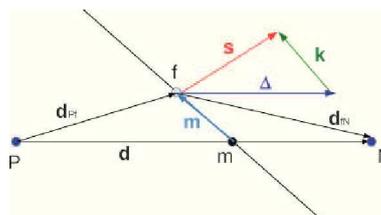
durch die Erweiterung des Terms für den diffusen Transport um einen Anteil der den Gradienten korrigiert. Dies lässt sich aber nur bei gleich großen Zellen explizit bestimmen, bei allen anderen ist ein iterativer Ansatz notwendig in dem der Stoffstrom mehrmals während eines Schrittes bestimmt werden muss. Dies ist ein Teilschritt des modifizierten PISO Ansatzes[23].

2.8.3 Schiefe des Meshes

Die Schiefstellung ξ im Mesh hat einen großen Einfluss auf die numerische Diffusion zwischen benachbarter Zellen. Sie berechnet sich nach Gleichung 2.9, aus dem Verhältnis aus dem Abstand der beiden Schwerpunkte und dem Abstand zum Mittelpunkt der Kontaktfläche beider.

$$\frac{1}{\xi} = \frac{|m|}{|d_f|} = \frac{|(f - P) \times (f - N)|}{|N - P|} \cdot \frac{1}{|d_f|} \quad (2.9)$$

In Abbildung 2-21 sind die Punkte und Vektoren eingezeichnet. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Abweichungen lässt sich die durch die Schiefstellung verursachte numerische Diffusion nur zu einem geringen Prozentsatz in der Berechnung[25] kompensieren. Dadurch ist es notwendig diese Fehlerquelle bereits bei der Mesherstellung möglichst gering zu halten. Es wird eine maximale Schiefstellung von 2-4 empfohlen[24].

Abbildung 2-21: Schiefevektor m zweier Zellen[23].

3 Experimentelle Methoden

In den kommenden Punkten werden die jeweiligen Vorgehensweisen der Erfassung der spezifischen Eigenschaften erläutert.

3.1 Temperaturmessung und Aufzeichnung

Für eine Abschätzung der Wärmeübergänge während dem Beschichtungsprozess werden die Motorblöcke mit Thermoelementen präpariert. In Abbildung 3-1 sind die verwendeten Stellen am Motorblock schematisch eingezeichnet.

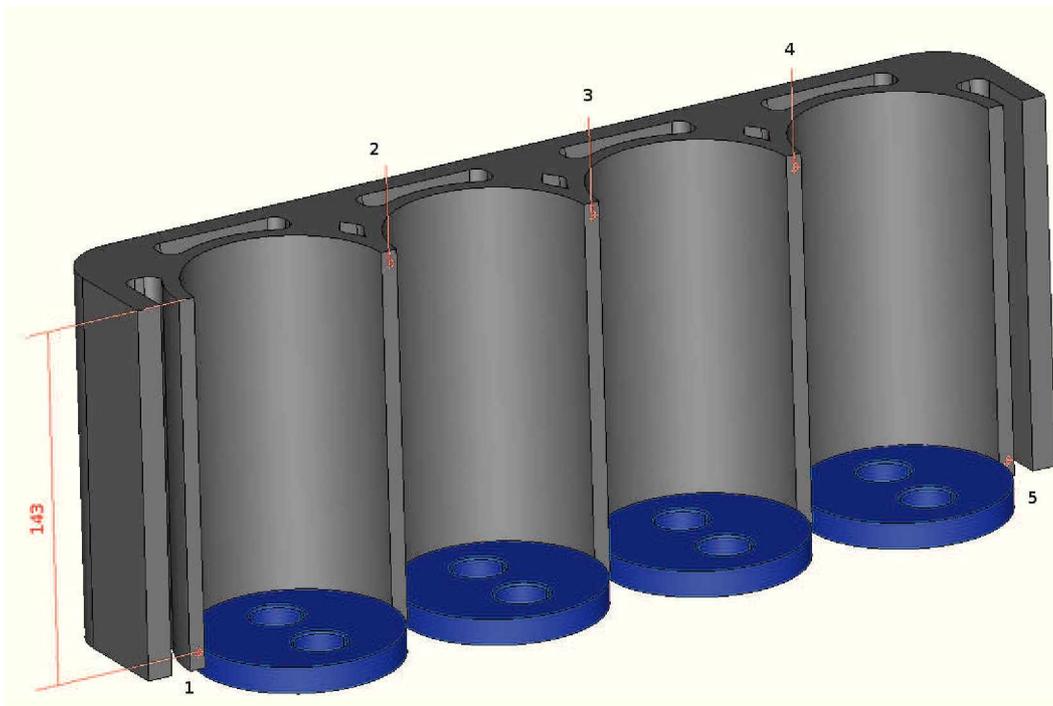


Abbildung 3- 1: Skizze mit Position der Messpunkte.

Für die Messung der Temperaturen kommen mit Edelstahl ummantelte Typ-K Thermoelemente zum Einsatz, die Aufzeichnung erfolgt mit einem Phoenix PTM 1010, mit einer zeitlichen Auflösung von 0.5sec .

3.2 Oberflächenvorbereitung

Um die Einflüsse von äußeren Verunreinigungen wie zum Beispiel Staub oder Spänen zu reduzieren werden die Zylinderlaufflächen gereinigt. Die Reinigung der aufgerauten Oberflächen erfolgt zweistufig. In einem ersten Schritt wird sie mit Bremsenreiniger behandelt und

mit Pressluft getrocknet. Im zweiten Schritt erfolgt die abschließende Reinigung mit Ethanol, um etwaige Öl und Fettreste zu entfernen.

3.3 Prozessparameter PTWA

Für die Beschichtungsreihen werden die Standardprozessparameter für diesen Zylinderdurchmesser verwendet, welche in Tabelle 3-I aufgelistet sind. Hierbei handelt es sich um eine Standardkonfiguration, wie sie bei der industriellen Beschichtung verwendet wird[19].

Tabelle 3-I: Prozessparameter PTWA.

Attribut	Offen	Geschlossen	Einheit
Gasdurchfluss	80	80	[l/min]
Gasdruck	10.8	10.8	[bar]
Anteil A_r	87.5	87.5	[%]
Anteil H_2	12.5	12.5	[%]
Pressluftdruck	9.6	9.6	[bar]
Pressluftstrom	1150	1150	[l/min]
Drahtvorschub	6.3	6.3	[m/min]
Drehzahl	562	562	[U/min]
Vorschub	3	3	[mm/U]

Die Anzahl an Übergängen pro Zylinder werden in Tabelle 3-II aufgelistet. Bei dem Durchgang mit 11 Wiederholungen handelt es sich um eine fehlerhafte Einstellung, welche noch während des Prozesszykluses auf die korrekte Einstellung von 7 Übergängen geändert wurde. Durch diesen Fehler ist es aber auch möglich die Änderung des Wärmeintrages mit steigender Schichtdicke und die mittlere Auftragsrate bestimmen zu können.

Tabelle 3-II: Übergänge.

Zylinder	Offen	Geschlossen	Einheit
1	7	11	[1]
2	7	7	[1]
3	7	7	[1]
4	7	7	[1]

3.4 Prozessparameter APS

Aufgrund der unzureichenden Ausbildung der Beschichtung über die ganze Lauffläche bei den PTWA Versuchen werden von der Firma Oerlikon Metco auch separate Versuche mit APS Beschichtungssystemen durchgeführt. Dabei werden drei verschiedene Sprühdüsen verwendet. Aufgrund der Zuführung des Materials als Pulver ist es hier auch möglich die Düse des Sprühdüsenkopfes angewinkelt auszuführen. Als Beschichtungswerkstoff wird der niedrig legierte

Kohlenstoffstahl XPT 512 eingesetzt. Es ist leider nicht möglich die vollständigen Prozessparameter von der Firma zu erhalten. Die vorhandenen Informationen werden nachfolgend in Tabelle 3- III kurz aufgelistet.

Tabelle 3- III: Prozessparameter APS.

Brenner	Zylinder	Förderrate	Fördergasmenge
90° Brenner F210	1	unbekannt	unbekannt
70° Brenner F210	2	unbekannt	unbekannt
HS1-Rotaplasma F210	3	55 [g/min]	5.5 [l/min]
HS1-Rotaplasma F210	4	120 [g/min]	5.5 [l/min]

3.5 Versuchsauswertung

3.5.1 Probenvorbereitung

Hierzu werden die beiden Motorblöcke Anfangs mit einer Bandsäge geteilt und die Längsschnitte in den Zylinderzwischenwänden für eine weitere Untersuchung entnommen. Die betreffenden Elemente sind in Abbildung 3- 2 dargestellt.

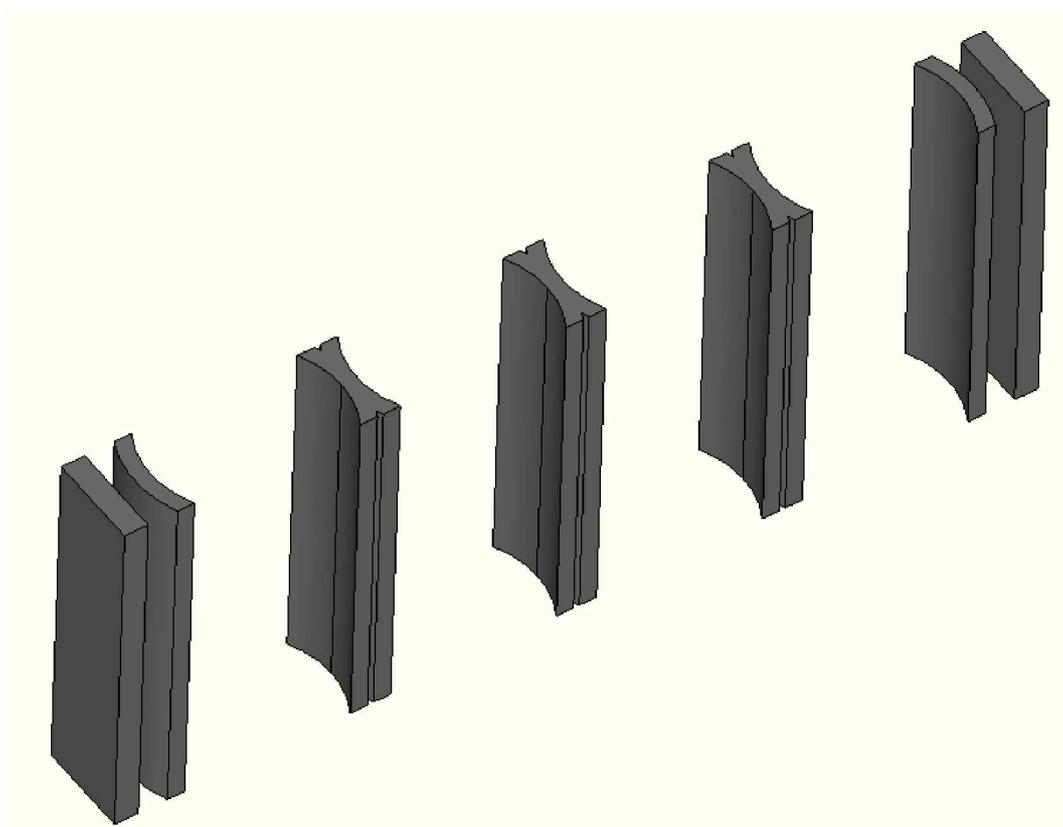


Abbildung 3- 2: Segmente des Zylinderlaufflächen.

Anschließend ist es notwendig die Segmente weiter zu teilen, um diese polieren zu können.

Hierzu werden die Segmente, wie in Abbildung 3-3 ersichtlich, mit einer Präzisionssäge geteilt. Somit ergeben sich pro Zylinder 4 Schnittflächen.

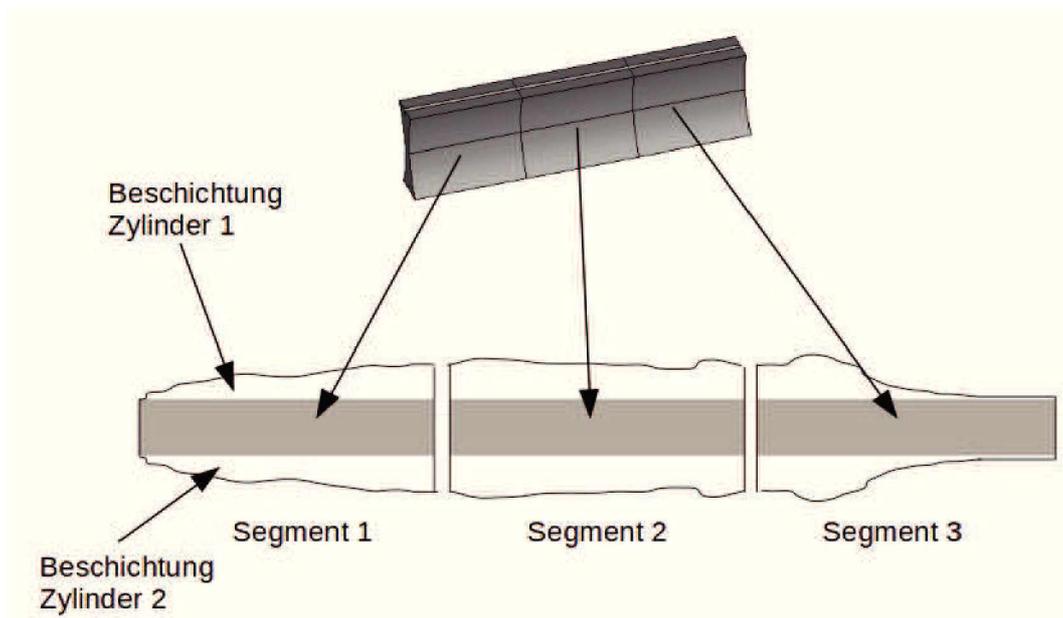


Abbildung 3-3: Segmente und resultierende Schnittflächen.

Nach erfolgtem Schnitt der Proben werden diese auf herkömmlichen Weg poliert. Ein Einbetten der Proben ist aufgrund ihrer Größe nicht notwendig. Für die nachfolgende Auswertung ist jedoch eine hohe Planheit der Probe auf der gesamten Länge notwendig, da ansonsten eine vollständig durchgehend fokussierte Aufnahme der Oberfläche nicht möglich ist.

3.5.2 Auswertung

Die Bestimmung der Schichtdicke erfolgt in mehreren Einzelschritten, welche in Abbildung 3-4 kurz aufgelistet werden. Dies wird durchgeführt, um eine statistische Analyse der Beschichtung zu ermöglichen. Dies wird durch eine geeignete statische Einstellung der Kamera erreicht.

3.5.3 Aufzeichnung

Um die Schichtdicke und Verteilung verschiedenster Ungängen exakt und positionsbezogen zu erfassen, muss die gesamte Schliffebene in einem Raster aufgenommen und digitalisiert werden. Die gewählte Auflösung pro Pixel beträgt hier $1.083\mu m$. Bei der Auswertung dieser Aufnahmen zeigte sich eine Schwäche des verwendeten Mikroskops. Einer der Schrittmotoren der die Position des Probentisches ansteuert, neigt dazu Schritte zu verlieren, dies ist dadurch problematisch, da die Position des Tisches nur relativ und nicht absolut erfasst wird. Bei der Auswertung kommt es deswegen zu überlappenden oder auch gänzlich falsch positionierten

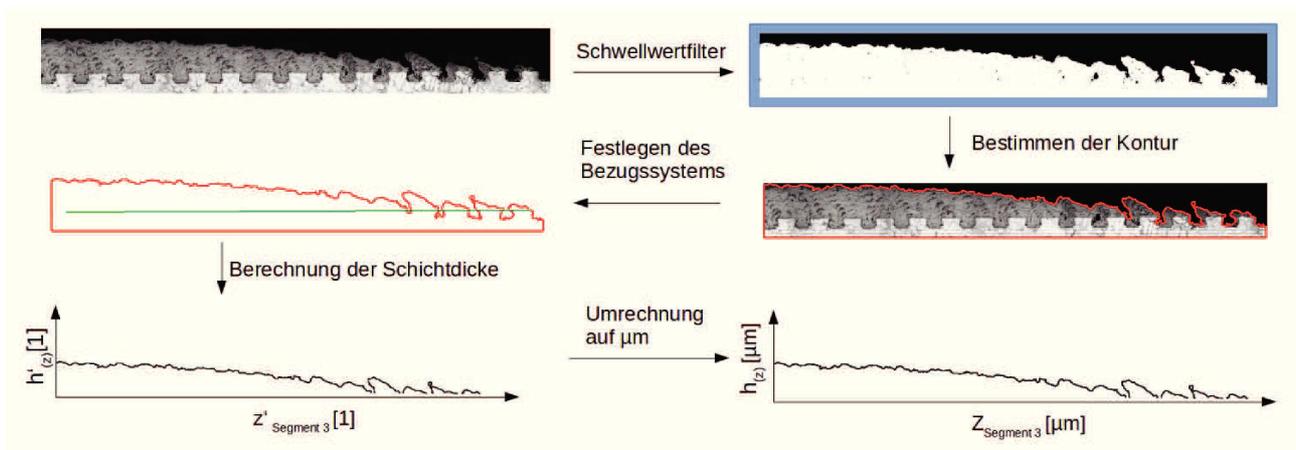


Abbildung 3-4: Ablaufschema Konturbestimmung.

Bildern. Dies macht es notwendig die Proben mehrmals zu erfassen. In Abbildung 3-5 ist eine fehlerhafte Erfassung beispielhaft abgebildet.

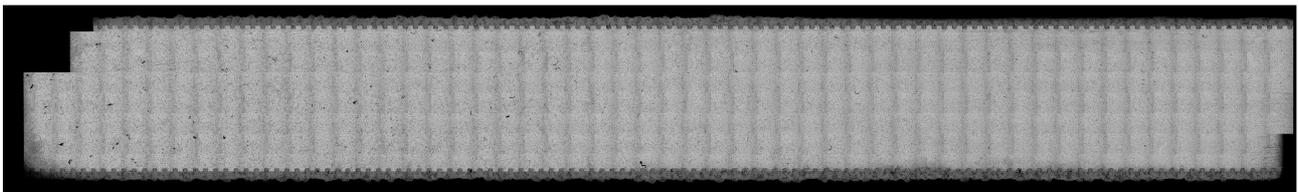


Abbildung 3-5: Fehlerhafte Positionsauflösung.

In Abbildung 3-6 ist eine korrekte Aufnahme, welche aus 700 Einzelaufnahmen besteht, dargestellt. Im unteren Bereich der Aufnahme sind die Ausnehmungen von der Haftzugprüfung erkennbar.

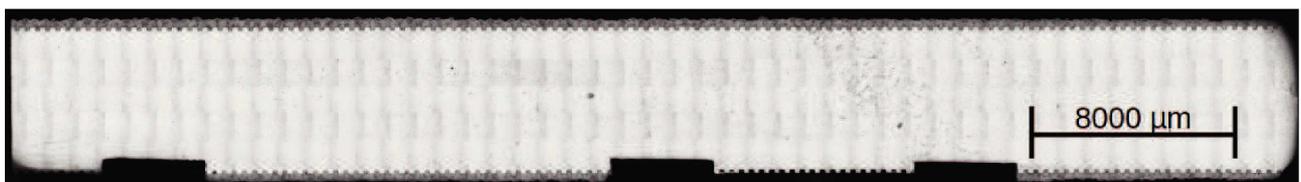


Abbildung 3-6: Korrekte Positionsauflösung.

3.5.4 Schwellwertfilter

Für die nachfolgende Bestimmung der Kontur ist es für die Erzielung der gewünschten Genauigkeit notwendig die Grauwerte mittels eines Schwellwertfilters in einen Bereich mit Material und einem ohne zu trennen. In Abbildung 3-7 ist ein solches gefiltertes Binärbild dargestellt. Hierbei handelt es sich nur um ein Ausschnitt des gesamten Bildes.



Abbildung 3-7: Gefiltertes Schlibfbild.

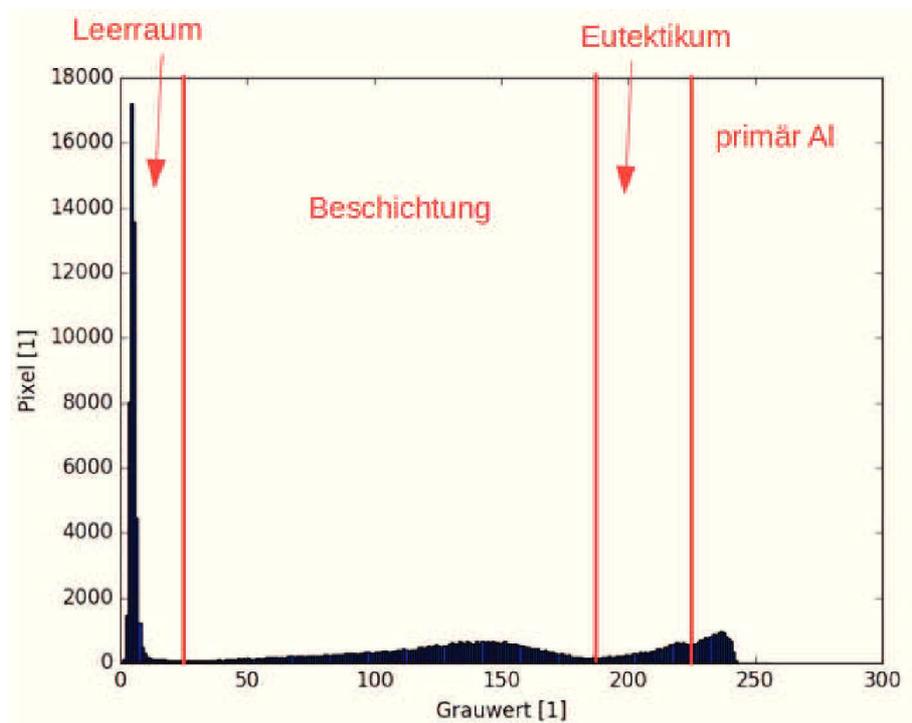


Abbildung 3-8: Histogramm.

Durch den großen Abstand der einzelnen Farbräume kann eine scharfe Trennung der einzelnen Bereiche, wie in Abbildung 3-8 eingezeichnet, erzielt werden.

Für die Auswertung wird der unkomprimierte rote Kanal verwendet. Dieser zeigt die schärfste Trennung zwischen den auftretenden Phasen.

3.5.5 Bestimmung der Kontur

Für das Erkennen der Kontur kommt die OpenCV Implementation des Algorithmus von S. Suzuki und K. Abe[21] zum Einsatz. In Kombination mit dem gefilterten Bild ist es somit möglich die Kontur als hoch aufgelöstes Polygon zu erhalten. Nachfolgend wird der Bereich des Programms aufgelistet der die Kontur erfasst.

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 import sys
3 sys.path.append(dirname("/usr/local/lib/python2.7/site-packages/"))
4 import numpy as np
5 import cv2
6
7 class EvaluateSprayContour:
8     def __init__(self):
9         #load setup, etc
10
11     def getSprayContour(self, image):
12         ret, thresh = cv2.threshold(image, 10, 255, cv2.THRESH_BINARY)
13         im2, contours, hierarchy = cv2.findContours(thresh, mode=cv2.RETR_TREE, method=cv2.CHAIN_APPROX_NONE)
14         areas = [cv2.contourArea(c) for c in contours]
15         max_index = np.argmax(areas)
16         cnt=contours[max_index]
17         return cnt

```

Algorithmus 1: Konturbestimmung

3.5.6 Festlegen des Bezugssystems

Da die Schliffbilder nicht exakt parallel zur Zylinderachse liegen und ein Drehen des Bildes durch die dabei notwendige Interpolation zu Verfälschungen im Messergebnis führt, wird eine Bezugsachse definiert. Dabei werden im ersten und im letzten Viertel jeweils eine Zahnflanke ausgewählt und ihr höchster Punkt ermittelt. Durch diese Punkte legt man nun eine Gerade, welche die Basislinie darstellt. Das Einrücken von den Enden des Schliffes ist notwendig, da in den oberen Bereichen der Segmente die Bohrung keinen konstanten Durchmesser besitzt und somit die Messung verfälschen. Für diesen Zweck wird ein kleines Werkzeug geschrieben, was eine Kontrolle und Definition der Systeme ermöglicht. In Abbildung 3-9 ist ein Screenshot dieses Programmes dargestellt.

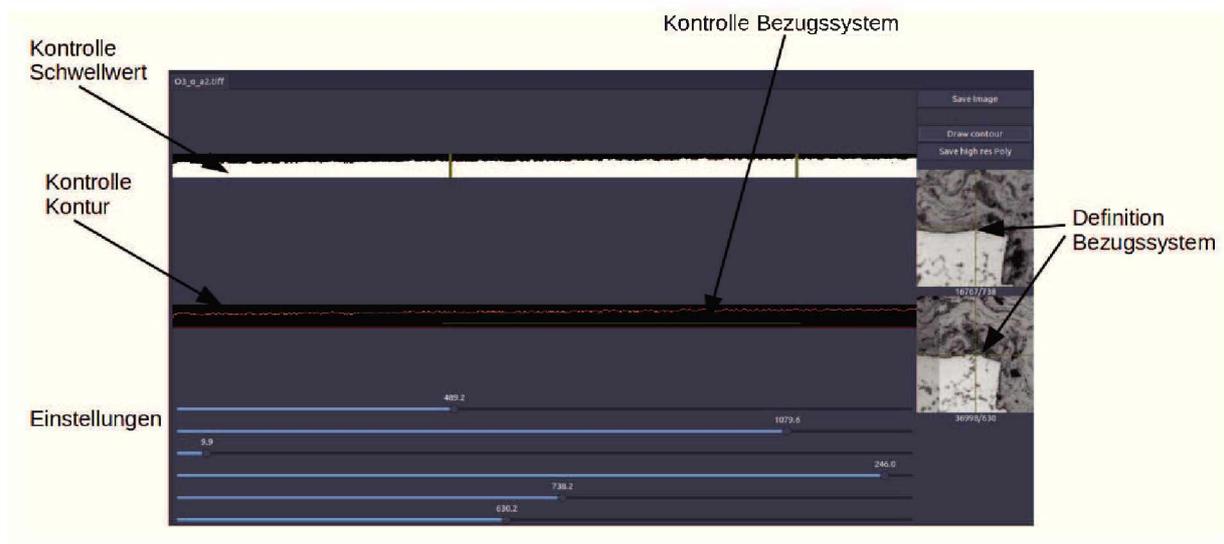


Abbildung 3-9: Hilfsprogramm Konturbestimmung.

Die Verifizierung der Messkurve erfolgt durch den Abgleich markanter Punkte im Schliffbild mit den Messpunkten der Kontur.

3.5.7 Berechnung der Schichtdicke

Die Höhe der Schichtdicke ergibt sich aus der Länge der Normalen zwischen einem Polygonpunkt und der Basislinie. Die endgültige Schichtdicke ergibt sich aus der Multiplikation mit der Auflösung des Mikroskops. Nach der Vermessung der einzelnen Segmente, können diese Teile wieder zu einer Gesamtkurve zusammengefügt. Anschließend kann die statistische Auswertung durchgeführt werden.

3.5.7.1 Porosität

Die Bestimmung der Porosität erfolgt analog zur Schichtdickenbestimmung. Dazu wird wieder ein Binärbild mit Hilfe eines geeigneten Schwellwertes eingestellt. Anschließend wird das Bild invertiert um die Poren eindeutig sehen zu können. Nach erfolgter Vorbereitung werden wie bei der Konturbestimmung die Konturen und Positionen der Poren erfasst. Die Messpositionen befinden sich in einem Abstand von 5mm zueinander und der jeweils analysierte Ausschnitt hat die Abmessungen $2000\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$. Dabei wird die Gesamtporosität separat, als Summe der Porositätspixel zur Analysefläche, erfasst, um den Fehler durch die Interpolation der Konturen zu vermeiden.

```

1 def getPores(self ,image):
2     et ,thresh = cv2.threshold(image,100,255,cv2.THRESH_BINARY)
3     im_th=thresh
4     im_floodfill = thresh.copy()
5     h, w = im_th.shape[:2]
6     mask = np.zeros((h+2, w+2), np.uint8)

```

```
7 cv2.floodFill(im_floodfill, mask, (0,0), 255);
8 im_floodfill_inv = cv2.bitwise_not(im_floodfill)
9 im_out = (im_th | im_floodfill_inv)/255.0
10 searchArea=image*im_out
11
12 ret, thresh = cv2.threshold(image,30,255,cv2.THRESH_BINARY)#searchArea
13
14 im2, contours, hierarchy = cv2.findContours(thresh,mode=cv2.RETR_TREE,method=cv2.
15 CHAIN_APPROX_SIMPLE)
16
17 areas = [cv2.contourArea(c) for c in contours]
18 max_index = np.argmax(areas)
19 contours=np.delete(contours,max_index,0) #remove the frame, it is not a pore
20 areas = np.delete(areas,max_index,0)
21
22 return areas, contours
```

Algorithmus 2: Porositätsbestimmung

3.5.7.2 Ungängen

Die Erfassung wird am Lichtmikroskop durchgeführt, dabei wird der Schichtaufbau stichprobenartig ausgewertet. Da eine genaue statistisch relevante Erfassung in dieser Größenordnung nicht sinnvoll machbar ist.

4 Simulation

Im Rahmen dieser Beschreibung sollen die verwendeten Modelle und Konzepte kurz beschrieben werden.

4.1 Softwarebasis

4.1.1 Preprocessing

Die Erstellung und Nachbearbeitung der involvierten Komponenten erfolgt mit Salome[36]. Dieses Paket eignet sich gut für die Generierung verschiedenster Meshe. Hier wird es nur für die Oberflächenmeshe der CAD Modelle verwendet. Dabei kommen die Algorithmen von Netgen 2D und Mephisto zum Einsatz. Aktuell werden die Oberflächen tetraedrisch mit einer Kantenlänge von 3mm vernetzt. Dies birgt den Nutzen, dass man eine stl-Oberfläche mit einer guter Abbildungsgüte der Konturen erhält. In Abbildung 4-1 sind einige der auf diesen Weg generierten Oberflächen dargestellt.

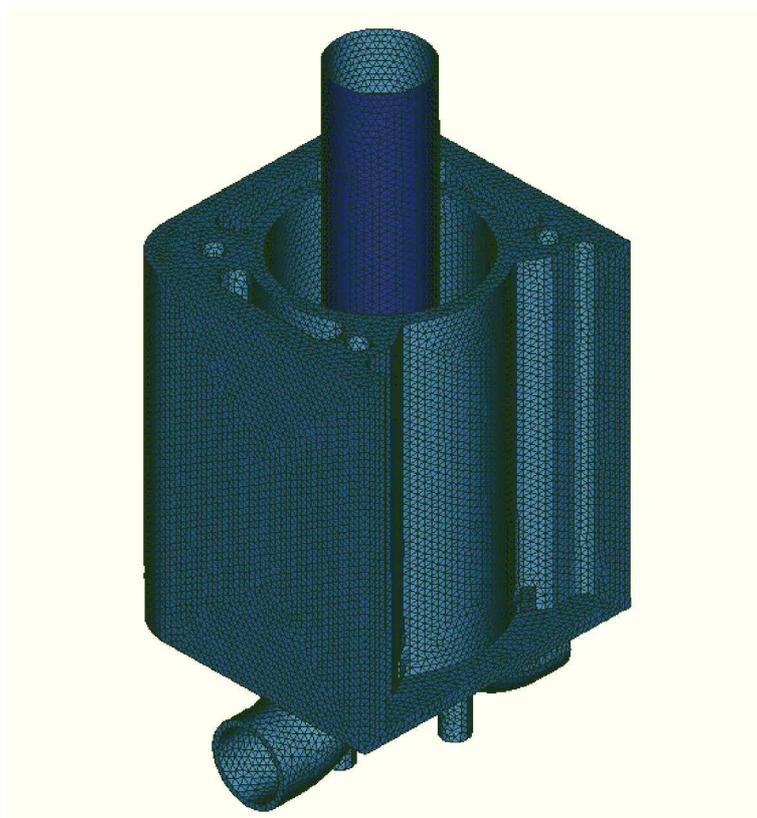


Abbildung 4- 1: Oberflächen Mesh.

Im darauf folgenden Schritt wird das Volumenmesh erstellt, dabei kommt die Software snappyHexMesh zum Einsatz, welches im Paket von OpenFoam enthalten ist. Dieses erstellt aus

den einzelnen Oberflächennetzen strukturierte hexaedrische Meshe mit viskosen Layern. In Abbildung 4-2 ist ein Schnitt durch ein solches Mesh abgebildet.

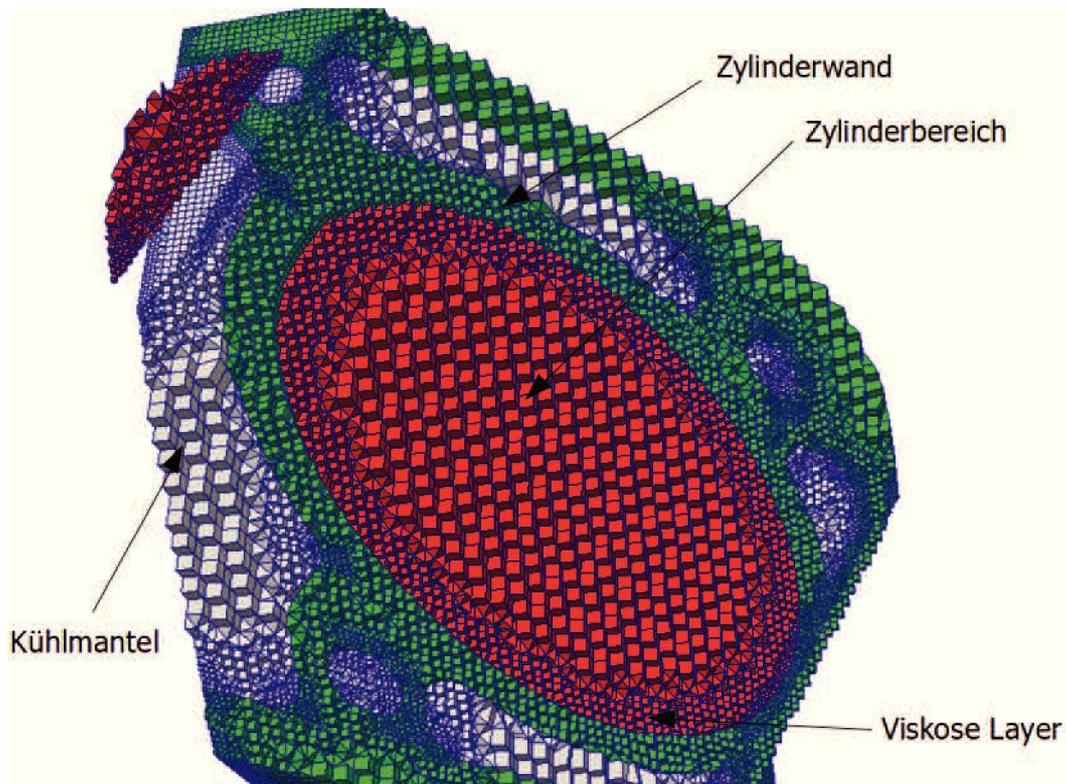


Abbildung 4-2: Volumenmesh.

4.1.2 Simulations Software

Hier kommt OpenFoam zum Einsatz[38]. Es zeichnet sich durch seine große Freiheit in der Konfiguration und Manipulation der Berechnung aus. Die Basis des verwendeten Solvers ist der chtMultiRegionFoam-Solver. Dessen Haupteinsatzgebiet ist die transiente Berechnung von Wärmeübergängen zwischen verschiedenen Bauteilen und Strömungsbereichen, ein klassischer Anwendungsfall ist die transiente Simulation eines Wärmetauschers. Er kann alle Wärmeübertragungsmechanismen abbilden und ist für turbulente Strömungen tauglich. Ein Nachteil der guten Konfigurierbarkeit des Pakets ist der in Vergleich zu anderen Simulationspaketen relativ hohe Aufwand bei der Erstellung und Verifizierung von Modellen.

4.1.3 Postprocessing

Für die graphische Darstellung der Ergebnisse wird ParaView verwendet[37], es wird unter der Führung der Sandia National Laboratories entwickelt und zeichnet sich mit seiner Flexibilität und Auswertewerkzeugen aus. Weiters erfolgt die Auswertung eines Teils der Ergebnisse

bereits während der Simulation durch OpenFoam, dies betrifft Stoffströme an den Ein- und Auslässen sowie die Zustände der Partikel.

4.2 Solver

Dieser besteht in der Basisausführung aus zwei einzelnen Solvern, einen für die Strömungssimulation und einen für die Wärmeleitung in Festkörpern. Aus der Problemstellung heraus wird dieser um zwei weitere Solver, einen für reagierende Gasgemische und einen für die Flugbahnen der Partikel, ergänzt. Außerdem wird auch noch der Solver sonicFoam verwendet. Dieser zeichnet sich durch die gute Darstellung von Schockwellen, wobei in der Hauptsimulation praktisch keine mehr auftreten, und der damit verbundenen Fähigkeit, große Druckgradienten berechnen zu können, aus.

4.2.1 Fluid

Die Basis für diesen Solver ist der PIMPLE-Algorithmus, er entstand aus der Kombination des SIMPLE- und des PISO-Solvers. Der Ablauf ist grob wie folgt:

- Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes
- Berechnung des Druckfeldes
- Neuberechnung des Geschwindigkeitsfeldes mit dem neuen Druckfeld
- Neuberechnung des Druckfeldes mit dem neuen Geschwindigkeitsfeld

Die Vorteile des Solvers sind seine Stabilität, die Möglichkeit mit größeren Zeitschritten zu rechnen und die Implementation verschiedenster Turbulenzmodelle. Der Nachteil ist das er in der Anfangsphase relativ langsam konvergiert und keine starken Druckschwankungen, wie zum Beispiel Schockwellen, darstellen kann. Neben dem Druck- und Temperaturfeld werden auch noch die Enthalpie für die Wärmeleitung und die Felder für die jeweiligen Turbulenzmodelle berechnet.

4.2.2 Solid

Dieser ist der einfachste Solver, er berechnet die Temperatur im Festkörper nach der Fourieschen Wärmeleitungsgleichung. Er ist auch der einzige Solver der nicht iterativ löst. Dies kann bei zu hohen Temperaturgradienten, beziehungsweise bei hohen Temperaturunterschieden zwischen zwei benachbarten Zellen, im Mesh zu Problemen führen und macht es somit notwendig hier lokal feiner aufzulösen.

4.2.3 Reacting

Hier handelt es sich um einen der umfangreichsten Solver im OpenFoam-Ökosystem. Sein primäres Aufgabengebiet ist die Verbrennungssimulation von Gasgemischen. Es sind auch Feststoff-Gasphasen-Modelle implementiert, sowie komplexe Schmelz und Verdampfungsmodelle. Der Rechenaufwand steigt mit der Komplexität des Reaktionsmodells stark an.

4.2.4 Lagrange

Dieser verwendet ein durch einen anderen Strömungssolver bereitgestelltes Viskositäts- und Geschwindigkeitsfeld und berechnet daraus die auf ein Partikel wirkenden Kräfte und resultierende Flugbahn. Die berücksichtigten Gleichungen können zum Beispiel auf die Temperatur des Partikels erweitert werden. Es wird jedes einzelne Partikel berechnet, daraus resultiert eine begrenzte Anzahl an zeitgleich aktiven Partikeln.

4.2.5 Kopplung

Die einzelnen Solver werden an den Übergangsbereichen der Zonen im Mesh über die Temperatur gekoppelt. Es erfolgt kein Stoffaustausch.

4.3 Düsensimulation

4.3.1 Modell

Diese Simulation dient zur möglichst genauen Bestimmung des Strömungsprofils am Düsenauslass. Dies beinhaltet die Gaszusammensetzung, Temperatur, Geschwindigkeit, turbulente kinetische Energie und deren Dissipationsrate. Das Druckfeld ist durch die besondere Bauform der Düse von geringer Interesse. Es handelt sich im Prinzip um eine zweistufige Lavaldüse die die im Gas enthaltene Druckenergie in Geschwindigkeit umsetzt, dadurch herrscht am Ende der Düse praktisch nur mehr atmosphärischer Druck. Dies dient auch zur Vereinfachung der Folgesimulation.

4.3.1.1 Vereinfachter Aufbau

Hier handelt es sich um eines der ersten Modelle, in diesem wurde die Geometrie und dessen Ausdehnung auf ein Mindestmaß reduziert, um die tatsächlichen Verhältnisse gerade noch abbilden zu können. Das Mesh wurde manuell erstellt und ist auf Geschwindigkeit optimiert. Es dient zum Testen von thermodynamischen Modellen, Startbedingungen und taugt auch für Parameterstudien. Für Parameterstudien wird sonicFoam verwendet, dies birgt den Nachteil, dass keine Gasgemische direkt gerechnet werden können. Es müssen die von der Temperatur abhängigen thermodynamischen Daten des Gemisches im Vorhinein berechnet werden. In Abbildung 4-3 ist das Ergebnis, bei einem Einsatz von 100 % Argon, dargestellt.

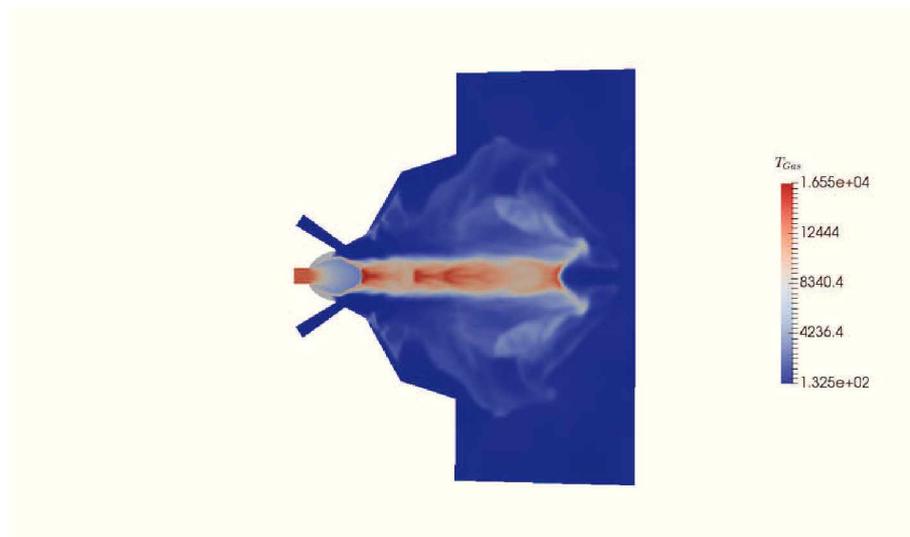


Abbildung 4-3: Gastemperatur bei 100 % Argon.

4.3.1.2 Detaillierter Aufbau

Bei diesem Mesh wird die tatsächliche Düsengeometrie deutlich besser abgebildet, der Nachteil ist, dass die Zellenanzahl ansteigt und eine manuelle Meshoptimierung nur begrenzt möglich ist. In Abbildung 4-4 sind die Patches für die Düse dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die gesamte Düsengeometrie an ihren Symmetrieebenen geviertelt wurde. Somit wird auch der Rechenaufwand auf das gleiche Maß reduziert.

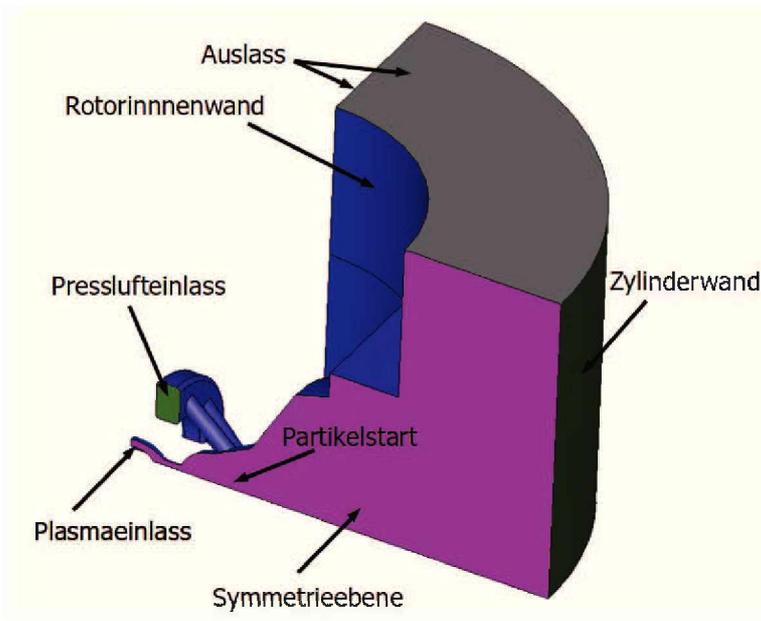


Abbildung 4-4: Oberflächenelemente der Düse.

In der nachfolgenden Abbildung 4-5 wird das Stickstofffeld dargestellt, hier handelt es sich um eine reactingFoam Simulation, diese kann nun die Durchmischung der einzelnen Gase besser darstellen, zeigt aber Schwächen bei hohen Druckgradienten. Zudem stellt sie den eigentlichen Beschichtungsstrahl fokussierter dar als er in Wirklichkeit ist.

4.3.1.3 Einflüsse

In den nachfolgenden Punkten wird kurz umrissen, welche Einflüsse berücksichtigt und welche vernachlässigt werden.

berücksichtigte Einflüsse:

- temperaturabhängige Stoffwerte
 - Wärmekapazität C_p
 - Wärmeleitfähigkeit λ
 - Viskosität μ

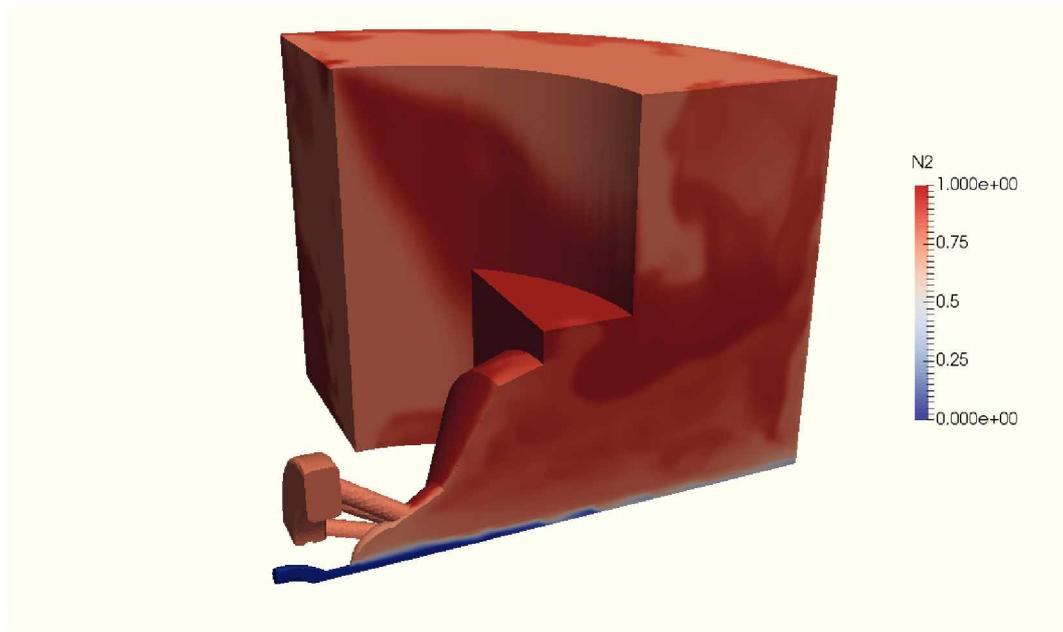


Abbildung 4- 5: Stickstoffverteilung.

- Rückstau durch die Zylinderwand
- turbulente Strömung

nicht berücksichtigte Einflüsse:

- Wärmestrom über die Düsenwand, Fehler ist gering durch adhärierende Schicht
- Ionisation des Gases, im Modell möglich, zu hoher Rechenaufwand
- Verbrennung von H_2 , im Modell möglich, zu hoher Rechenaufwand
- Oxidation der Partikel, im Modell möglich, zu hoher Rechenaufwand
- Einfluss der Partikel auf die Strömung, Effekt zu gering, Fehler vertretbar

4.3.2 Mesh

Hierbei kommen zwei verschiedene Meshe zum Einsatz, das Erste dient für Parameterstudien und ist auf Rechengeschwindigkeit getrimmt und das Zweite dient für eine möglichst realistische Darstellung der Turbulenzen am Übergang und benötigt einen höheren Rechenaufwand. Sämtliche Meshe sind hexaedrisch ausgeführt. Dies ist der reduzierten Rechenzeit und der Reduktion der numerischen Diffusion in den Randzonen geschuldet.

4.3.2.1 Vereinfachtes Mesh

Hier wird ein 18° Ausschnitt der Düse, die entspricht dem halben Abstand zwischen zwei Zerstäuberdüsen, mit blockMesh erstellt. Dazu werden die Punkte der einzelnen Blockgruppen

sowie die lokale Auflösung der Zellen manuell eingegeben. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Möglichkeit die Zellengröße entlang der Expansion und der somit verbundenen steigenden Geschwindigkeit in der lokalen Auflösung anpassen zu können. Dadurch ist es möglich trotz einer hohen Strömungsgeschwindigkeit mit vernünftigen Zeitschritten arbeiten zu können. Dieses Mesh ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Wobei ersichtlich ist, dass die Vergrößerung der Zellen der Expansion des Gases folgt.

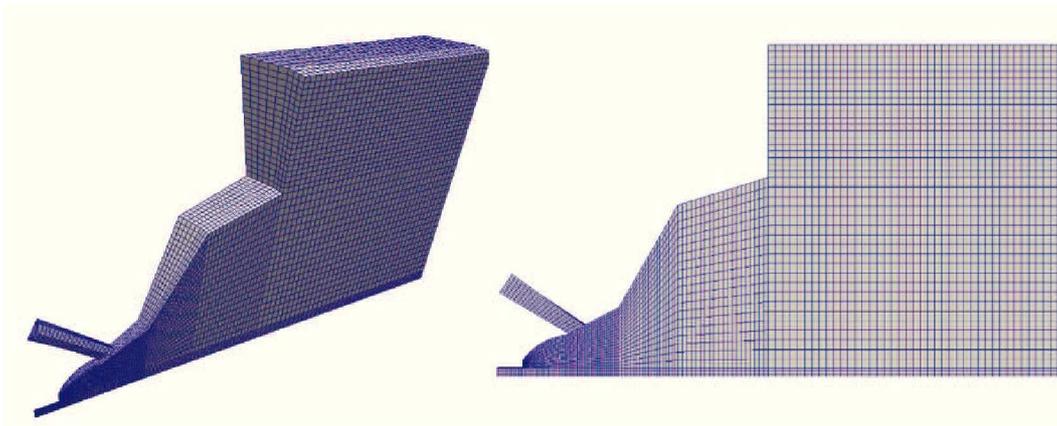


Abbildung 4-6: Vereinfachtes Mesh.

In der nachfolgenden Tabelle 4- I sind die Eigenschaften des Meshes aufgelistet. Die maximale Nichtorthogonalität liegt mit 69 in einem vertretbaren Bereich, der Durchschnitt befindet sich in einem guten Bereich, und die größte Schiefstellung mit 3.6 ist für ein keilförmiges hexagonales Mesh gut. Hervorzuheben ist, das mit 31045 Zellen die Details noch gut abgebildet werden.

Tabelle 4- I: Mesheigenschaften vereinfachtes Mesh.

Parameter	Wert	Einheit
Punkte	36552	[1]
Flächen	98426	[1]
Zellen	31045	[1]
Patches	7	[1]
kleinstes Zellvolumen	$1.8E - 13$	$[m^3]$
größtes Zellvolumen	$5.4E - 10$	$[m^3]$
maximale Nichtorthogonalität	69	[1]
durchschnittliche Nichtorthogonalität	20.7	[1]
größte Schiefstellung	3.6	[1]

4.3.2.2 Detailliertes Mesh

Die Erstellung dieses Meshes erfolgt auf einem anderen Weg. Hierfür wird zuerst ein CAD-Modell, Abbildung 4-7 , erstellt. Die Proportionen werden aus dem Patent entnommen und

auf den vorhandenen Bohrungsdurchmesser skaliert und entspricht auch in den Aussenabmessungen dem realen Brennerkopf.

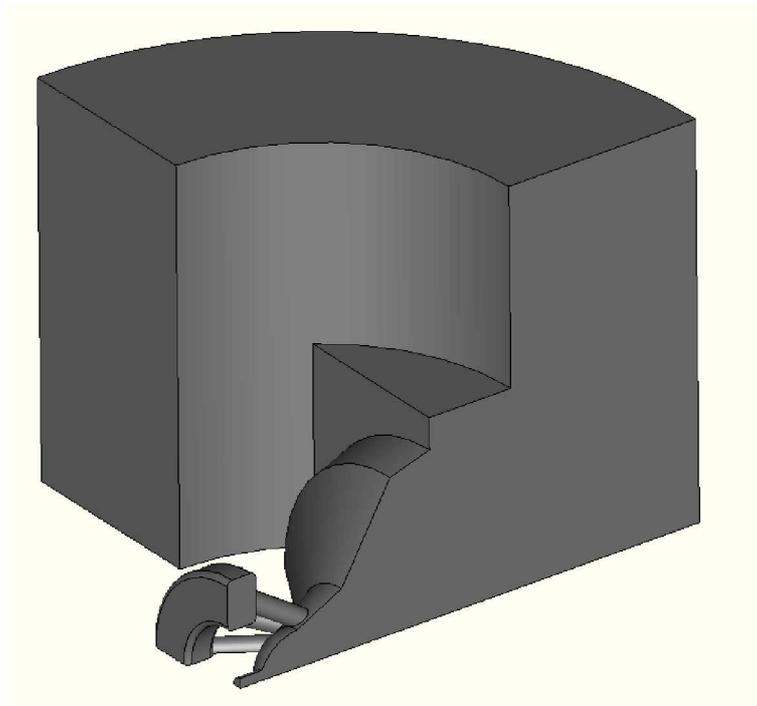


Abbildung 4-7: Geometrie Düse Viertelschnitt.

Anschließend werden die Aussenflächen des Modells mit Hilfe des Mephisto-Algorithmus und einer Kantenlänge von 0.3mm in ein trianguläres Oberflächenmesh umgewandelt. Die hohe Auflösung hat hier keinen Effekt auf die spätere Meshauflösung, führt aber zu einer besseren Abbildung der Geometrie im fertigen Mesh. Dieses, in Abbildung 4-8, dargestellte Netz wird für die Erstellung des hexaedrischen Meshs durch snappyHexMesh benötigt.

Anschließend wird das Hintergrundmesh mit blockMesh generiert. Dieses dient als Basis für die Orientierung der Zellen im späteren Mesh. Hier wird auch die Grundgröße für die maximale Zellengröße festgelegt, in diesem Fall 1.5mm . Dieses Mesh wird in Abbildung 4-9 dargestellt.

In snappyHexMesh werden nun das Oberflächenmesh und das Hintergrundmesh importiert, die Patches definiert, Viskositätslayer eingefügt und lokale Verfeinerungszonen des Meshes festgelegt. Es können noch mehr Operationen durchgeführt werden, welche hier aber nicht weiter ausgeführt werden. Das fertige Mesh wird in Abbildung 4-10 dargestellt.

Die Eigenschaften des Meshes werden in der Tabelle 4-II aufgelistet. Die Werte für die Meshqualität sind hier durchwegs positiv. Nur die maximale Nichtorthogonalität ist mit 71 erhöht, die sinnvolle Grenze liegt bei 90, darüber hinaus steigt der Korrekturaufwand und auch die Rechenzeit der Simulation exponentiell an.



Abbildung 4-8: Oberflächenmesh Düse Viertelschnitt.

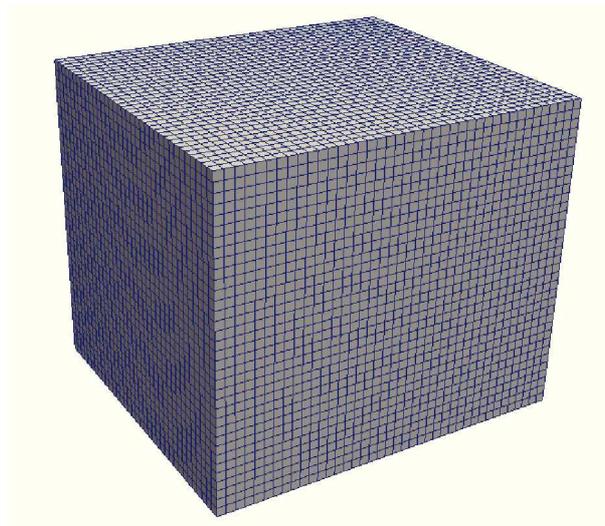


Abbildung 4-9: Hintergrundmesh Düse.

Tabelle 4- II: Mesheigenschaften detailliertes Mesh.

Parameter	Wert	Einheit
Punkte	207152	[1]
Flächen	537383	[1]
Zellen	166852	[1]
Patches	8	[1]
kleinstes Zellvolumen	$7.4E - 13$	$[m^3]$
größtes Zellvolumen	$4.3E - 9$	$[m^3]$
maximale Nichtorthogonalität	71	[1]
durchschnittliche Nichtorthogonalität	9.6	[1]
größte Schiefstellung	3.0	[1]

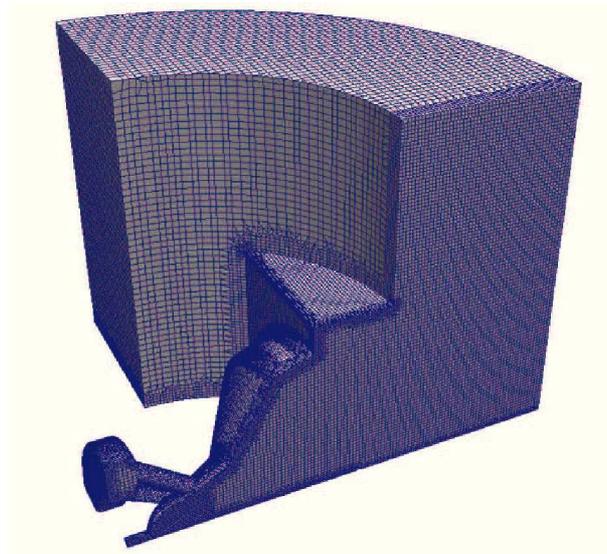


Abbildung 4- 10: Detailliertes Mesh Düse.

4.3.3 Randbedingungen

Die Randbedingungen sind für beide Meshe identisch, nur das detaillierte Mesh besitzt eine Symmetrieebene mehr. In den kommenden Unterpunkten werden die einzelnen Zonen und deren Randbedingungen kurz erklärt.

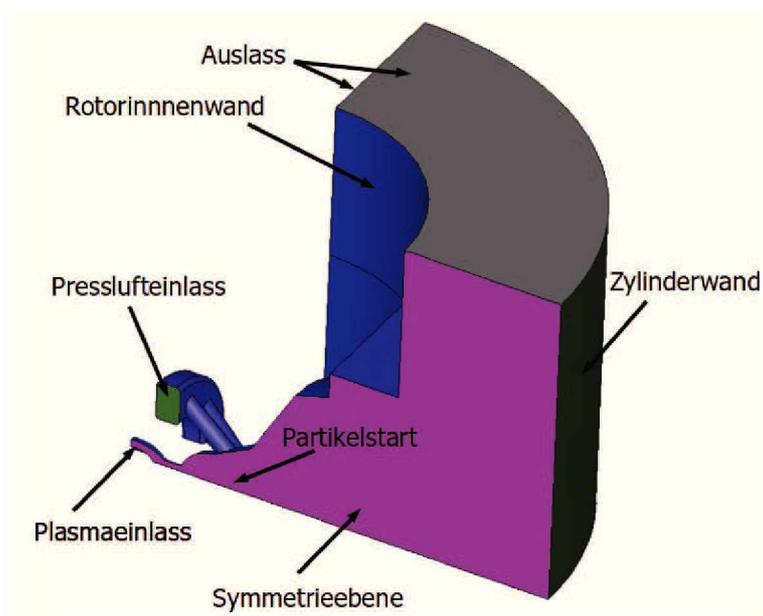


Abbildung 4- 11: Patche Düse.

4.3.3.1 Plasmaeinlass

An diesem Patch wird das Plasma per Definition eingebracht. Der Stoffstrom wird in dieser Simulation über den Druck gesteuert, da es bei dem geringen Querschnitt, den hohen Strömungsgeschwindigkeiten und der turbulenten Wandfunktionen am Eintritt ansonsten zu Instabilitäten der Simulation kommt und der Solver häufig abstürzt. Dieses Verhalten kann über ein definiertes Geschwindigkeitsfeld vermieden werden, jedoch muss dieses Feld für jede Einstellung neu berechnet werden, zudem ist das tatsächliche Profil hier nicht bekannt. Daher wird hier nur der Druck vorgegeben und die Strömung kann sich in den ersten Millimetern der zentralen Bohrung selbst ausbilden.

Tabelle 4- III: Randbedingungen Plasmaeinlass.

Feld	Bedingung	Wert	Einheit	mathematischer Ausdruck
U	zeroGradient	–	$[m/s]$	$\nabla \vec{U} = 0$
p	fixedValue	$12.1E5$	$[Pa]$	$p = Value$
T	fixedValue	$16.8E3$	$[K]$	$T = Value$
k	fixedValue	$4.6E-3$	$[m^2/s^2]$	$k = Value$
ϵ	fixedValue	$3.7E-1$	$[m^2/s^3]$	$\epsilon = Value$

4.3.3.2 Presslufteinlass

Aufgrund des Ringverteilers für die Pressluft wird hier der gleiche Ansatz wie für den Plasmaeinlass verfolgt. Zudem ist man bei dieser Vorgehensweise nur gering von der tatsächlichen Geometrie des Verteilers abhängig.

Tabelle 4- IV: Randbedingungen Presslufteinlass.

Feld	Bedingung	Wert	Einheit	mathematischer Ausdruck
U	zeroGradient	–	$[m/s]$	$\nabla \vec{U} = 0$
p	fixedValue	$2.6E5$	$[Pa]$	$p = Value$
T	fixedValue	$0.3E3$	$[K]$	$T = Value$
k	fixedValue	$3.1E-7$	$[m^2/s^2]$	$k = Value$
ϵ	fixedValue	2.05	$[m^2/s^3]$	$\epsilon = Value$

4.3.3.3 Physikalische Wände

Dies betrifft die Patche für die Rotorinnenwand und die Zylinderwand. Da hier nur die Temperaturverteilung und die Strömungsbedingungen am Düsenauslass von Interesse sind, werden diese beiden Wände als adiabat betrachtet. Es tritt eine Abkühlung des Gases bei der Förderung durch die zentrale Bohrung auf, jedoch sind zu der notwendigen Kühlleistung keine

Daten vorhanden und eine fehlerhafte Schätzung würde das Ergebnis stärker verfälschen als eine adiabatische Annahme.

Tabelle 4- V: Randbedingungen physikalische Wand.

Feld	Bedingung	Wert	Einheit	mathematischer Ausdruck
U	fixedValue	0	$[m/s]$	$\vec{U} = 0$
p	zeroGradient	–	$[Pa]$	$\nabla p = 0$
T	zeroGradient	–	$[K]$	$\nabla T = 0$
k	kqRWallFunction	0.1	$[m^2/s^2]$	$k = \left(\frac{C_k}{\kappa} \times \log(y) + B_k\right) \times (\sqrt{C_{mu} k})$
ϵ	epsilonWallFunction	0.01	$[m^2/s^3]$	$\epsilon = \frac{1}{W} \sum_{f=1}^W \frac{C_{\mu}^{0.75} k^{1.5}}{\kappa y_i}$

4.3.3.4 Symmetrieebenen

Diese werden verwendet um nicht das komplette Volumen der Düsenzone berechnen zu müssen, dazu wird das Modell an den Symmetrieebenen geschnitten und in der Berechnung gespiegelt. Im Modell äußert sich dies, dass es keinen skalaren Transport durch die Symmetrieebene gibt und keinen Gradienten von Vektorfeldern normal zur Ebene.

Tabelle 4- VI: Randbedingungen Symmetrieebene

Feld	Bedingung	Wert	Einheit	mathematischer Ausdruck
U	symmetry	–	$[m/s]$	$\frac{\delta \vec{U}}{\delta \vec{n}} = 0$
p	symmetry	–	$[Pa]$	$\nabla p = 0$
T	symmetry	–	$[K]$	$\nabla T = 0$
k	symmetry	–	$[m^2/s^2]$	$\nabla k = 0$
ϵ	symmetry	–	$[m^2/s^3]$	$\nabla \epsilon = 0$

4.3.3.5 Auslass

Hier wird in OpenFoam die inletOutlet Randbedingung verwendet, sie entspricht grundsätzlich der zeroGradient Funktion, kann aber im Falle einer Strömung nach innen einen fixen Wert annehmen.

$$\Theta = \begin{cases} \frac{\delta \vec{U}}{\delta \vec{n}} < 0 & \nabla \Theta = 0 \\ \frac{\delta \vec{U}}{\delta \vec{n}} \geq 0 & \Theta = value \end{cases} \quad (4.1)$$

Θ ... beliebiger Skalar [1]

Tabelle 4- VII: Randbedingungen Auslass.

Feld	Bedingung	Wert	Einheit	mathematischer Ausdruck
U	inletOutlet	0	$[m/s]$	$\vec{U} = \vec{n} \cdot \Theta$
p	inletOutlet	1E5	$[Pa]$	Gleichung 4.1
T	inletOutlet	300	$[K]$	Gleichung 4.1
k	inletOutlet	0.1	$[m^2/s^2]$	Gleichung 4.1
ϵ	inletOutlet	0.01	$[m^2/s^3]$	Gleichung 4.1

4.3.4 Startbedingungen Düsensimulation

Da die Simulation die Ionisation des Plasmas nicht direkt rechnet, und erst nach dieser Stufe ansetzt müssen die Startbedingungen, sowie der Zustand des Plasmas nach dem Erhitzen berechnet werden. Aufgrund der hohen Gastemperatur wird von einem idealen Gas ausgegangen.

4.3.4.1 Berechnung der Wärmekapazität

Für die Berechnung der Plasmatemperaturen wird die tatsächliche Wärmekapazität des Gemisches benötigt. Diese wird mit Hilfe des new Janaf Modells[16], Gleichung 4.2 , berechnet.

$$c_p = R(a_1T^{-2} + a_2T^{-1} + a_3 + a_4T + a_5T^2 + a_6T^3 + a_7 + T^4) \quad (4.2)$$

R ... Gaskonstante $[kgm^2/s^2molK]$

a_i ... Koeffizienten $[T^{(-i+1)}]$

T ... Temperatur $[K]$

Die Wärmekapazität für ein Gemisch berechnet sich nach Gleichung 4.3 . Anzumerken ist, dass diese dann mit Hilfe der Molenbrüche und der Molmassen wieder auf J/kgK umgerechnet werden muss.

$$c_{p_{mix}} = \sum_{i=0}^n c_{p_i} \cdot \chi_i \quad (4.3)$$

χ_i ... Molenbruch Komponente i [1]

Dies ist eine simple Näherung, da die Stoffdaten aufgrund der mit der Temperatur steigenden Wechselwirkung des Plasmas mit dessen Elektronen nicht linear Abhängig sind. Eine verbesserte Abbildung dieses Verhaltens wird mit einem quadratischen Interpolationsansatzes erreicht. Dieser wird auch bei den Stoffdaten bei der Simulation verfolgt, jedoch nicht in der anfänglichen Berechnung der Starbedingungen.

4.3.4.2 Berechnung des Massenstroms

Die Formel für den Massenstrom durch eine Düse berechnet sich nach Gleichung 4.4 . Die Betrachtung erfolgt für eine adiabate Düsenströmung eines idealen Gases[32].

$$\dot{m} = A \cdot \mu \cdot \Psi \left(\frac{p_a}{p_i}; \kappa \right) \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_i \cdot p_i} \quad (4.4)$$

\dot{m} ... Massenstrom [kg/sec]

μ ... Ausflusszahl [1]

Ψ ... Auslassfunktion [1]

ρ_i ... Dichte im Vordruckbereich [kg/m^3]

$p(i)$... Druck vor und nach der Düse [Pa]

Die Ausflusszahl μ bewertet die Düsengeometrie am Auslass, dabei steht 1 für eine gut abgerundete Düse und 0.59 für einen scharfkantigen Übergang. Bei diesen Berechnungen wird strömungsbedingt von einer gut verrundeten Düse mit einem Wert von 1 ausgegangen, da kleinste Hindernisse im Pfad des Plasmas abgetragen und somit verrundet werden. Die Auslassfunktion wird nach der Gleichung 4.5 berechnet[32].

$$\Psi(x, \kappa) = \begin{cases} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{(\kappa+1)}} & x \leq \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \\ \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \cdot x^{1/\kappa} \cdot (x^{1/\kappa} - x) & \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} < x < 1 \end{cases} \quad (4.5)$$

x ... Aussendruck zu Innendruck [1]

κ ... Adiabatenexponent [1]

Der Adiabatenexponent für das Plasmagemisch beträgt nach Bohm und Gross 3, dieser Vergleichsweise hohe Wert, üblich sind Werte um 1.5, wird durch die steigenden elektrostatischen Abstoßungskräfte verursacht[31].

4.3.4.3 Berechnung der Starttemperatur

Mit Hilfe der Heizleistung kann die Temperatur des Plasmas näherungsweise mit dem Formelapparat und der Gleichung 4.6 berechnet werden. Für die Spannung wird ein Wert von 120V und ein Strom von 65A verwendet. Diese Werte entsprechen Standardwerten aus der Literatur für kleine PTWA Brenner[3].

$$P = \dot{q} = U \cdot I = \dot{m} \cdot c_{p_f(T)} \cdot (T_1 - T_0) = \dot{m} \cdot \int_{T_0}^{T_1} c_{p(T)} \delta T \quad (4.6)$$

U ... Anodenspannung [V]

I ... Elektrodenstrom [A]

c_p ... Wärmekapazität [J/kgK]

4.3.4.4 Berechnung der Konstanten für das $k - \epsilon$ Modell

Da diese Simulation mit dem $k - \epsilon$ Modell turbulent gerechnet wird, müssen die Startwerte dafür am Einlassbereich bestimmt werden. Die turbulente kinetische Energie berechnet sich nach Gleichung 4.7 .

$$k = \frac{3}{2} \cdot (vI_T)^2 \quad (4.7)$$

k ... turbulente kinetische Energie [m^2/s^2]

I_T ... turbulente Intensität [1]

v ... repräsentative Geschwindigkeit [m/s]

Für die Bestimmung der turbulenten Intensität im Einlassbereich wird das Modell für eine voll entwickelte Rohrströmung verwendet. Somit berechnet sie sich nach Gleichung 4.8 .

$$I = 0.16Re_{d_h}^{-\frac{1}{8}} \quad (4.8)$$

Re_{d_h} ... Reynoldszahl Rohrströmung [1]

$$Re_{d_h} = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (4.9)$$

d ... hydraulischer Durchmesser [m]

ν ... kinematische Viskosität [m^2/s]

Die isotrope Dissipationsrate ϵ kann mit der nachstehenden Gleichung 4.10 ermittelt werden. Der Anisotropenparameter wird in den meisten Modellen mit 0.09 verwendet, mit diesen und weiteren Parametern kann man das Modell an die Realität anpassen. Von einer Untersuchung dieser Parameter wird in dieser Arbeit abgesehen. Wobei der turbulente Längenmaßstab sich mit $0.038 \cdot d_h$ abschätzen lässt.

$$\epsilon = C_\mu \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (4.10)$$

C_μ ... Anisotropenparameter [1]

l ... turbulenter Längenmaßstab [m]

4.3.4.5 Ergebnisse für die Startbedingungen der Düsensimulation

Bei der Berechnung wurde vor allem Wert auf die richtige Durchflussmenge gelegt. Dadurch ist es nötig den Druck um 2bar am Einlassbereich zu erhöhen, um in der Simulation den gleichen Massenstrom zu gewährleisten. Die Plasmatemperatur befindet sich mit einem Wert von 17kK in einem realistischen Bereich. Rechnet man mit konstanten Werten für die Wärmekapazität, oder verwendet man die NIST Modelle, ergeben sich Werte von bis zu 1.5MK , da diese Ansätze nur bis etwa 2kK zuverlässige Werte liefern. Weiters zeigte sich bei der Berechnung ein Messfehler an der Düsenbohrung, bei einem Durchmesser von 1.6mm ist der gemessene Durchsatz nicht möglich. Bei einer lichten Weite von 2mm werden physikalisch machbare Ergebnisse erzielt, dieser Messfehler lässt sich auf das gewählte Messgerät zurückführen, eine Schiebelehre mit 0.3mm Messschenkelbreite.

Tabelle 4- VIII: Startbedingungen Plasmaeinlass.

Typ	Parameter	Wert	Einheit
Ausgangswerte	p_0	$10E5$	$[Pa]$
	\dot{V}	$0.2E-4$	$[m^3/s]$
	χ_{Ar}	0.9	$[1]$
	χ_{H_2}	0.1	$[1]$
	d_h	$1.6E-3$	$[m]$
Annahmen	U	120	$[V]$
	I	65	$[A]$
	d_h	$2E-3$	$[m]$
Ergebnisse	p_0	$12.1E5$	$[Pa]$
	T_0	$16.8E3$	$[K]$
	k	0.0046	$[m^2/s^2]$
	ϵ	0.3702	$[m^2/s^3]$

Für den Presslufteinlass werden 10 Bohrungen mit einem Durchmesser von jeweils 2mm angenommen. Hier wird nur eine geringe Drucküberhöhung benötigt um den gewünschten Massenstrom zu erreichen.

Tabelle 4- IX: Startbedingungen Presslufteinlass.

Typ	Parameter	Wert	Einheit
Ausgangswerte	p_0	$2.4E5$	$[Pa]$
Annahme	d_h	$2E-3$	$[m]$
Ergebnisse	p_0	$2.6E5$	$[Pa]$
	k	$3.1E-7$	$[m^2/s^2]$
	ϵ	$2.05E-7$	$[m^2/s^3]$

4.3.5 Export der Simulationsergebnisse

Für die spätere Verwendung der Simulationsergebnisse in der Hauptsimulation müssen Teile der Felder gemessen werden. Hierzu werden 10 Linien normal zur Rotationsachse gelegt und die Werte der Felder an jenen Positionen ausgelesen. Dies erfolgt mit dem Programm `sample` und die zugehörige Konfigurationsdatei mit den genauen Messpunkten wird in Anhang 9.1 angeführt und in Abbildung 4-12 symbolisch dargestellt.

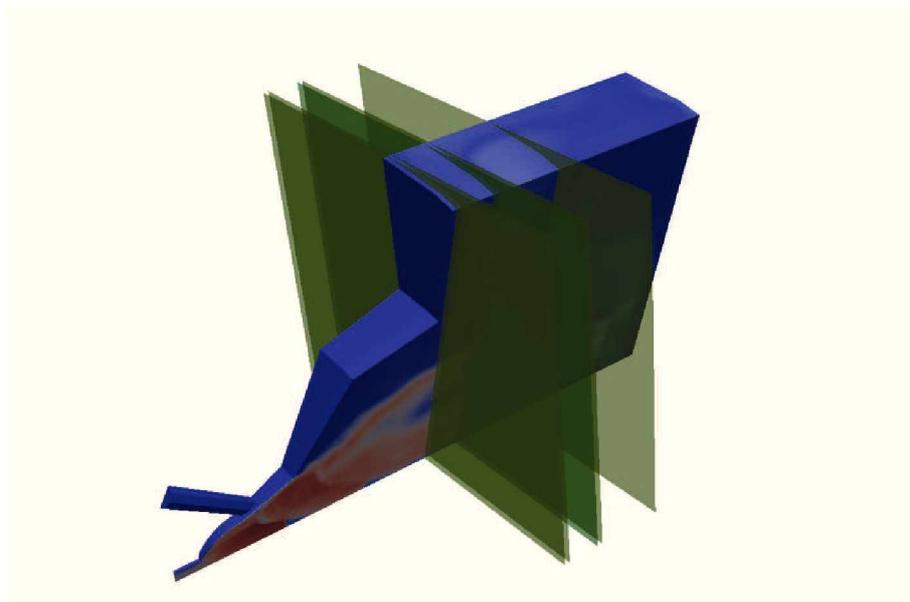


Abbildung 4-12: Beispielhafte Anordnung der Schnittpunkte/Ebenen.

In Abbildung 4-13 sind die Werte 5 solcher Schnittpunkte im Abstand zur Rotationsachse aufgetragen. Anzumerken ist hierbei, dass es sich bei diesen Kurven um eine frühe Simulation mit reduzierter Temperatur handelt.

Nach erfolgreichem Export der Ergebnisse werden diese wieder von einer Pythonklasse eingelesen und die jeweiligen zu interpolierenden Werte können nun zwischen diesen Linien mit Hilfe der beiden am nächsten liegenden Messkurven nach Gleichung 4.11 interpoliert werden.

$$\Theta_{x,r} = \Theta_{x_i,r} + \frac{(x - x_i) \cdot (\Theta_{x_{i+1},r} - \Theta_{x_i,r})}{x_{i+1} - x_i} \quad (4.11)$$

Das zugehörige Pythonscript wird im Anhang 9.2 angeführt. Diese Vorgehensweise ist eine sehr einfache Möglichkeit um die benötigten Werte zu berechnen. In Abbildung 4-14 wird diese Interpolationsklasse genutzt um ein 2D Feld der Temperatur zu berechnen, dies dient auch der Überprüfung des Pythonprogrammes.

Hierbei ist gut ersichtlich, dass der heiße Kernstrahl nur einen Durchmesser von 20mm besitzt und sich auf einer Länge von 80mm ohne Staupunkt nicht aufweitet.

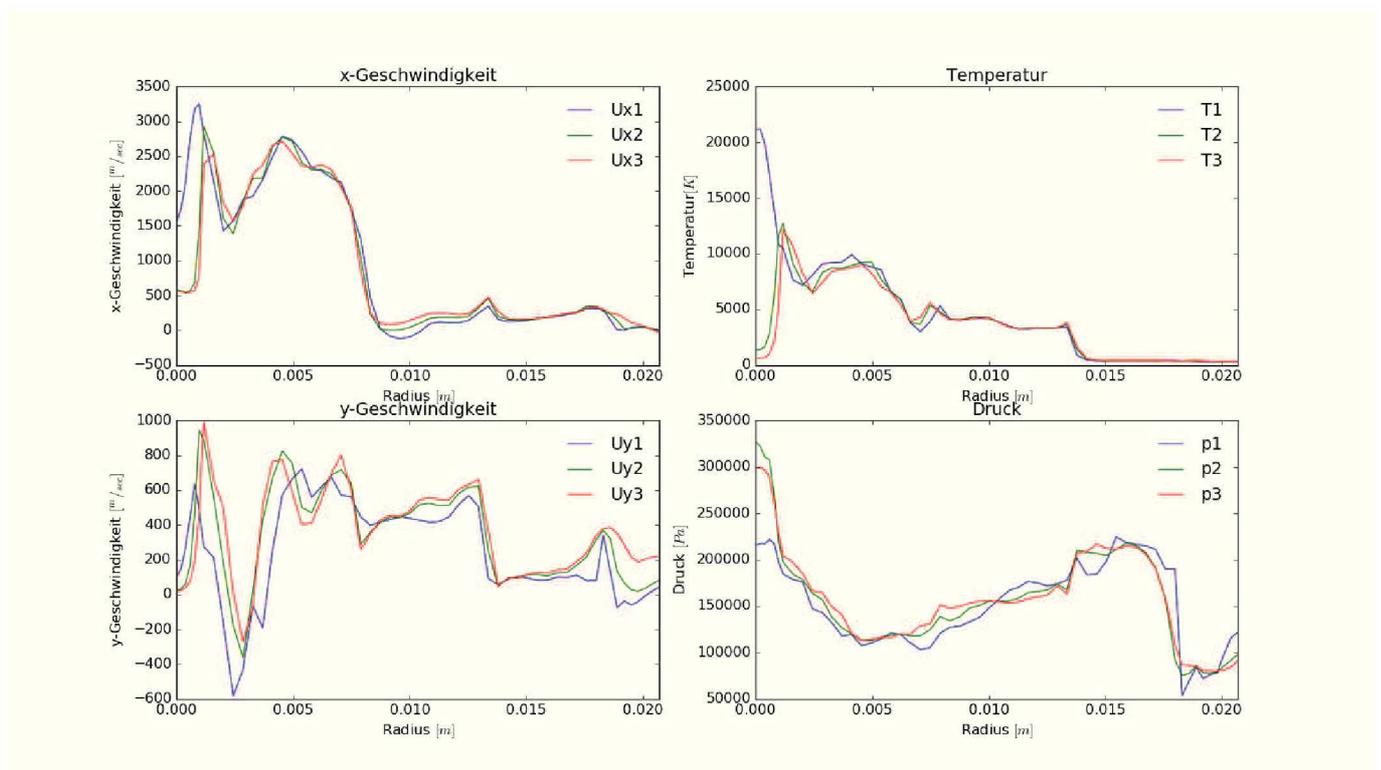


Abbildung 4-13: Beispielverläufe an drei Schnittlinien.

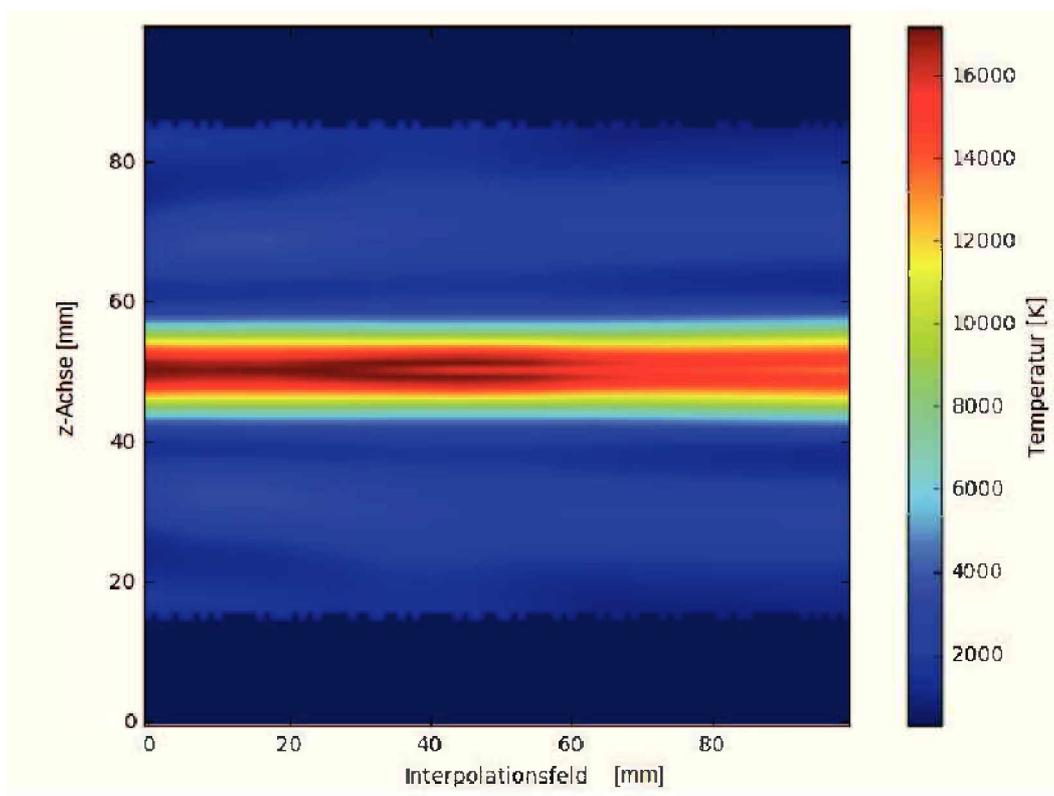


Abbildung 4-14: Interpoliertes 2D Temperaturfeld entlang der Strahlachse.

4.4 Hauptsimulation

Dieses Modell besteht aus folgenden vier Untergruppen: die stationäre Kühlung an der Rückwand des Zylinders, der Zylinder an sich wo die Wärmeleitung dargestellt, der Bereich der primären Strömung, wo der Energieeintrag und die turbulente Strömung stattfindet, sowie der Verdeckelung. Hier liegt eines der Hauptprobleme der Simulation, will man den Wärmeeintrag möglichst genau darstellen, steigt die dafür notwendige Zellenanzahl drastisch an, und in Folge dessen sinkt auch die zeitliche Auflösung.

Für die Simulation des großen Temperaturbereiches wurden die thermodynamischen Standardmodelle von OpenFoam überarbeitet, wobei auch ein neuer Solver mit erweitertem Temperaturbereich entstanden ist. In den Referenzmodellen liefert er realistische Ergebnisse. In Abbildung 4-15 ist der Zustand einer Simulation nach 0.3 sec dargestellt.

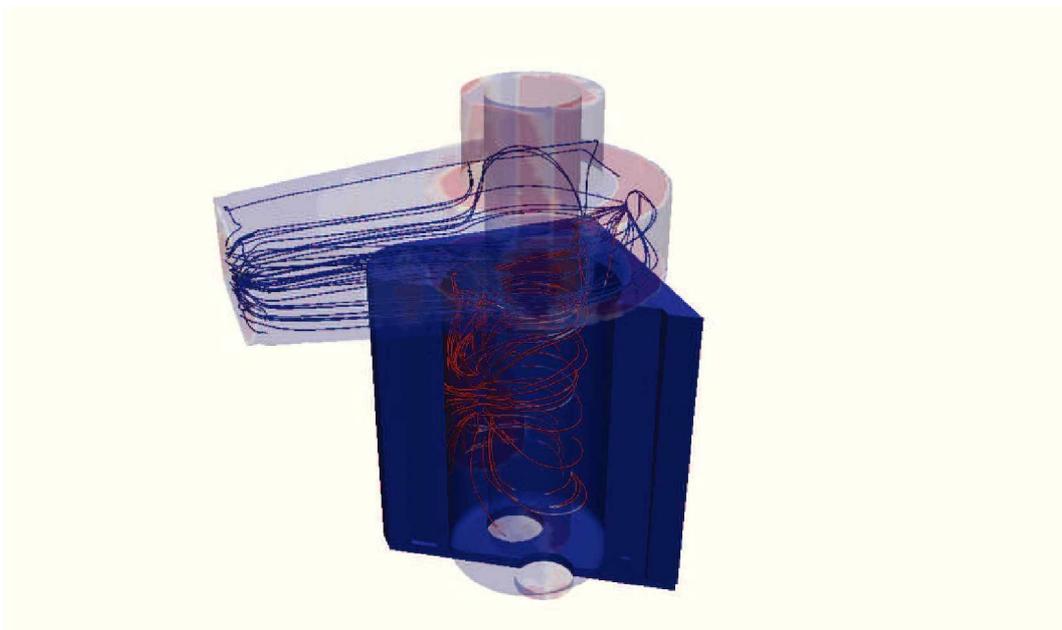


Abbildung 4- 15: Gesamtsimulation.

4.4.1 Modell

4.4.1.1 Aufbau

Diese Simulation ist hier in zwei Gaszonen und zwei feste Zonen, dem Motorblock und der Verdeckelung, aufgeteilt. Die Zonen sind nur über die Temperatur gekoppelt und stellen jeweils eigenständige Simulationen dar, dabei bestimmt die höchste auftretende Courantzahl die maximale zeitliche Schrittweite des Systems. In Abbildung 4- 16 sind die Interaktionszonen schematisch dargestellt.

Tabelle 4-X: Übersicht Hauptmesh.

Name	Zellen	Patches	Kopplungen
Primär	700.180	13	2
Sekundär	228.168	4	1
Motorblock	274.028	4	3
Verdeckelung	8.370	3	2
Summe	1.210.746	24	8

den Oberflächen Layer für die Randzonen eingebracht. Ein Problem bei der Erstellung dieses Meshes lag in der möglichst radialen Anordnung der hexaedrischen Zellen im Zylinderinnenraum zur Rotationsachse, dieses Ziel wurde mit einer annehmbaren Qualität erreicht.

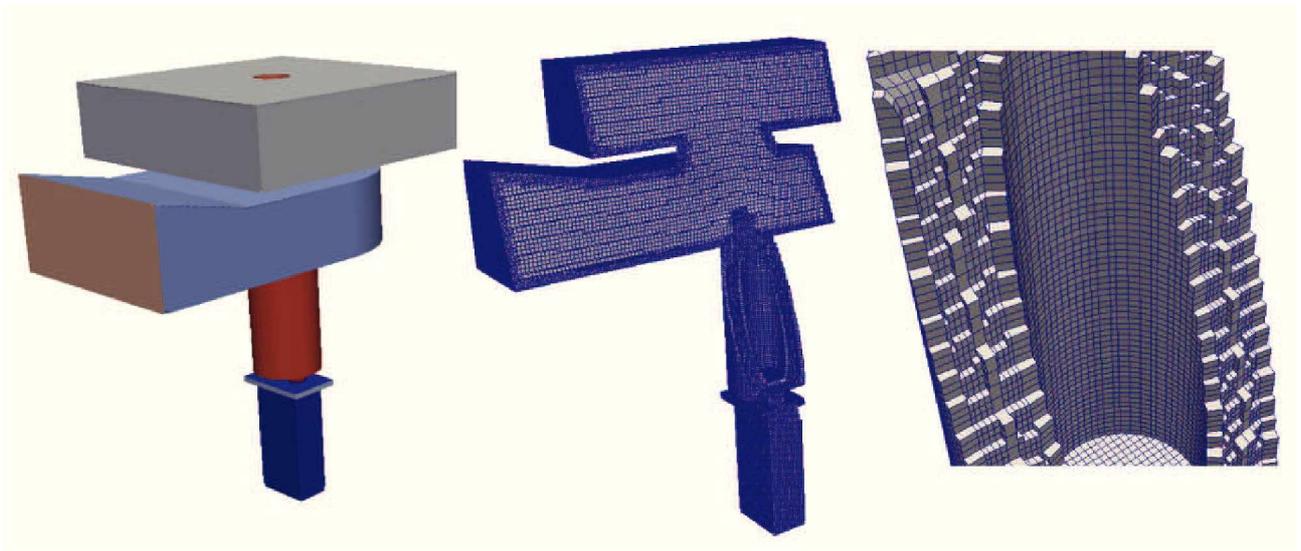


Abbildung 4-17: Volumenmodell und geschnittenes Primärmesh.

Es handelt sich auch um das größte Mesh, es besitzt mehr Zellen als die verbleibenden Meshe zusammen, und dem komplexesten Mesh, aufgrund der vielen Interaktionszonen, im Gesamtmodell. Die jeweiligen Eigenschaften werden in Tabelle 4-XI aufgelistet.

4.4.2.2 Motorblockmesh

Für die Basisgeometrie kommt hier ein vereinfachtes Modell, das den ungefähren Abmessungen des Motorblocks entspricht, zum Einsatz. Genauere Daten waren im Rahmen dieser Arbeit nicht zugänglich. Die Berücksichtigung der drei weiteren Zylinder wird aufgrund des geringen Rechenaufwandes bei der Lösung der Wärmeleitungsgleichung durchgeführt. Wie in Abbildung 4-18 in der Detailansicht erkennbar, werden für die hohen Temperaturgradienten an der Zylinderlauffläche mehrere dünne Layer eingefügt. Simulationen mit einer geringeren Auflösung führten zu zu hohen Gradienten die den Solver zum Absturz brachten.

Tabelle 4- XI: Messeigenschaften Primärmesh.

Parameter	Wert	Einheit
Punkte	830495	[1]
Flächen	2230443	[1]
Zellen	700180	[1]
Patches	13	[1]
kleinstes Zellvolumen	$2.8E - 10$	$[m^3]$
größtes Zellvolumen	$2.3E - 5$	$[m^3]$
maximale Nichtorthogonalität	81	[1]
durchschnittliche Nichtorthogonalität	9.2	[1]
größte Schiefstellung	2.2	[1]

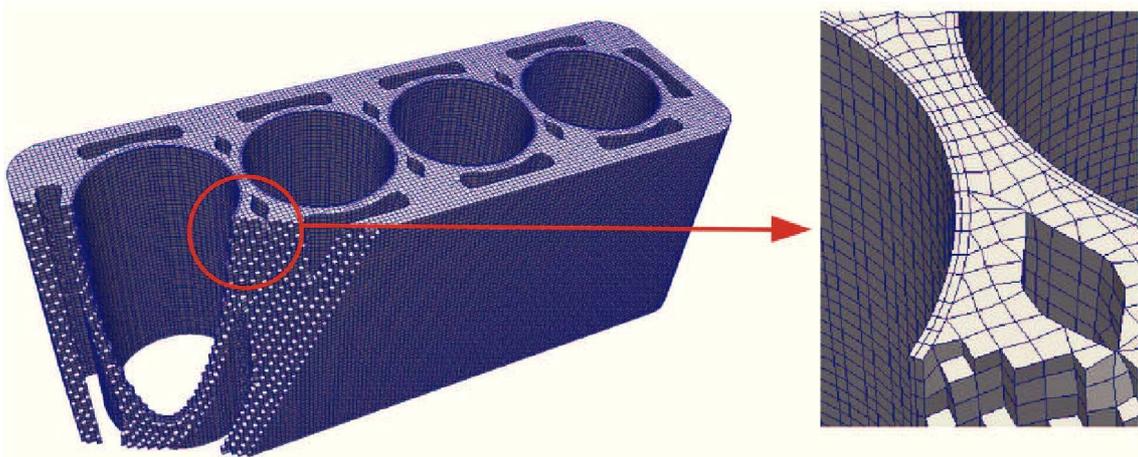


Abbildung 4- 18: Mesh Motorblock.

Die Eckdaten und Ergebnisse der Qualitätsprüfung des Meshes sind in Tabelle 4- XII aufgelistet. Die Werte sind in einem guten Bereich, bezüglich der Nichtorthogonalität. Da hier aber nur Diffusionsströme gerechnet werden, ist prinzipiell auch ein schlechteres Mesh möglich.

Tabelle 4- XII: Mesheigenschaften Motorblock.

Parameter	Wert	Einheit
Punkte	312294	[1]
Flächen	860394	[1]
Zellen	274028	[1]
Patches	4	[1]
kleinstes Zellvolumen	$1.2E - 9$	$[m^3]$
größtes Zellvolumen	$2.8E - 8$	$[m^3]$
maximale Nichtorthogonalität	61	[1]
durchschnittliche Nichtorthogonalität	6.1	[1]
größte Schiefstellung	4.8	[1]

4.4.2.3 Mesh Verdeckung

Aufgrund der stark unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit des Motorblocks und der Kunststoffverdeckung ist es notwendig diese in einem separaten Mesh abzubilden. Es werden im Inneren wieder nur Diffusionsströme gerechnet, womit die Qualität, Tabelle 4- XIII zulässig ist. Im Durchgangsbereich zu der unteren Absaugung, Abbildung 4- 19 , ist eine Verbesserung der Wiedergabe der Oberfläche durchaus möglich.

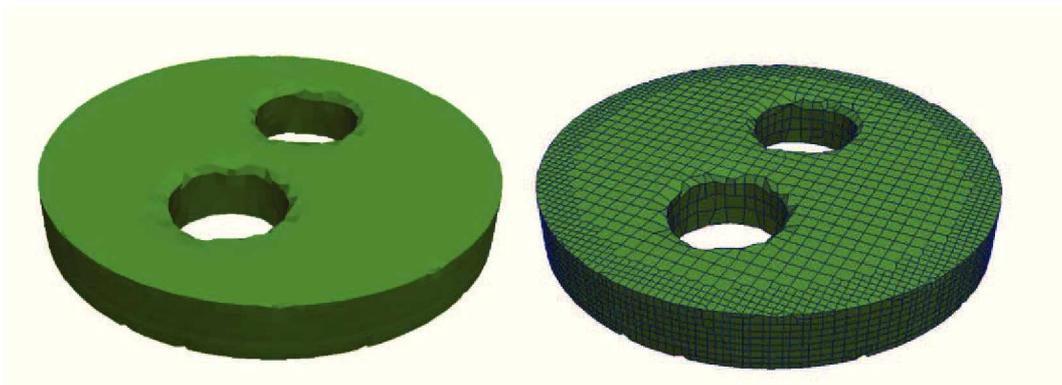


Abbildung 4- 19: Mesh Verdeckung.

4.4.2.4 Sekundärmesh

Dieses Mesh wird mit der geringsten, für die Berechnung der auftretenden Effekte, notwendigen Auflösung erstellt. Wird, wie bei den Randbedingungen erwähnt, eine mögliche Zwangskühlung simuliert, so muss die Auflösung um den Faktor 3 erhöht werden.

Tabelle 4- XIII: Mesheigenschaften Verdeckelung.

Parameter	Wert	Einheit
Punkte	11057	[1]
Flächen	27525	[1]
Zellen	8370	[1]
Patches	3	[1]
kleinstes Zellvolumen	$1.4E - 7$	$[m^3]$
größtes Zellvolumen	$2.6E - 8$	$[m^3]$
maximale Nichtorthogonalität	65	[1]
durchschnittliche Nichtorthogonalität	11.1	[1]
größte Schiefstellung	1.9	[1]

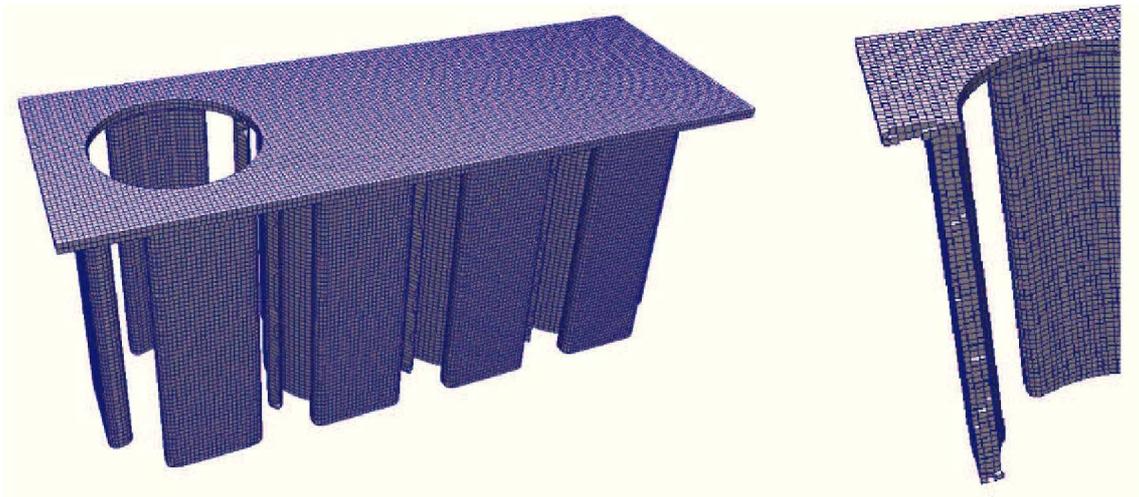


Abbildung 4- 20: Sekundärmesh.

Tabelle 4- XIV: Mesheigenschaften Verdeckelung.

Parameter	Wert	Einheit
Punkte	259206	[1]
Flächen	714077	[1]
Zellen	228168	[1]
Patches	4	[1]
kleinstes Zellvolumen	$2.7E - 9$	$[m^3]$
größtes Zellvolumen	$4.6E - 8$	$[m^3]$
maximale Nichtorthogonalität	62	[1]
durchschnittliche Nichtorthogonalität	5.5	[1]
größte Schiefstellung	3.2	[1]

4.4.3 Randbedingungen

In den kommenden Unterpunkten sind die jeweiligen Verknüpfungen der Einzelsimulationen des Modells aufgelistet und werden kurz beschrieben. Eine detaillierte Auflistung der verwendeten Randbedingungen für die einzelnen Felder befindet sich im Anhang 9.4.

4.4.3.1 Primärsimulation

Hier werden die Interaktionen mit der Atmosphäre, dem Motorblock, dem Rotor, und der Verdeckelung berücksichtigt. Die genaue Bedeutung der Patches wird in den nachfolgenden Unterpunkten kurz erläutert. Die dazugehörigen Positionen sind Abbildung 4- 21 eingetragen.

- Atmosphäre I:

Dies ist der Raum zwischen der oberen Absaugung und dem Sprühkopf, und hier wird Falschluff von oben angesaugt sowie Partikel von unten in diesen Bereich getragen. Da es an der Kante zum Absaugungskopf zu Rückströmungen kommt ist es notwendig diesen Bereich vergrößert auszuführen, da es ansonsten zu Instabilitäten in diesem Bereich kommt.

- Atmosphäre II:

Dieser Bereich stellt die Undichtheit zwischen der unteren Absaugung und dem Motorblock dar. Das Spaltmaß hier mit $3mm$ geschätzt. Es kann auch ohne dieser Falschluff gerechnet werden, indem man die Geschwindigkeit auf dieser Oberfläche mit $0^m/s$ festlegt.

- Adiabatisch I:

Die Oberfläche entspricht der Absaughaube für die obere Absaugung. Eine Berechnung des Wärmeübergangs ist hier nicht von Interesse und wird somit als adiabatisch betrachtet.

- Adiabatisch II:

Die gesonderte Behandlung dieses Patches ist hier auf die Mesherstellung zurück zu führen, da die Erstellung von Layern an der Oberfläche durch diesen Kunstgriff erleichtert wird. Er besitzt aber die identen Randbedingungen wie Adiabatisch I.

- Adiabatisch III:

Dies ist das Übergangsstück zwischen dem Motor und der Absaugung. Bei Bedarf kann dieser Patch auch zur Berücksichtigung der Falschluff verwendet werden.

- Adiabatisch IV:

Der untere Bereich des Motorblock wird mit Hilfe eines Stutzens mit der unteren Absaugung verbunden. Eine Betrachtung des Wärmestroms ist auch hier nicht von Interesse.

- Absaugung unten:
Die Strömung wird hier vereinfacht als Blockströmung nach außen angesetzt.
- Absaugung oben:
Aufgrund von starken Turbulenzen in diesem Bereich ist es notwendig diesen Patch als InletOutlet anzuführen, da es hier zu Rückströmungen in die Absaughaube kommt.
- Interaktion Motorblock:
Mit diesem Patch wird der Wärmestrom zwischen dem Motorblock und der Primärzone berücksichtigt, dabei wird hier der Wärmeübergang über eine turbulente Grenzschicht gerechnet.
- Interaktion Verdeckelung:
Die Wechselwirkung zwischen dem primären Bereich und der Kunststoffverdeckelung wird hier ähnlich betrachtet wie bei der Interaktion zwischen dem Motorblock und der Hauptzone.
- Rotorwand:
Sämtliche Randbedingungen werden hier im Voraus mit dem Mapping-Algorithmus berechnet.

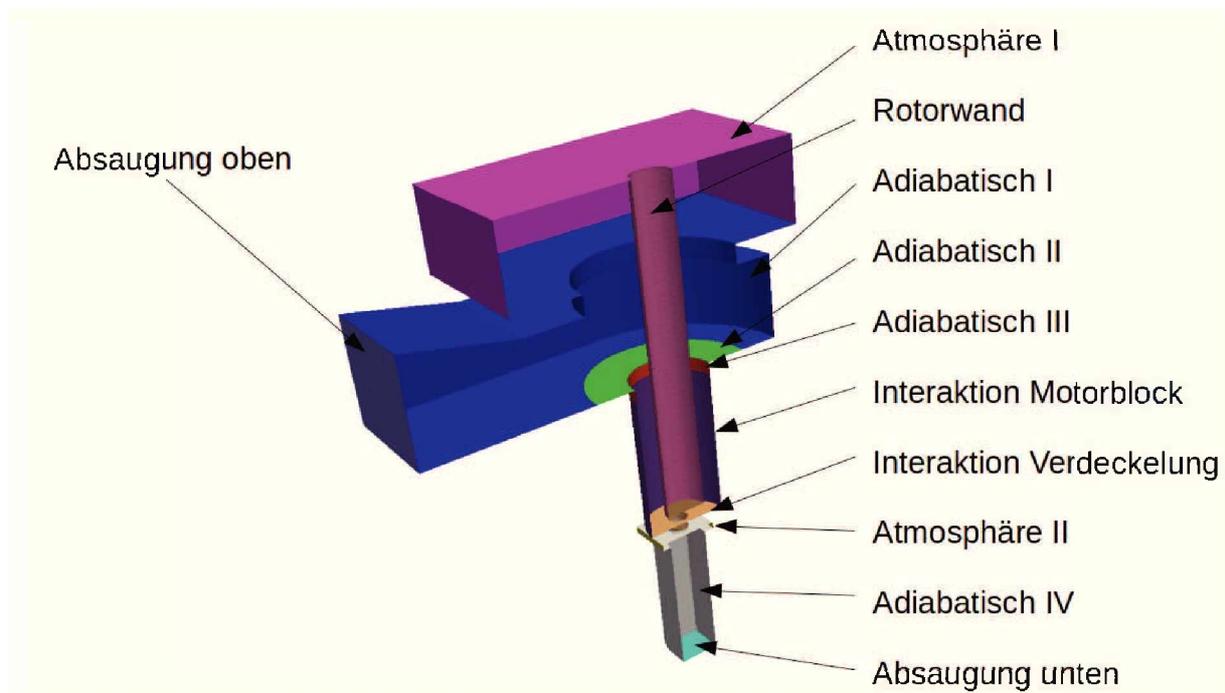


Abbildung 4- 21: Patche Primär.

4.4.3.2 Sekundärsimulation

Hier werden nur die durch Konvektion verursachten Wärmeströme berechnet. Ein Vernachlässigen dieser Simulation ist aufgrund der kurzen Prozesszeit durchaus möglich, wird hier aber dennoch durchgeführt, da sich der rechnerische Mehraufwand durch die niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten in Grenzen hält. Alternativ ist auch die Definition einer Zwangskühlung durch dieses Modell möglich. Die drei Patche sind in Abbildung 4-22 eingezeichnet.

- Atmosphäre III:
Dies ist der obere Auslass des Konvektionsstromes.
- Interaktion Motorblock:
Durch diesen Patch wird die Abgabe von Wärme durch Konvektion an die Umgebungsluft dargestellt.
- Atmosphäre IV:
Mit Hilfe dieses Patches wird der untere Einlass für die Umgebungsluft abgebildet. Hier kann der Zufluss auch deaktiviert, oder verschiedene Werte für eine Zwangskühlung genutzt werden.

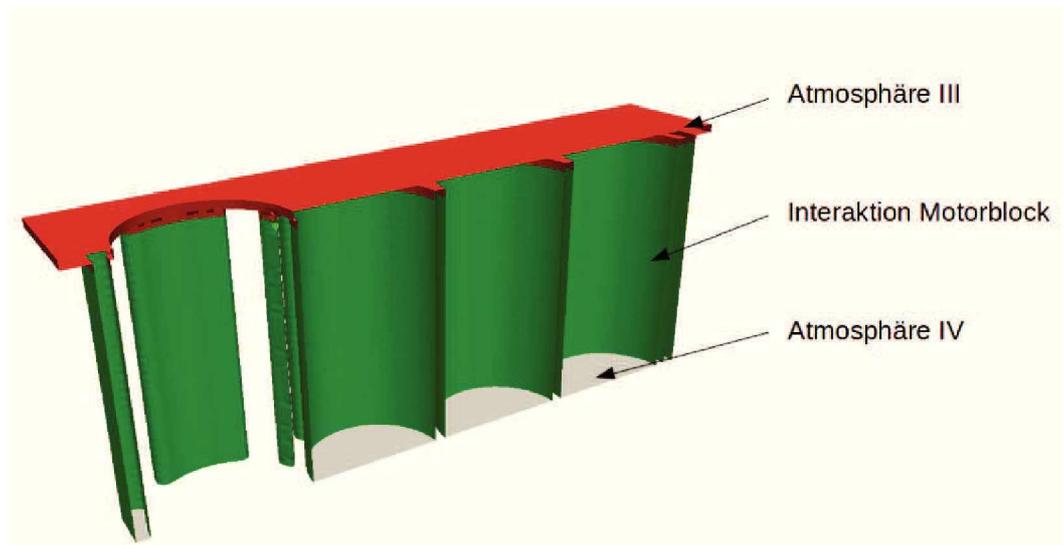


Abbildung 4-22: Patche Sekundär.

4.4.3.3 Motorblock

Abbildung 4-23 zeigt die vom Motorblock berücksichtigten verschiedenen Randbedingungen. Bei dem derzeitigen Aufbau des Meshes kann nur ein Zylinder behandelt werden. Drei Möglichkeiten dies zu umgehen sind, dass man jeden einzelnen Zylinder eine Primärzone zuweist,

oder das erste Mesh per Software versetzt oder auch die Ergebnisse der ersten Simulation auf die restlichen Zylinder mapped. In dieser Arbeit werden diese Ansätze aber nicht weiter verfolgt.

- **Adiabatisch V:**
Durch die geringen Strömungsgeschwindigkeiten und des großen Abstandes zur Prozesszone wird hier kein Wärmestrom berücksichtigt.
- **Interaktion Primär:**
Hier wird der Wärmeeintrag von der Primärsimulation übernommen.
- **Interaktion Sekundär:**
Der Wärmeübergang vom Motorblock an die Atmosphäre, oder auch eine Zwangskühlung kann hier berücksichtigt werden.
- **Interaktion Verdeckelung:**
Der Wärmestrom zwischen diesen beiden Zonen kann praktisch vernachlässigt werden, jedoch muss aus Gründen der Meshdefinitionen dieser Bereich gekoppelt ausgeführt werden.

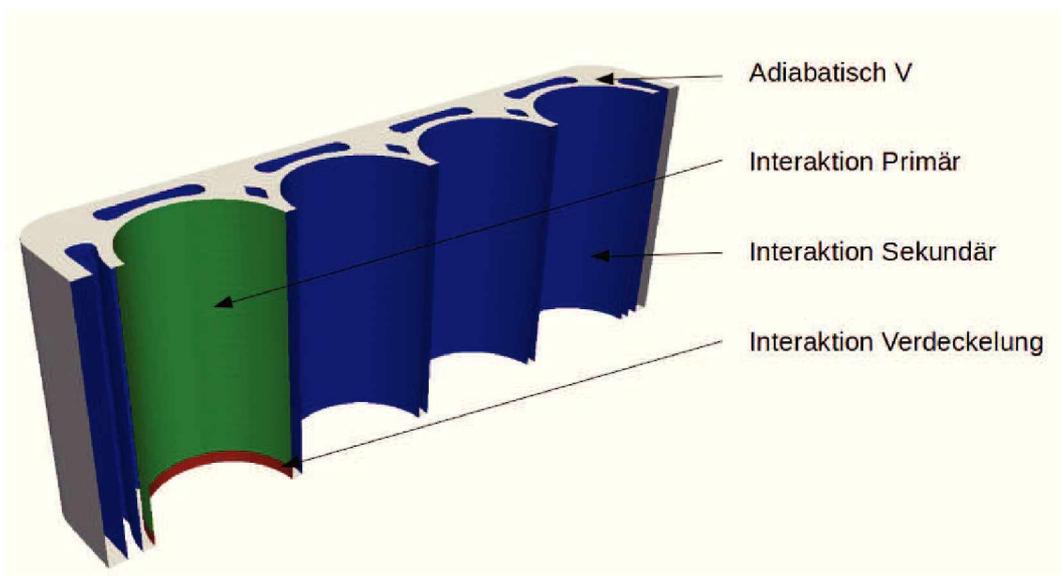


Abbildung 4- 23: Patche Motorblock.

4.4.3.4 Verdeckelung

Die durch das Mesh notwendige Interaktion der Patches führt zu dieser interessanten Abhängigkeit dieses Bauteiles. Es herrscht nur ein geringer Wärmestrom, dieser muss aber

dennoch berücksichtigt werden. Die Randbedingungen gestalten sich analog zu denen des Motorblocks und die vorhandenen Patche sind in Abbildung 4-24 eingezeichnet.

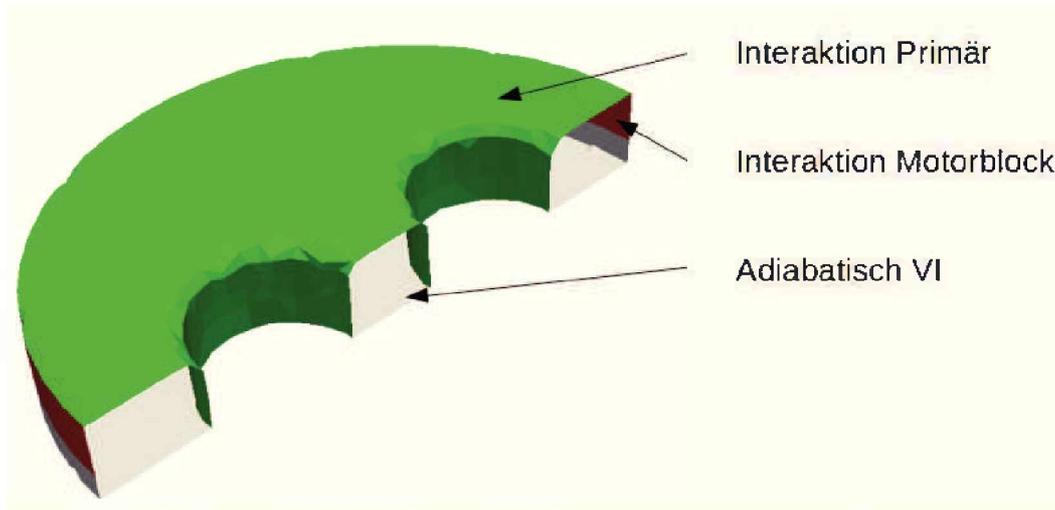


Abbildung 4-24: Patche Verdeckung.

4.4.4 Mapping

Da aus Rechenzeitgründen die Düsensimulation nur einmal berechnet wird muss das Ergebnis derer auf die den Rotorpatch gemappt werden. Dabei wird auch das Problem eines dynamischen Meshs umgangen, indem die Morphologie des Netzes sich nicht ändert aber die Zuweisung der einzelnen Zellen sowie deren Randbedingungen.

4.4.4.1 Berechnung

Hierfür werden vor der Simulation die Punkte der an der Oberfläche des Rotors aus dem Mesh ausgelesen und unter Berücksichtigung der Prozessparameter für den Verfahrensweg des Rotors für die jeweiligen Zeitschritte gezielt verändert. Für die Unterteilung der einzelnen Bereiche auf dem Rotor wird der Vektor \vec{a} des Plasmastrahls benötigt. Zuerst wird der aktuelle Winkel als Funktion der Zeit bestimmt, Gleichung 4.12, und anschließend die aktuelle Position des Sprühkopfes, Gleichung 4.13.

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega \cdot t \quad (4.12)$$

$$z(t) = \begin{cases} z_{(t-1)} > z_{max} \wedge \Delta z > 0 & z_{max} - \frac{\beta}{t} \left[t - \left(n \cdot \frac{z_{max} - z_{min}}{\beta} \frac{4\pi}{\omega} \right) \right] \\ z_{(t-1)} < z_{min} \wedge \Delta z < 0 & z_{min} + \frac{\beta}{t} \left[t - \left(n \cdot \frac{z_{max} - z_{min}}{\beta} \frac{2\pi}{\omega} \right) \right] \end{cases} \quad (4.13)$$

Somit ergibt sich der von der Zeit abhängige Richtungsvektor \vec{a} für den Plasmastrahl nach Gleichung 4.14 , sowie das Zentrum der Düse nach Gleichung 4.15 . In Abbildung 4- 25 sind die verwendeten Punkte und Vektoren schematisch eingezeichnet.

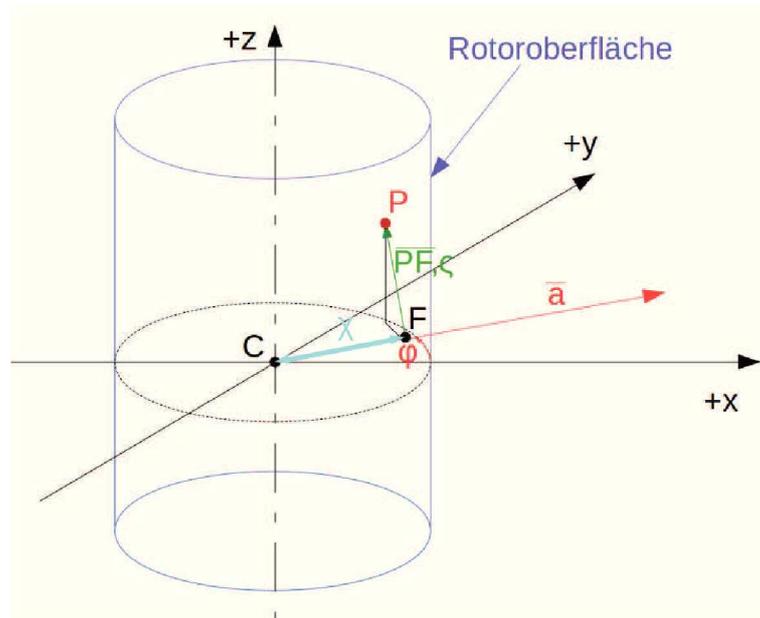


Abbildung 4- 25: Skizze Abstandsbestimmung.

$$\vec{a}_{(t)} = 1 \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi(t) & -\sin \varphi(t) \\ \sin \varphi(t) & \cos \varphi(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\vec{C}_{(t)} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z(t) \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Im nächsten Schritt werden die Ortsvektoren und deren Abstände für den zu interpolierenden Punkt bestimmt. Dies geschieht mit Hilfe des Fußpunktverfahrens. Dazu legt man eine Ebene normal auf den Richtungsvektor die auch durch den gesuchten Punkt geht.

$$g : \vec{x} = \vec{C} + s \cdot \vec{a} \quad (4.16)$$

$$b = \frac{\vec{a} \cdot \vec{P} - \vec{a} \cdot \vec{C}}{|\vec{a}_x^2 + \vec{a}_y^2 + \vec{a}_z^2|} \quad (4.17)$$

Der Fußpunkt \vec{F} wird durch einsetzen des zuvor ermittelten Parameters b in die Geradengleichung für den Richtungsvektor berechnet. Für die spätere Interpolation wird ein neues Koordinatensystem parallel zum Richtungsvektor gelegt. Die Abstände χ und ζ auf dessen

Achse entsprechen den Variablen x und r in der Düsensimulation.

$$\bar{F} = \vec{x}_{(s=b)} \quad (4.18)$$

$$\zeta = |\overrightarrow{PF}| \quad (4.19)$$

$$\chi = |\overrightarrow{CF}| \quad (4.20)$$

Die neuen Werte erhält man durch nutzen der Interpolationsklasse:

$$\Theta_{(i,x,y,z)} = \Theta_{(i,r=\zeta,x=\chi)} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \vec{U}_{(x,y,z)} &= \vec{U}_{\zeta} + \vec{U}_{\chi} \\ &= \Theta_{(i=U_y,r=\zeta,x=\chi)} \cdot \frac{\overrightarrow{PF}}{|\overrightarrow{PF}|} + \Theta_{(i=U_x,r=\zeta,x=\chi)} \cdot \vec{a} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Für Punkte außerhalb des Interpolationsbereiches gilt:

$$\begin{aligned} \vec{k} &= (\bar{P} - \bar{C}) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \vec{U} &= \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot (r \cdot \omega) \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\Theta_{i,x,y,z} = value_{i,rot} \quad (4.24)$$

4.4.4.2 Filter

Um nicht alle Punkte auswerten zu müssen, werden diese vor jedem Zeitschritt gefiltert und in zwei Bereiche aufgeteilt, dem zu interpolierenden und der rotierenden Wand. In Abbildung 4-26 ist das Ablaufschema der Filterung und des Mappings dargestellt, das dazugehörige Programm befindet sich im Anhang 9.3.

Ein mit diesem Programm bestimmtes interpoliertes Feld ist in Abbildung 4-27 dargestellt. Abschließend ist anzumerken, dass diese Software nur gegen den Uhrzeigersinn beschichten kann. Eine Änderung des Drehsinns ist in der Software möglich, aber nicht implementiert,

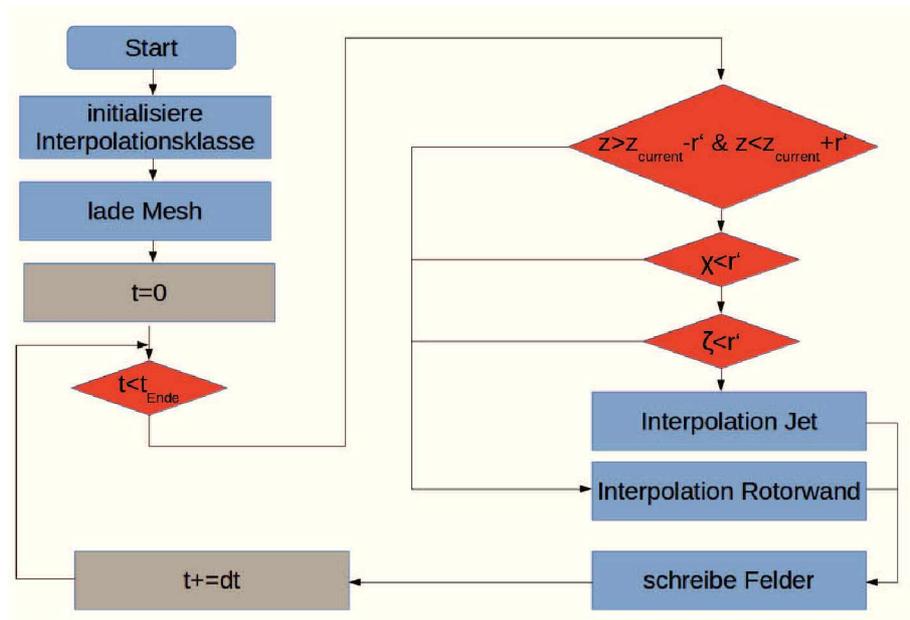


Abbildung 4-26: Ablaufschema Mappingalgorithmus.

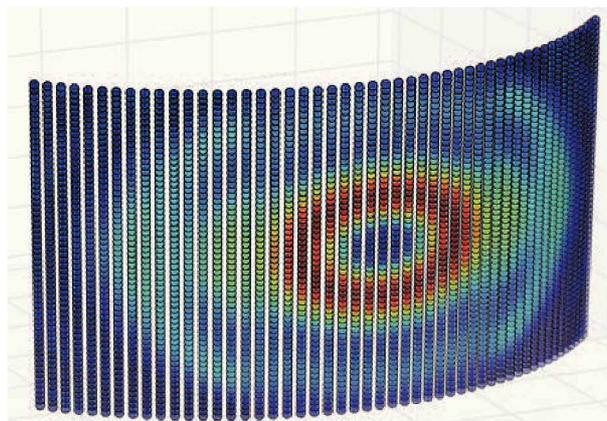


Abbildung 4-27: Auf die Rotoroberfläche gemappedes Temperaturfeld.

da dies keine Änderung auf die Messergebnisse an den Referenzpunkten hat.

4.4.4.3 Zeitliche Schrittweite

Die Auflösung der einzelnen Zeitpunkte wird so gewählt, dass bei einer Drehzahl von $500^1 / \text{min}$ alle 3° ein interpoliertes Abbild gespeichert wird. Bei den Zeitschritten zwischen zwei solcher Abbilder interpoliert der MRF-Solver selbstständig. Dadurch kommt es zu einer Auflösung von 1ms zwischen jedem Schritt. Die hohe Auflösung ist der Interpolationsfunktion des Solvers geschuldet, da bei es bei einer geringeren Auflösung zu Stoffströmen durch die Rotorwand kommt, was einerseits physikalisch nicht korrekt ist und zu Instabilitäten bei der Berechnung des Druckfeldes führt.

4.4.5 Messpunkterfassung

Um die gemessenen Temperaturkurven direkt mit den simulierten vergleichen zu können, werden diese in das sampleDict der Wärmeleitungssimulation des Motorblockes eingetragen. Die Punkte sind in Tabelle 4- XV eingetragen. Nach erfolgter Simulation können diese Werte ausgelesen werden. Dabei liegt der Ursprung des Koordinatensystems im oberen Zentrum der ersten Zylinderbohrung.

Tabelle 4- XV: Messpunkte Motorblock.

Messpunkt	x [m]	y [m]	z [m]
1	-0.0405	0	-0.1430
2	0.0438	0	0
3	0.1248	0	0
4	0.2058	0	0
5	0.3030	0	-0.1430

4.5 Struktur der Simulation

Nachfolgend ist der Gesamtaufbau der Simulation in Abbildung 4- 28 als Ablaufschema dargestellt.

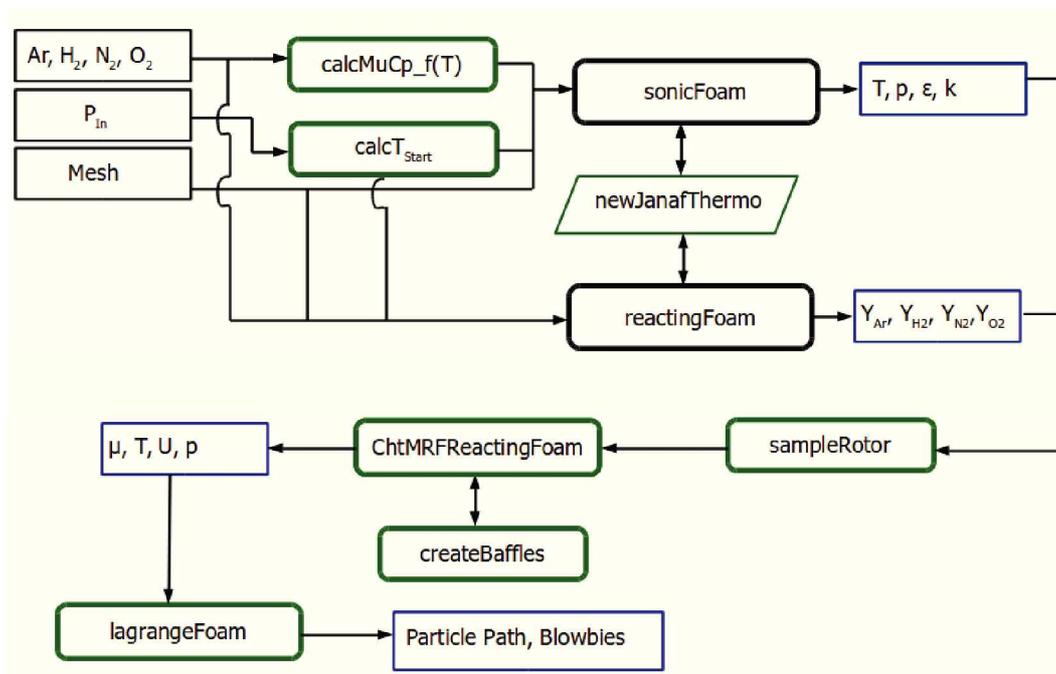


Abbildung 4- 28: Ablauf der Gesamtsimulation.

5 Ergebnisse

5.1 Praktische Versuche

In den nachfolgenden Unterpunkten werden die ermittelten Ergebnisse für die PTWA und APS Versuche aufgelistet und erläutert, das Hauptaugenmerk liegt auf der PTWA Beschichtung, da diese das eigentliche Thema dieser Arbeit ist.

5.1.1 Schichtaufbau

Für den direkten Vergleich der einzelnen Schichten wird jeweils ein Bild von der Einlaufzone und dem unteren Ende der Lauffläche dargestellt und diskutiert. Dabei stellt die obere Aufnahme die Beschichtung ohne Einflüsse der Verdeckelung auf die Schichtbildung dar. Die Position des unteren Bildes wird so gewählt, dass sie gerade noch im Bereich einer vollständig ausgebildeten Schicht abbildet.

5.1.1.1 PTWA offener Aufbau

Zwischen dem unbeeinflussten und dem unteren Wendepunkt gibt es nur geringe Unterschiede. In Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 zeigen sich nur geringe Variation in der Ausbildung der oxidierten Zonen. Der höhere Oxidanteil wird durch die bessere Füllung der Bohrung mit einem Argon Wasserstoffplasma. Dadurch liegen am unteren Totpunkt reduzierendere Bedingungen vor.

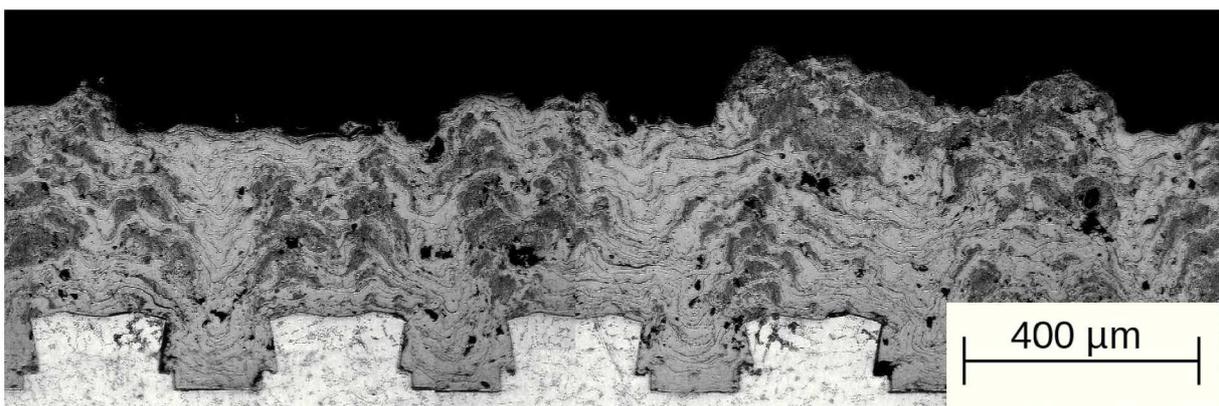


Abbildung 5-1: Schliffbild PTWA offener Aufbau, Einlassbereich.

Bei der Makroporosität unterscheiden sich beide Zustände nicht, dies wird auch von der Porositätsanalyse gestützt.

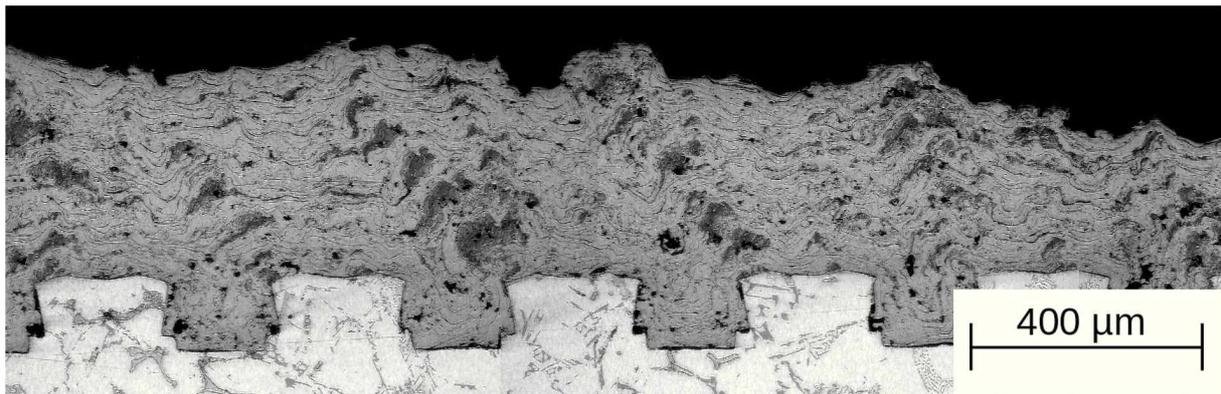


Abbildung 5- 2: Schliffbild PTWA offener Aufbau, Auslassbereich.

5.1.1.2 PTWA geschlossener Aufbau

In Abbildung 5- 4 zeigt sich wie im offenen Aufbau ein geringerer Oxidanteil. Jedoch tritt durch die, im unteren Bereich verbaute Verdeckelung, reduzierten Absaugleistung ein erhöhte Menge an im Gefüge gefangenen Blowbye auf. Dies ist durch die fein verteilten runden Fehlstellen erkennbar.

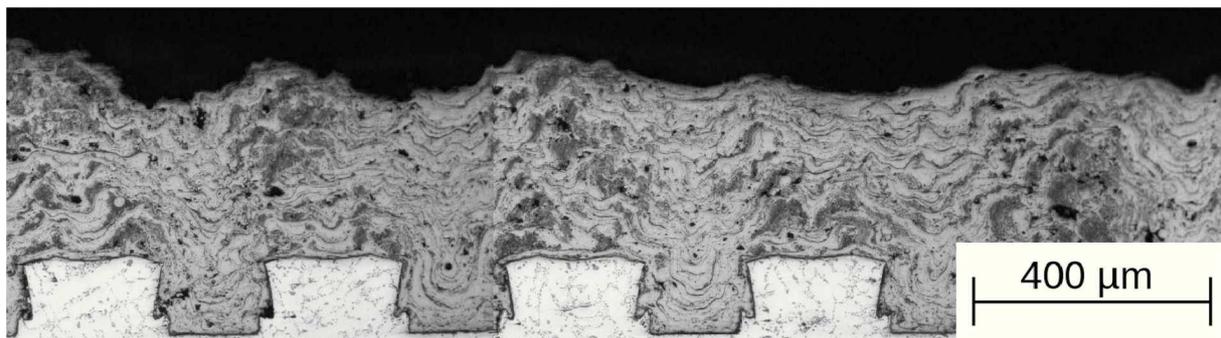


Abbildung 5- 3: Schliffbild PTWA geschlossener Aufbau, Einlassbereich.

Bei beiden Varianten wurden keine ausgeprägten Rissnetzwerke entdeckt.

5.1.1.3 APS geschlossener Aufbau Konfiguration 1

Hier bildet sich im Haftgrundfuß auf der Vorschub abgewandten Seiten ein Schatten aus. Auf dieses Phänomen wird später noch eingegangen. Dieser Fehler verschlechtert sich mit fortschreitender Länge der Beschichtung, wie der Vergleich von Abbildung 5- 5 und Abbildung 5- 6 zeigt. Außerdem treten hier großflächige Bindungsfehler auf die sich zwar positiv auf die Fähigkeit der Beschichtung Schmiermittel aufzunehmen auswirken, jedoch durch die großen Ungängen im Haftgrund die Haftzugfestigkeit der Schicht verschlechtern. Dieser Effekt tritt im Bereich des unteren Wendepunktes verstärkt auf.

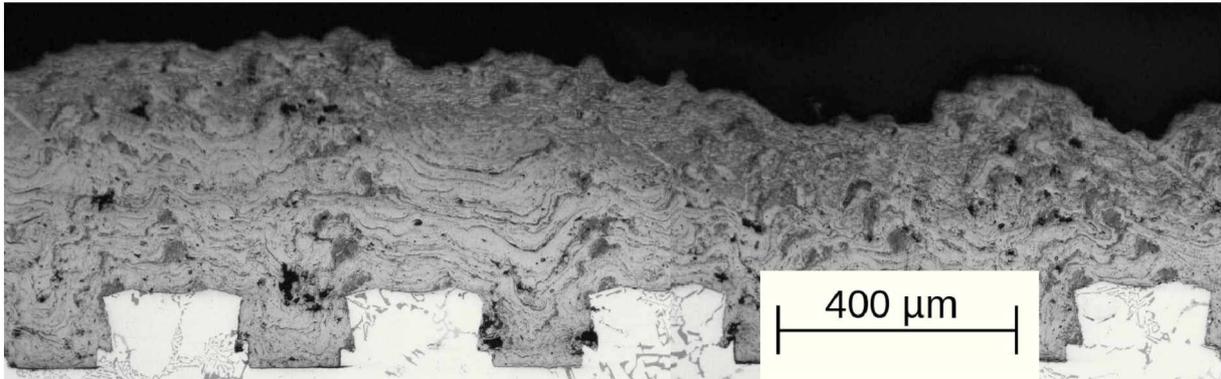


Abbildung 5-4: Schliffbild PTWA geschlossener Aufbau, Verdeckelung.

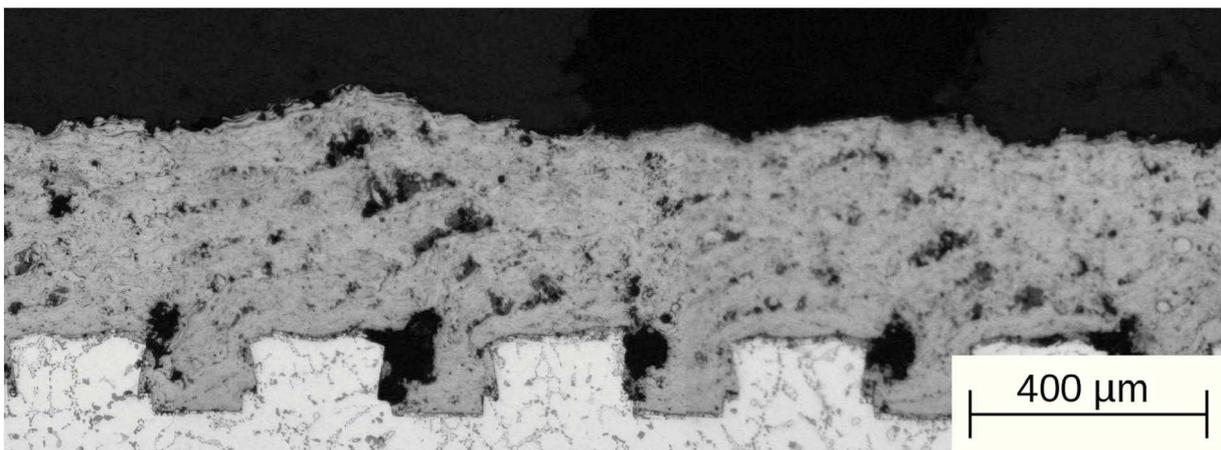


Abbildung 5-5: Schliffbild APS Konfiguration 1, Einlassbereich.

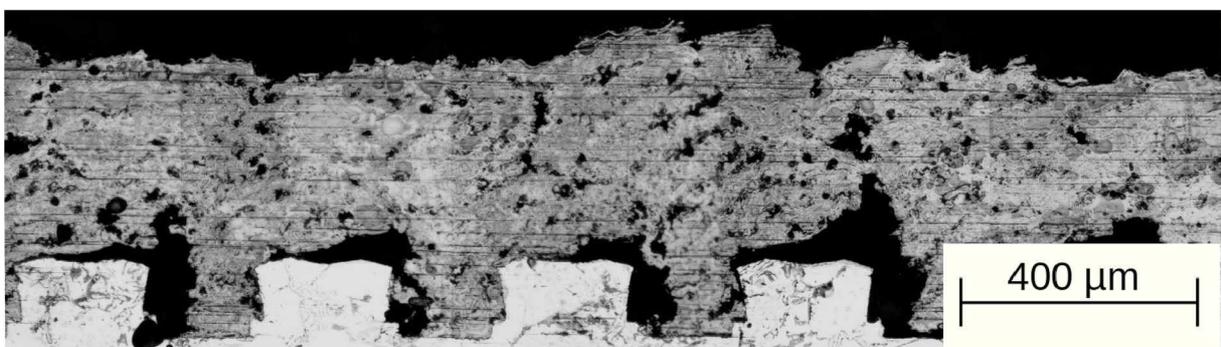


Abbildung 5-6: Schliffbild APS Konfiguration 1, Verdeckelung.

5.1.1.4 APS geschlossener Aufbau Konfiguration 2

Im oberen Bereich, Abbildung 5-7 , zeigen sich trotz des veränderten Anstellungswinkels des Sprühkopfes im Vergleich zur APS Konfiguration kaum Unterschiede in der Porosität. Der Aufbau der Lagen ist erkennbar um rund 30° zur Beschichtungsebene geneigt. Dies kann sich positiv auf den Hohnvorgang auswirken, da Bindungsfehler nicht mehr planar zur Schnittebene liegen und somit das Abplatzen ganzer Bereiche reduziert werden kann.

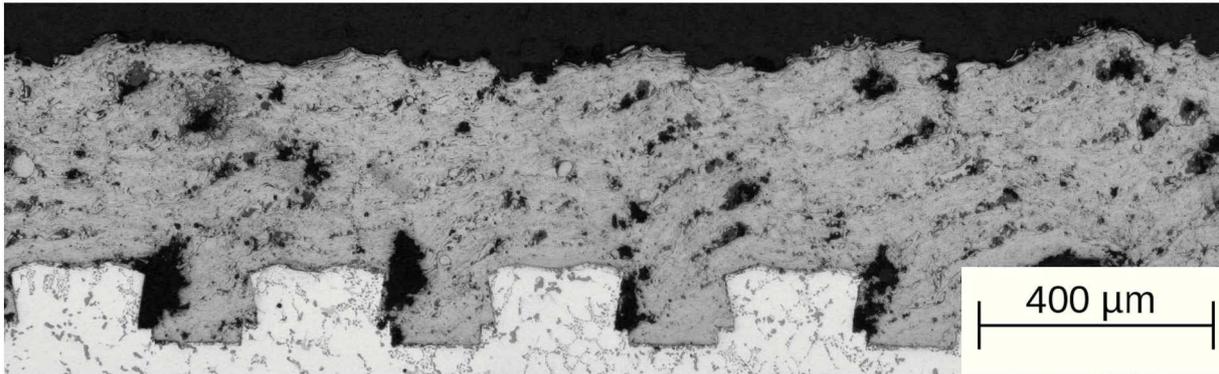


Abbildung 5-7: Schliffbild APS Konfiguration 2, Einlassbereich.

Das Bild ändert sich im Bereich der Verdeckelung, hier kommt es zu keinem durchgängigen Schichtaufbau, Abbildung 5-7 .

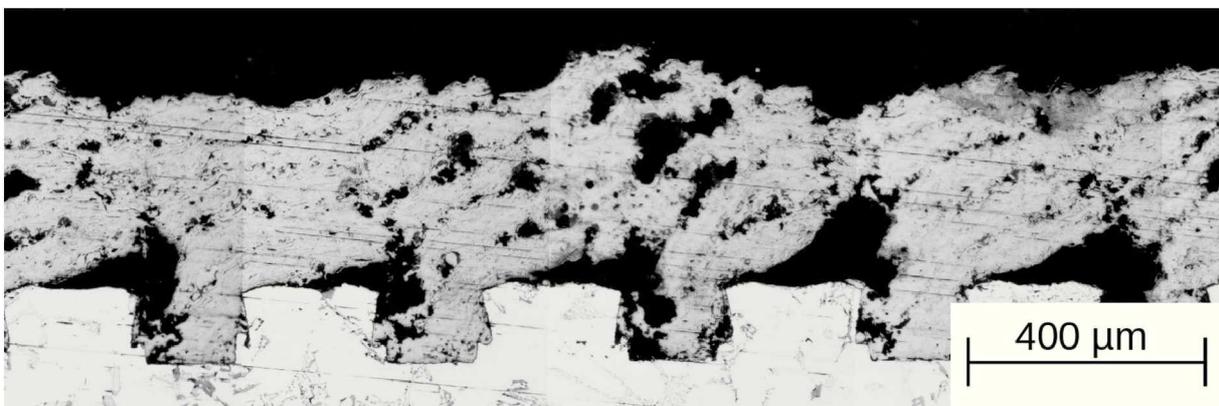


Abbildung 5-8: Schliffbild APS Konfiguration 2, Verdeckelung.

5.1.1.5 APS geschlossener Aufbau Konfiguration 3

Wie in Abbildung 5-9 ersichtlich, ähneln die Ergebnisse der verwendeten Einstellungen am HS1 Sprühkopf den Ergebnissen der PTWA Versuche in Anbetracht der Fußporen, mit steigender Schichtdicke kommt es aber wieder zu einer Bildung von Sprüschatten.

Im Auslaufbereich, Abbildung 5-10 , tritt im Haftgrund bereits ein Schatten auf, ist jedoch deutlich geringer ausgeprägt als bei den APS Konfigurationen 1 und 2. Am rechten Rand der Abbildung befindet sich der Übergangsbereich zur Verdeckelung.

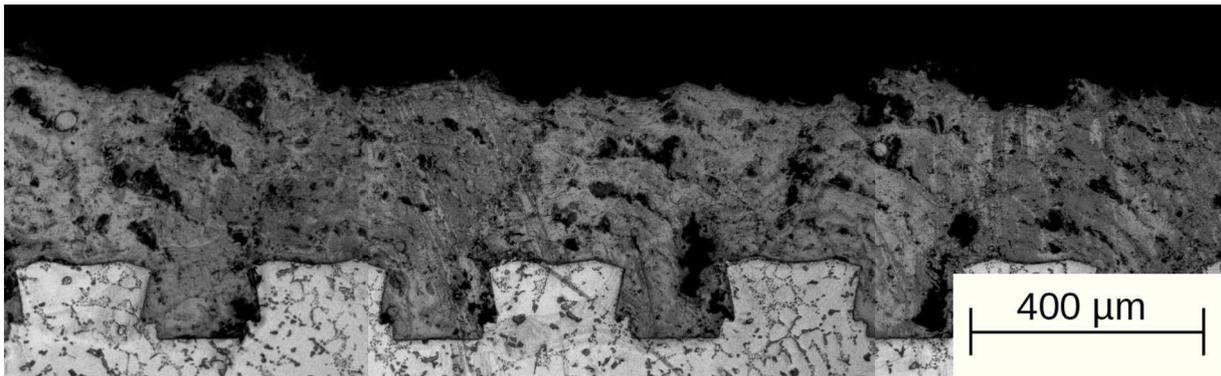


Abbildung 5-9: Schliffbild APS Konfiguration 3, Einlassbereich.

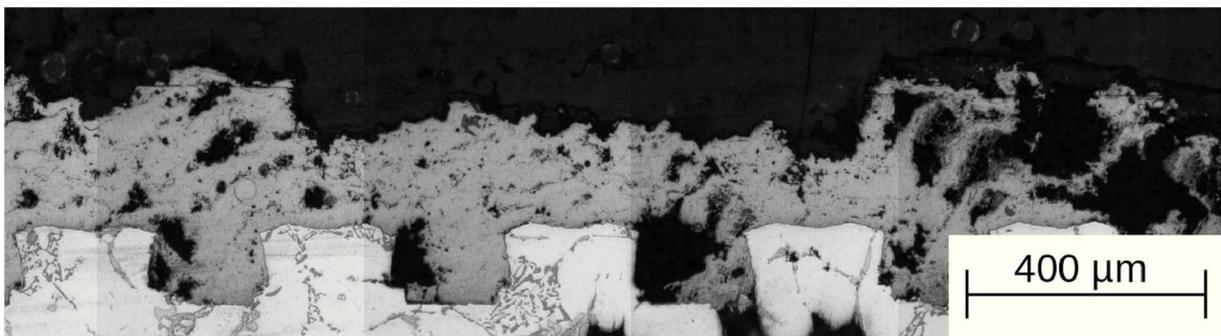


Abbildung 5-10: Schliffbild APS Konfiguration 3, Verdeckelung.

5.1.1.6 APS geschlossener Aufbau Konfiguration 4

Hier zeigt sich, Abbildung 5-11 ein ähnliches Bild wie bei der APS Konfiguration 3, durch den erhöhten Materialeintrag kommt es zu einer verstärkten Bildung von Sprüschatten am Haftgrund.

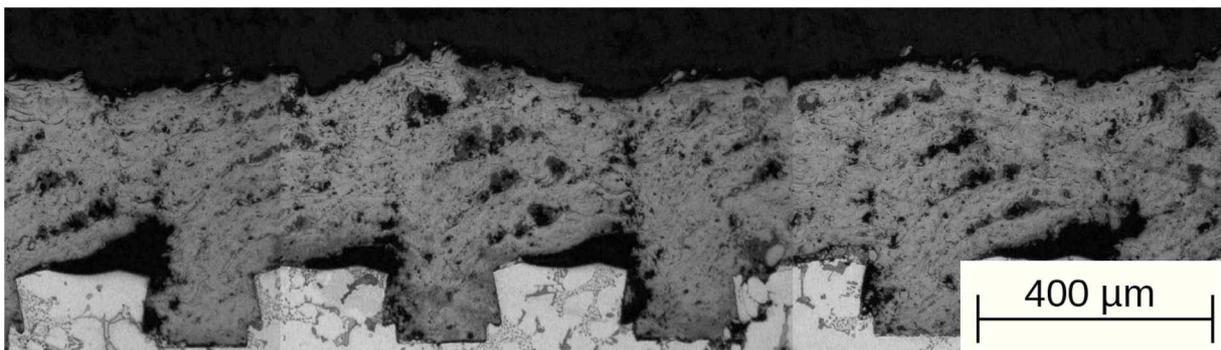


Abbildung 5-11: Schliffbild APS Konfiguration 4, Einlassbereich.

Die Beschichtung bildet sich im Bereich der Verdeckelung, Abbildung 5-12 nur mehr in Form von Lagen aus, die miteinander kaum formschlüssig verbunden sind.

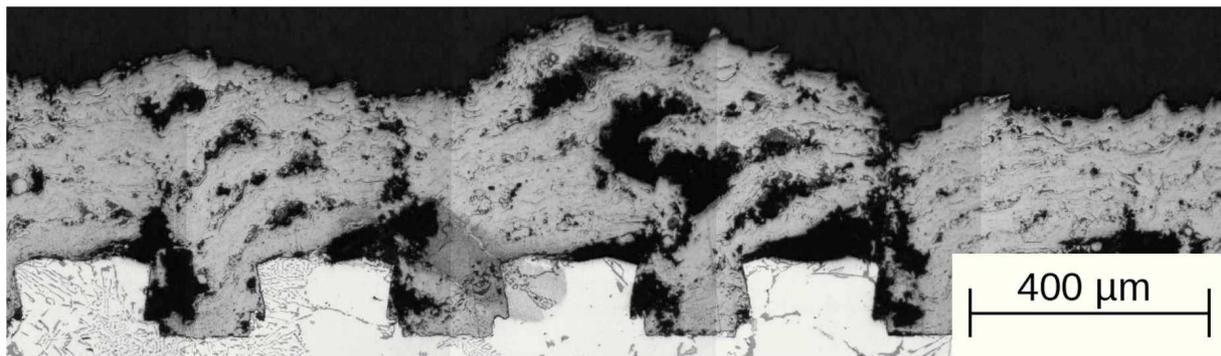


Abbildung 5-12: Schliffbild APS Konfiguration 4, Verdeckelung.

5.1.1.7 Rauigkeitsanalysen

In den nachfolgenden Unterpunkten werden die Ergebnisse für die gängigen Rauigkeitskennwerte kurz graphisch dargestellt. Anzumerken ist, dass die Messwerte für den ersten Zylinder bei dem geschlossenen Aufbau nicht in die Wertung aufgenommen werden, da hier 11 *Zyklen* gefahren wurden, anstatt der 7 bei den anderen Versuchen.

5.1.1.8 Maximale Einzelrautiefe R_{max}

Die große Streuung der Ergebnisse für den zweiten Zylinder sind auf Beschädigungen die während der Probenvorbereitung für die Haftzugprüfung zurück zu führen. Über die Dauer des Gesamtprozesses lässt sich kein eindeutiger Trend vorhersagen, da der vermeintlich mit der Laufzeit, bei der geschlossenen Bauform, ansteigende Wert durch die unterschiedlichen Startparameter für den ersten Zylinder verfälscht werden.

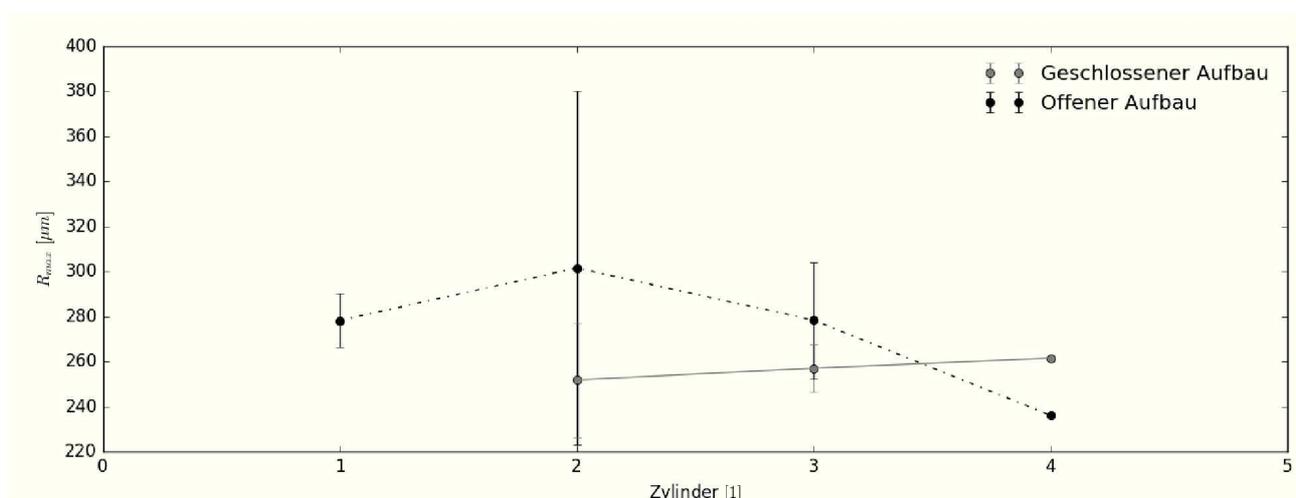


Abbildung 5-13: Maximale Einzelrautiefe.

5.1.1.9 Mittlere Glättungstiefe R_p

Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Ergebnissen für die maximale Einzelrautiefe. Für die beiden zuletzt genannten wirkt sich eine verbesserte Wärmeabfuhr, die an den Zylindern 1 und 4 aus konstruktiven Gründen auftritt, positiv auf die Ergebnisse aus.

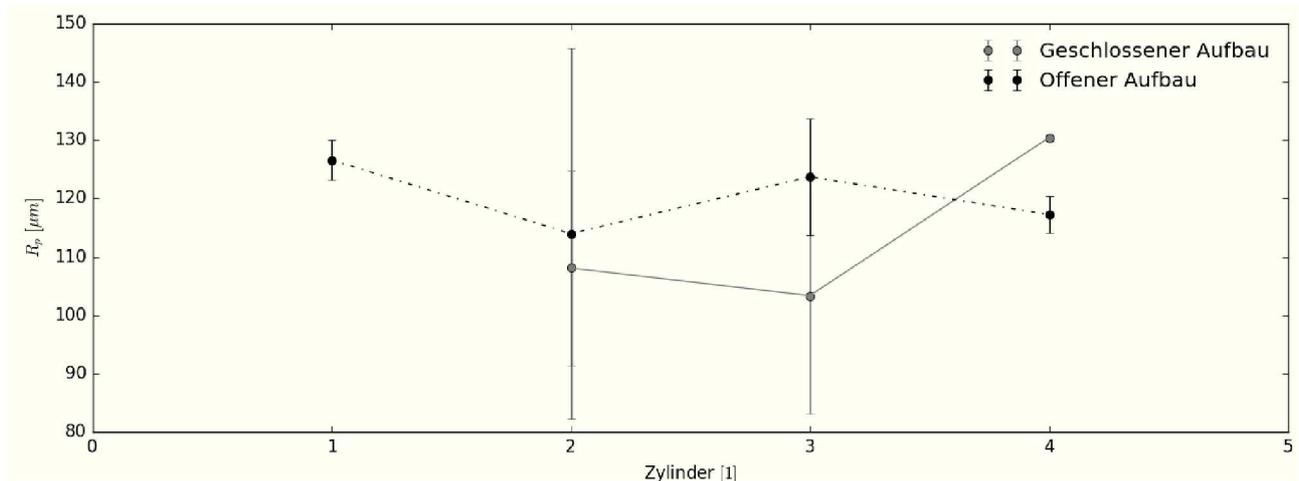


Abbildung 5- 14: Mittlere Glättungstiefe.

5.1.1.10 Rautiefe R_t

Hier wirkt sich wie bei den anderen Ergebnissen eine verbesserte Wärmeabfuhr positiv auf die Ergebnisse aus.

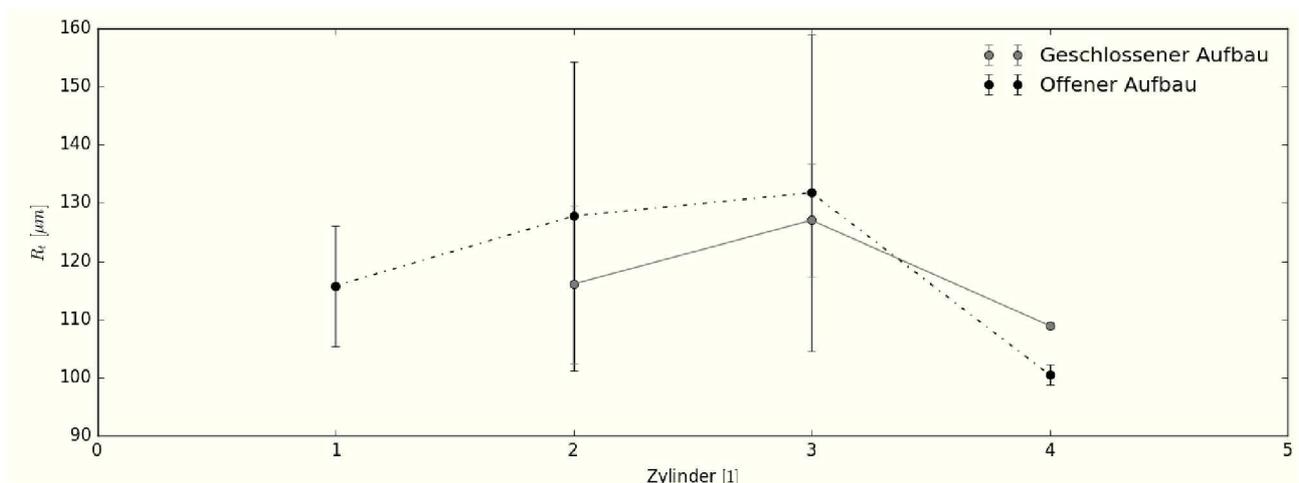


Abbildung 5- 15: Vergleich Rautiefe.

5.1.1.11 Gemittelte Rautiefe R_z

Für die Rautiefe ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Konfigurationen.

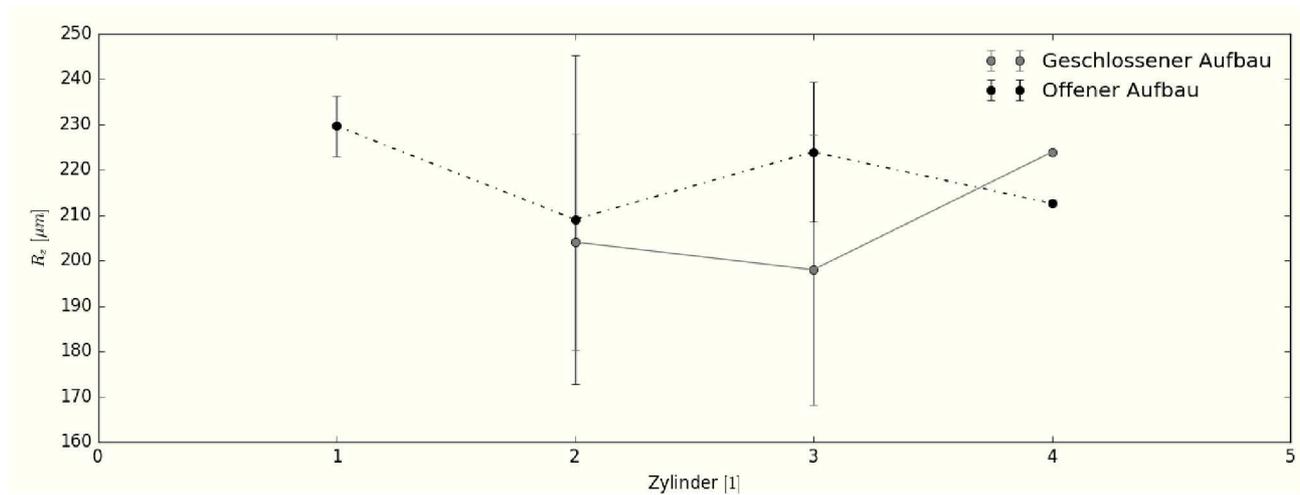


Abbildung 5- 16: Vergleich gemittelte Rautiefe.

5.1.2 Materialverteilung

Der über die Schichtdicke vorhandene Materialanteil wird in Abbildung 5- 17 dargestellt. Hierbei handelt es sich um das Abbott-Firestone Diagramm, dass im Vergleich zu den gängigen Kennwerten der Rauigkeitsanalyse auch Aufschlüsse über die gesamte Topologie der Oberfläche, oder wie hier der Beschichtung zulässt. Die dargestellten Kurven beschreiben den Mittelwert aller Kurven der PTWA Versuche und den zwei Extremen der APS Versuche sowie deren Mittelwert.

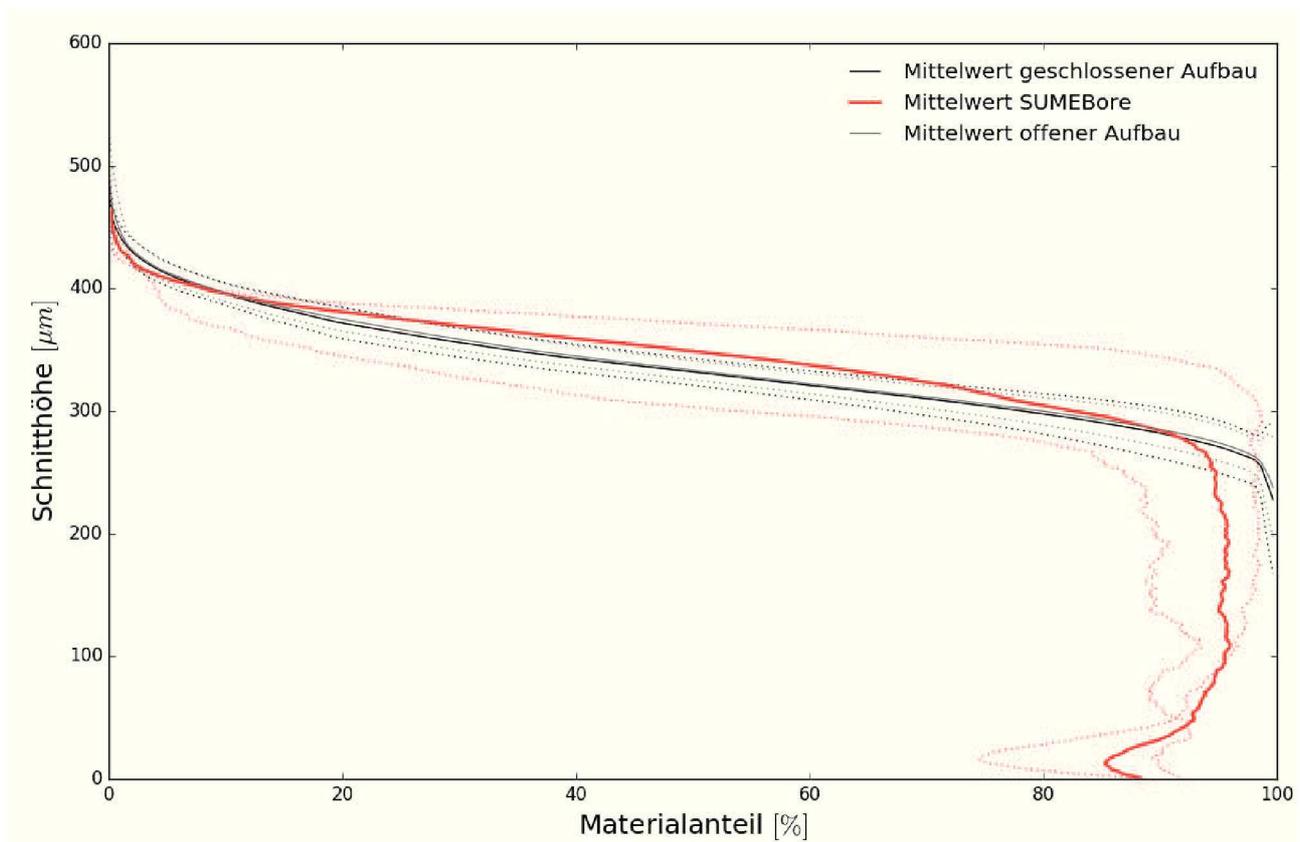


Abbildung 5- 17: Vergleich der Materialverteilungen bei APS und PTWA im Auslaufbereich.

In Abbildung 5- 17 ist ersichtlich, dass zwischen den beiden PTWA Konfigurationen keine Unterschiede auftreten, in dieser Abbildung werden die verschiedenen Konfigurationen für APS zusammengefasst und die beiden Extrema zusätzlich dargestellt. Im Vergleich zu den PTWA Versuchen streut hier der Materialanteil sehr stark. In Abbildung 5- 18 werden die einzelnen APS Konfigurationen gegenübergestellt, wie in den Schliiffbildern bereits ersichtlich ist, zeigt die verminderte Förderrate bei dem HS1 Brenner die besten Ergebnisse, es kommt zwar zu einer hohen Gesamtporosität, diese ist jedoch über die Schichthöhe konstant und die Ausbildung von Beschichtungsschatten im Haftgrund tritt nur vereinzelt auf. Bei der höheren Fördermenge in der letzten Konfiguration zeigt sich ein gegenteiliges Bild, hier treten große Ungängen im Bereich des Haftgrundes auf.

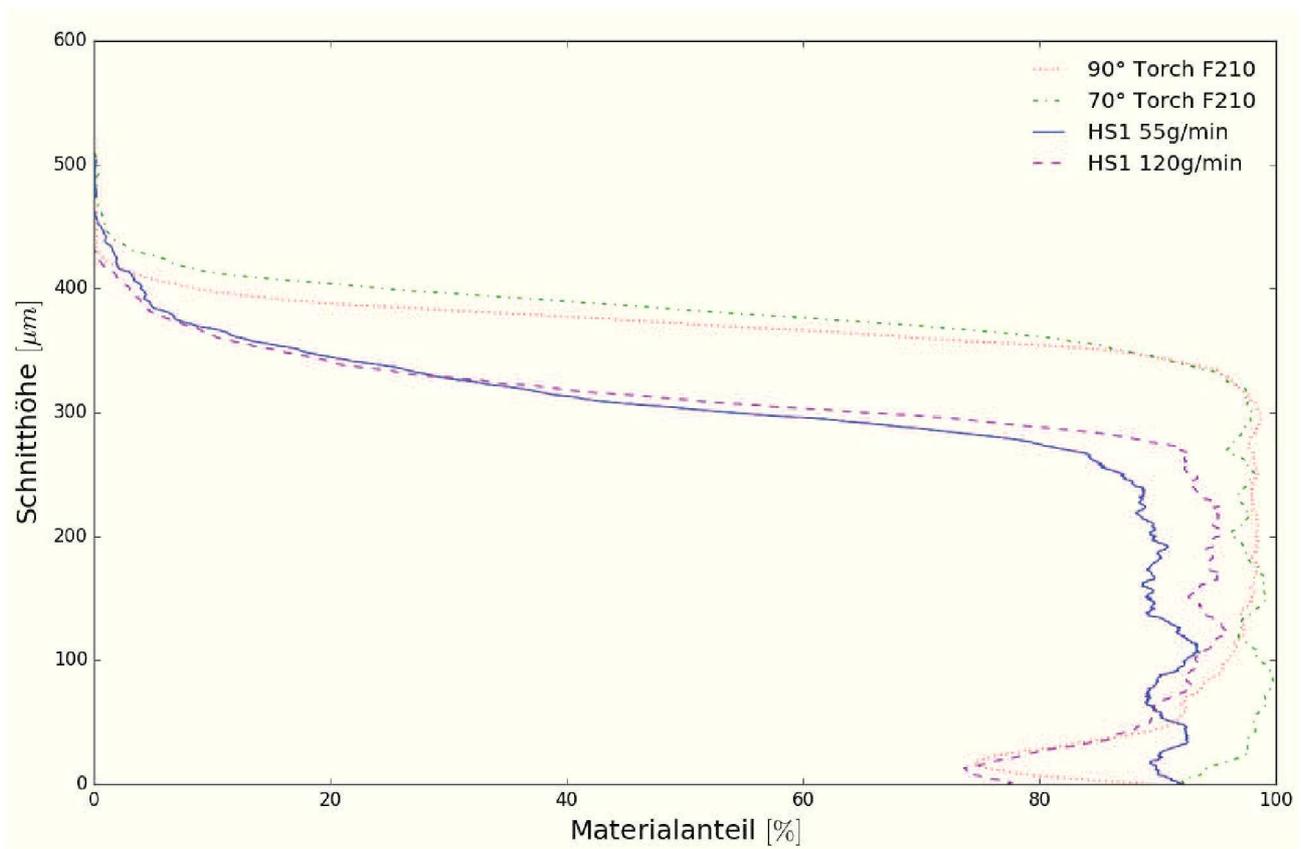


Abbildung 5- 18: Vergleich der Materialverteilungen APS im Auslaufbereich.

5.1.3 Beschichtungslänge

In Abbildung 5- 19 sind die ungefilterten aufgezeichneten Kurven dargestellt. Die Ausreisser im unteren Bereich sind die Positionen der Haftzugprüfungen und diese Bereiche werden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Die beiden oberen Kurven stammen aus dem Zyklus mit 11 Wiederholungen. Generell lässt sich die Beschichtung in drei Bereiche unterteilen, dem Einlaufbereich, dem Kernbereich und den Auslaufbereich. Die Länge des Einlaufbereiches beträgt etwa 30 mm. Hier kommt es zu einem langsamen Anwachsen der Schichtdicke bis ein stabiler Strömungszustand erreicht wird, dem Kernbereich .

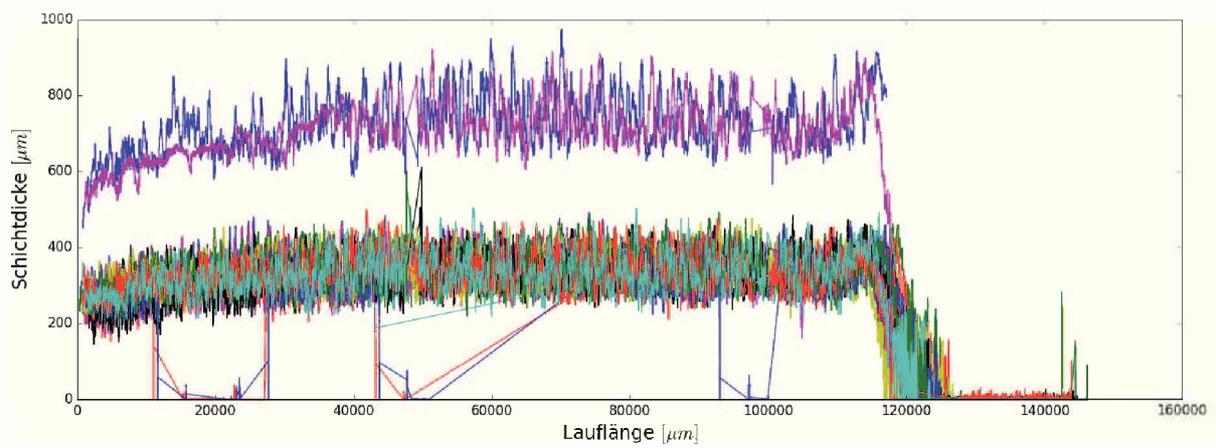


Abbildung 5-19: Ungefilterter Datensatz der Schichtdicke.

Im Auslaufbereich kommt es zu einer geringfügigen Aufdickung durch das Wenden am unteren Totpunkt.

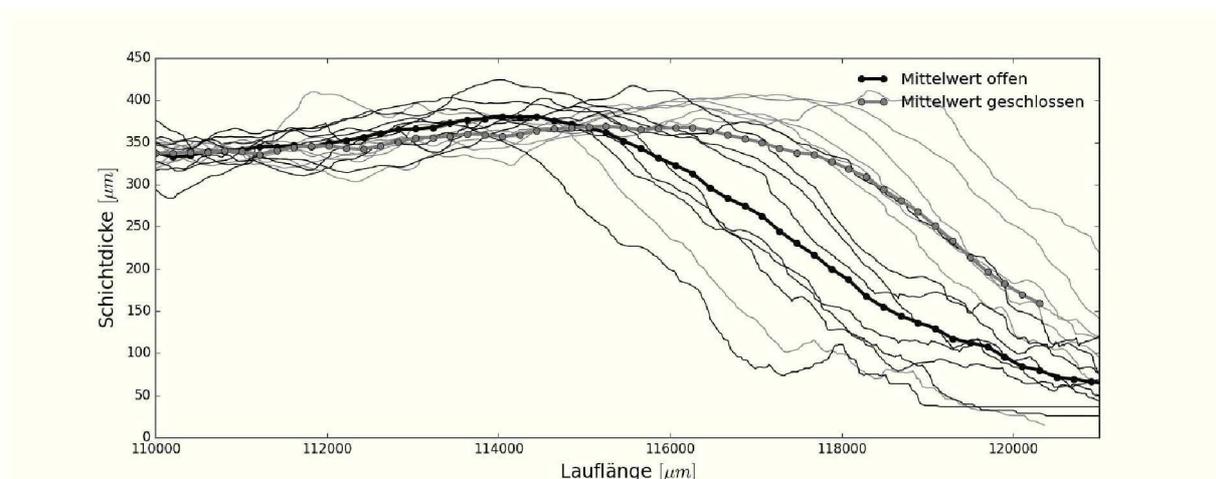


Abbildung 5-20: Schichtdicke Auslauf.

Wie in Abbildung 5- 20 erkennbar ist, tritt dieses Phänomen bei der geschlossenen Bauform verringert auf, die Beschichtungslänge ist in Tabelle 5- I aufgelistet.

Tabelle 5-I: Beschichtungslänge über die Schichtdicke.

Aufbau	Schichtdicke [μm]	Beschichtungslänge [mm]
Geschlossen	100	121.2
	150	120.5
	200	119.7
	250	119.1
	300	118.4
Offen	100	119.6
	150	118.6
	200	117.5
	250	117.2
	300	116.4

Dabei ist erkennbar, dass bei der geschlossenen Bauform eine geringfügig größere, 1.5 mm , Beschichtungslänge erreicht wird. Dies ist auf die, durch die Blende, stark reduzierte Strömungsgeschwindigkeit im unteren Bereich zurückzuführen.

5.1.4 Porosität

5.1.4.1 Gesamtporosität

In der Abbildung 5- 21 sind die Ergebnisse der PTWA Porositätsauswertungen aufgetragen. Dabei ist zu sehen, dass zwischen den beiden Konfigurationen im Mittel nur ein geringer Unterschied vorliegt. Die überhöhten Werte lassen sich durch einzelne große Poren erklären. Der Versatz der Messpunkte wird durch das teilweise Unterschreiten von $200\mu m$ Schichtdicke begründet, was ein Versetzen dessen notwendig macht, da es ansonsten zu einer falschen Bestimmung der Porosität kommt. Im Allgemeinen zeichnet sich dieses Verfahren durch eine sehr dichte und homogene Schicht aus.

Die Ergebnisse für die APS Versuche werden in Abbildung 5- 22 gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die Versuche mit dem F210 Sprühkopf die geringsten Werte für dieses Verfahren erreichen. Es zeigt sich in der Porosität kein signifikanter Unterschied bei der Anstellung des Sprühkopfes. Bei den Versuchen mit dem HS1 Sprühkopf ergeben sich die höchsten Porositäten. Interessant ist dabei, dass bei der geringeren Förderrate die höchsten Werte gemessen wurden, diese aber ohne Poren im Haftgrund erreicht werden.

Für den direkten Vergleich der beiden Verfahrenskonzepte werden die Messungen in Abbildung 5- 23 dargestellt.

5.1.4.2 Geometrie der Ungängen

Die Geometrie der Ungängen lässt sich in drei Klassen einteilen. Bei einem Breite zu Höhe Verhältnis von 1 handelt es sich vorwiegend um kleine Poren $< 5\mu m$ und Blowby. Die zweite

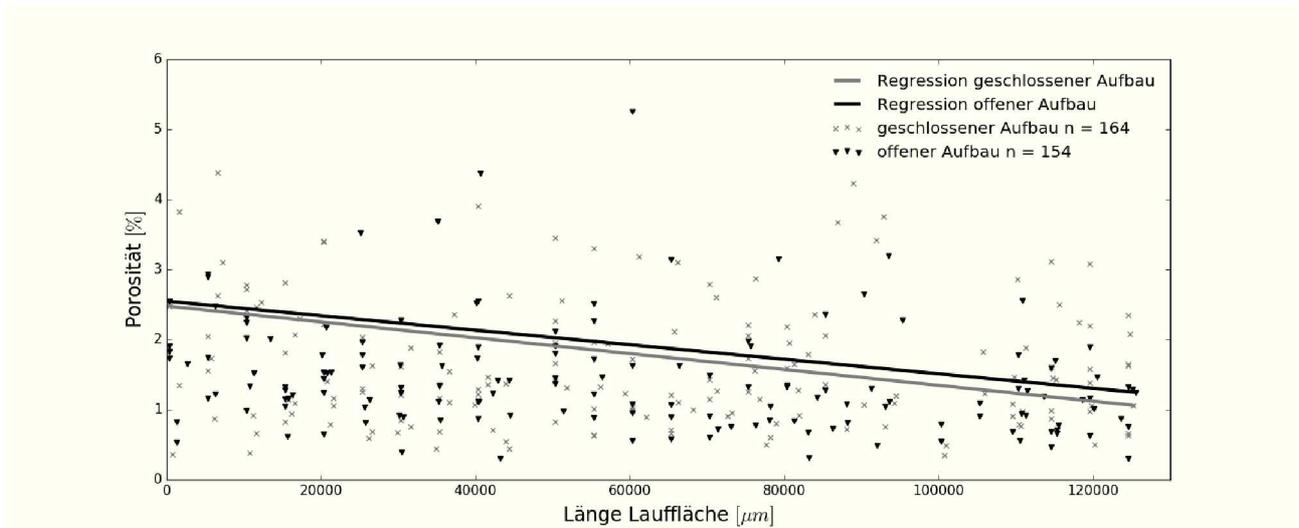


Abbildung 5- 21: Porosität der Beschichtung über die Lauflänge der PTWA Versuche.

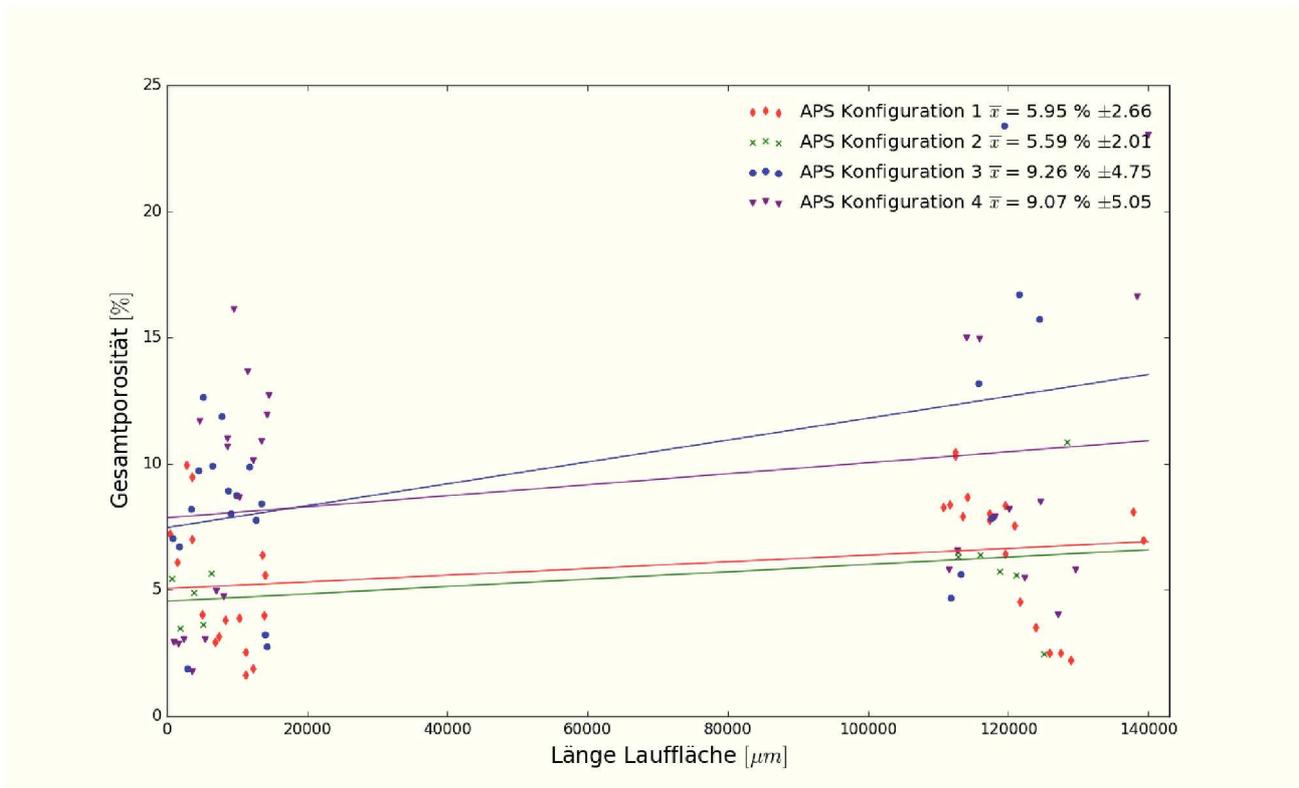


Abbildung 5- 22: Vergleich der Gesamtporosität APS.

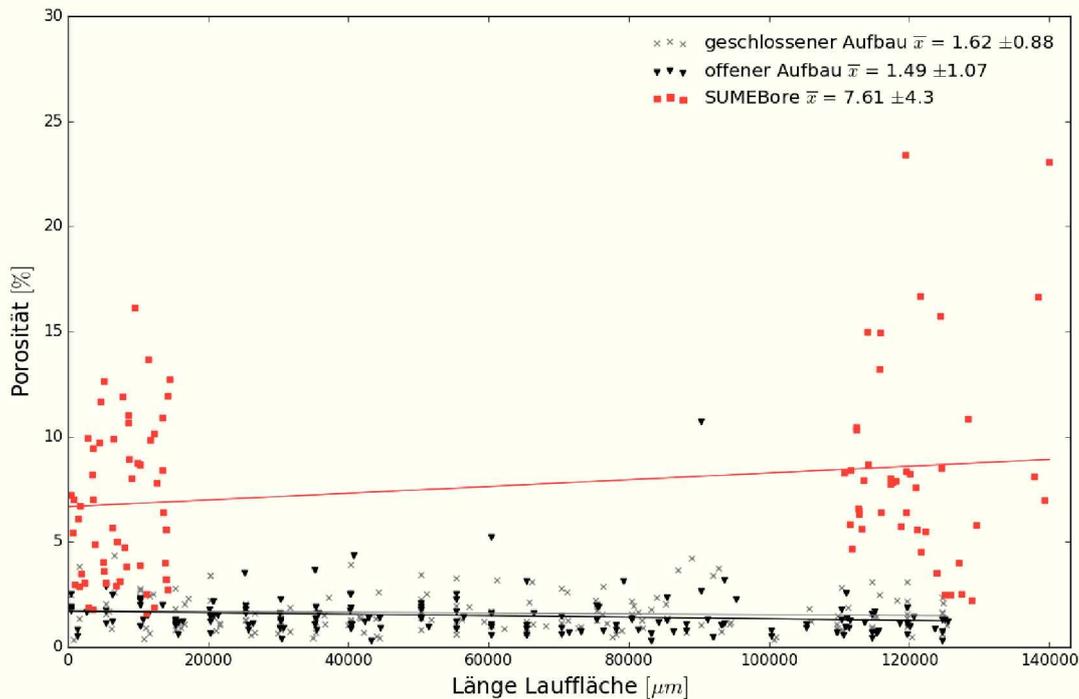


Abbildung 5- 23: Vergleich der Gesamtporosität.

Klasse stellen die Sprüschatten mit einem typischen Verhältnis von 2 dar. größere Werte werden von Delaminationen verursacht. Ein Vergleich für diese Formen wird in Abbildung 5- 24 dargestellt.

5.1.4.3 Streuung der Porosität

Die statistische Verteilung der Messergebnisse, bei der Betrachtung der einzelnen Konfigurationen, lässt sich am besten mit der Weibull-Verteilung beschreiben. Man kann sie als eine verallgemeinerte Form der Gauss- und der Rayleigh-Verteilung sehen, wo diese Spezialfälle darstellen. In Abbildung 5- 25 und Abbildung 5- 27 sind die Histogramme mit der zugehörigen Verteilungsfunktion dargestellt. In der nachfolgenden Abbildung 5- 25 werden die Verteilungsfunktionen gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die Messergebnisse für den geschlossenen Aufbau breiter streuen, aber deren Erwartungswert sich kaum von dem des offenen Aufbaues unterscheidet. Die breitere Verteilung lässt sich auf einen höheren Anteil an Blowbye erklären. Dieser lässt sich aber bei der Messung schwer bis kaum von den Poren unterscheiden, da er sehr fein auftritt. Grobe Partikel sind die Ausnahme. Eine sichere geometrische Unterscheidung zwischen Poren und Partikeln ist nicht möglich, da beide Formen rund auftreten.

Der in der Abbildung angegebene Wert für die Abweichung beschreibt den Fehler zwischen

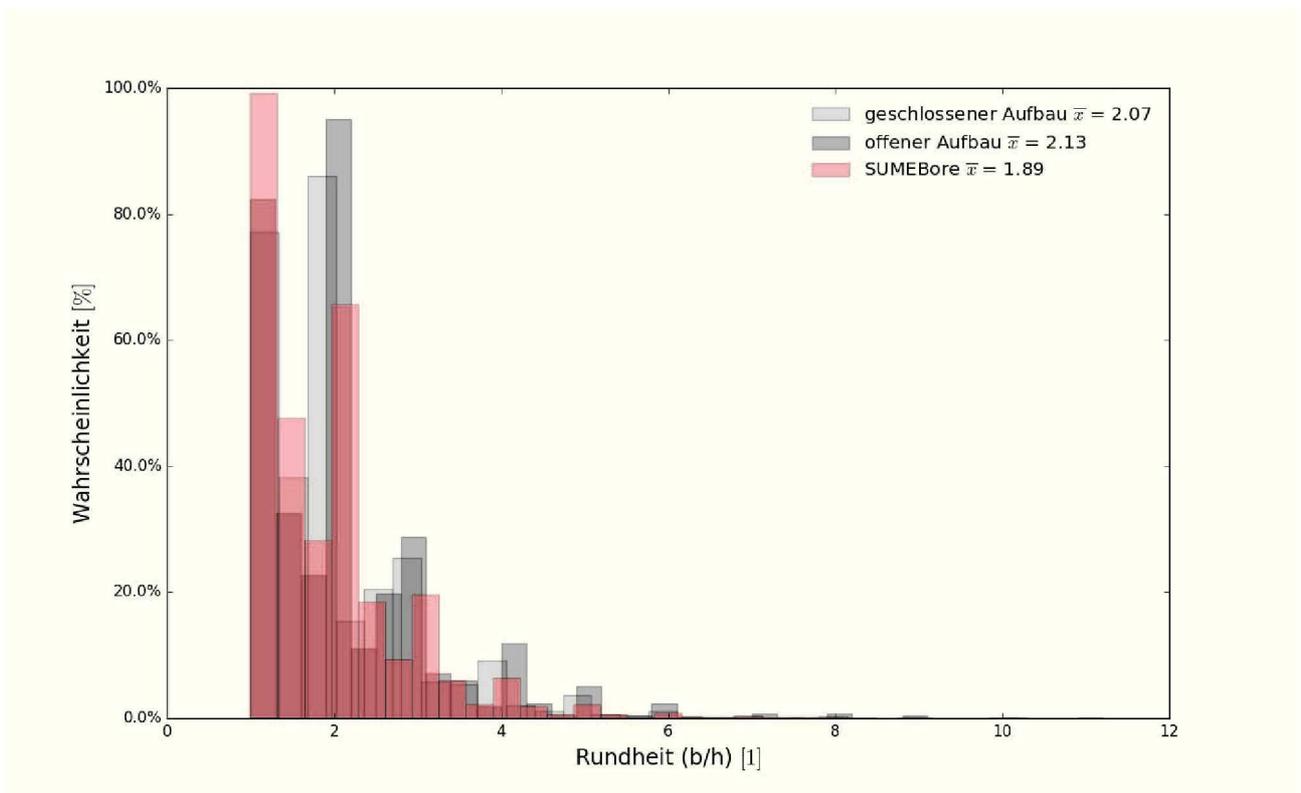


Abbildung 5- 24: Vergleich der Porositätsgeometrie.

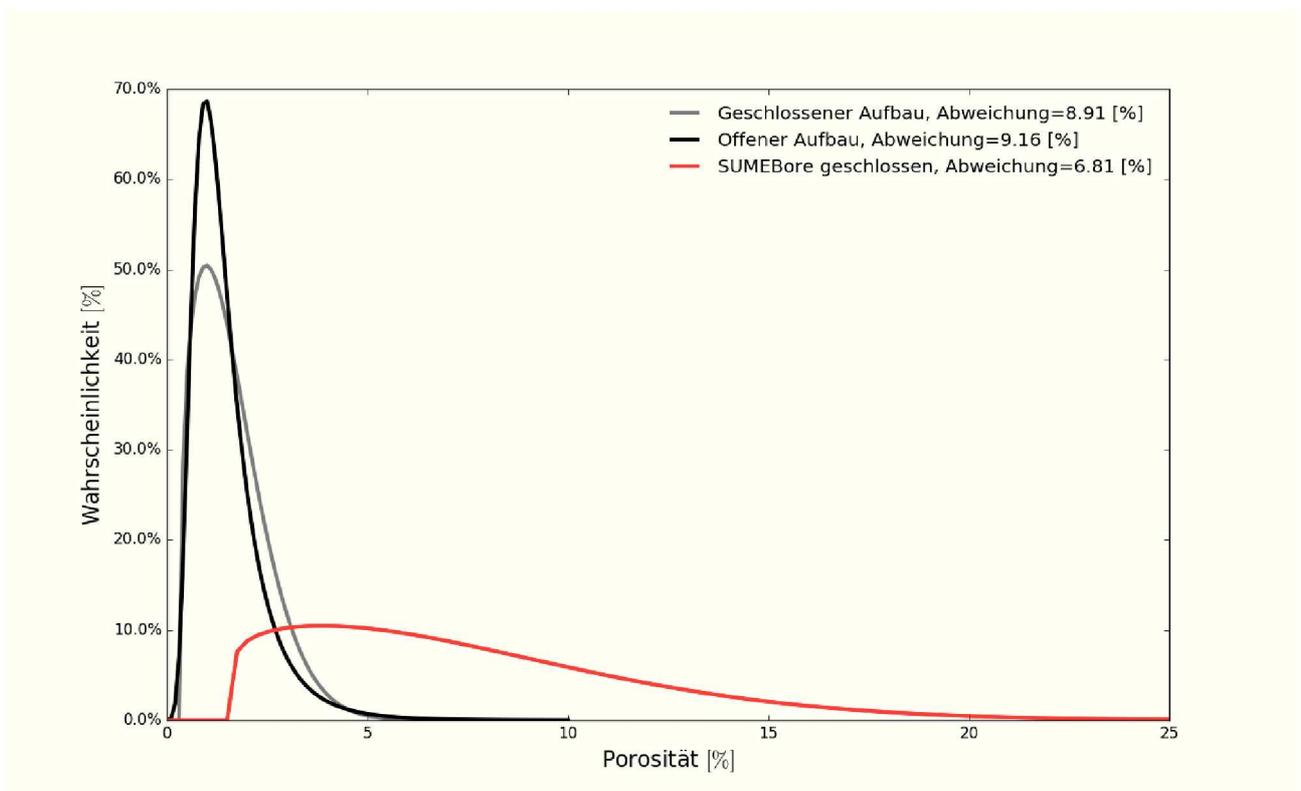


Abbildung 5- 25: Verteilung der Messwerte der Porosität PTWA und APS.

der Verteilung der Ergebnisse und der gefitteten Weibull Verteilung. Um dies zu verdeutlichen wird das Histogramm und die gefittete Kurve für den geschlossenen PTWA Versuch in Abbildung 5-26 dargestellt.

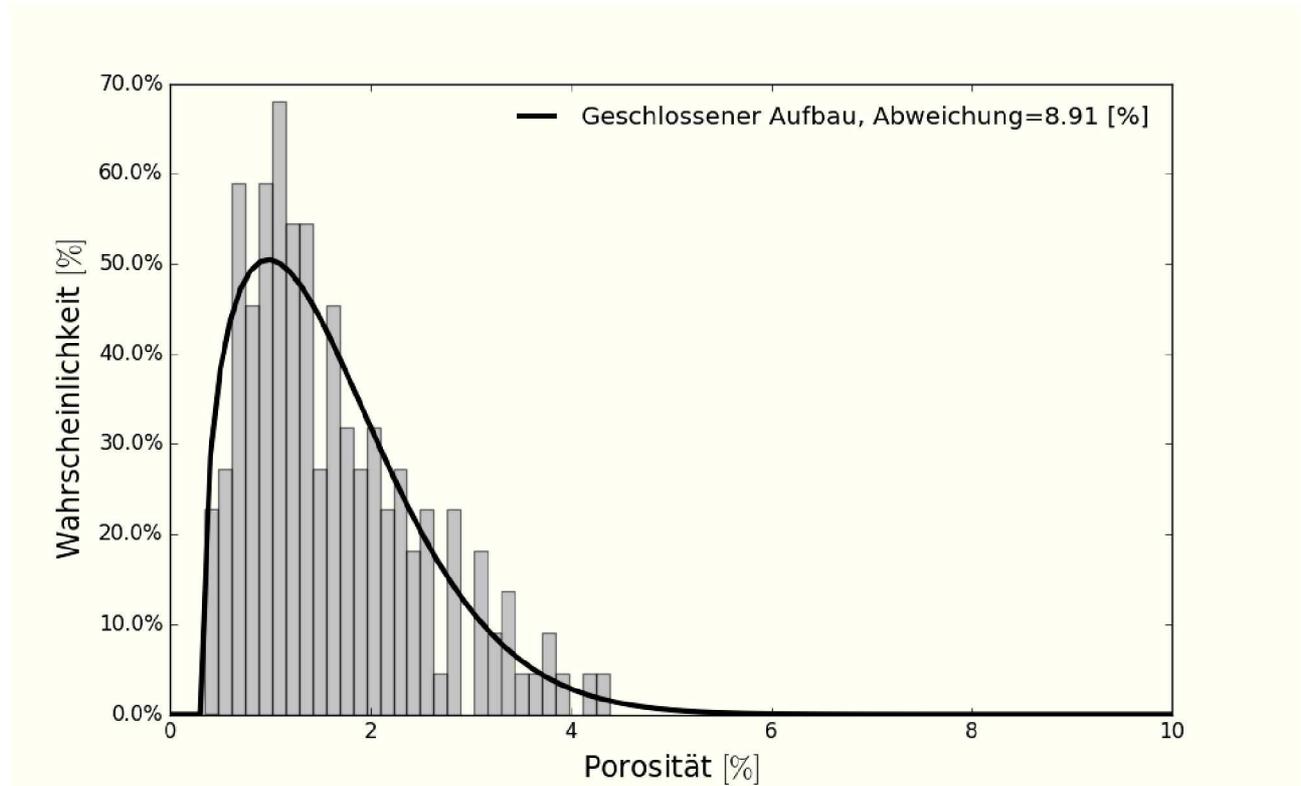


Abbildung 5-26: Unterschied Ergebnisse und Weibull-Fit.

Die große Streuung der Porosität bei den APS Versuchen, Abbildung 5-27, wird durch das Auftreten von Sprühschatten verursacht.

In Tabelle 5-II sind die Ergebnisse für die PTWA Versuche zusammengefasst.

Tabelle 5-II: Statistik Gesamtporosität.

Aufbau	Messungen [1]	Erwartungswert [%]	Standardabweichung [%]
Geschlossen	164	1.62	0.88
Offen	154	1.43	0.77

5.1.5 Bindungsfehler

Der schwerwiegendste beobachtete Fehler sind Ungenzen im Haftgrund. Diese treten bei beiden Bauformen gleichermaßen auf. In Abbildung 5-28 sind zwei dieser Poren dargestellt. Problematisch ist das dieser Fehler nicht lokal begrenzt auftritt sondern sich über größere Längen entlang der Rille im Haftgrund erstreckt.

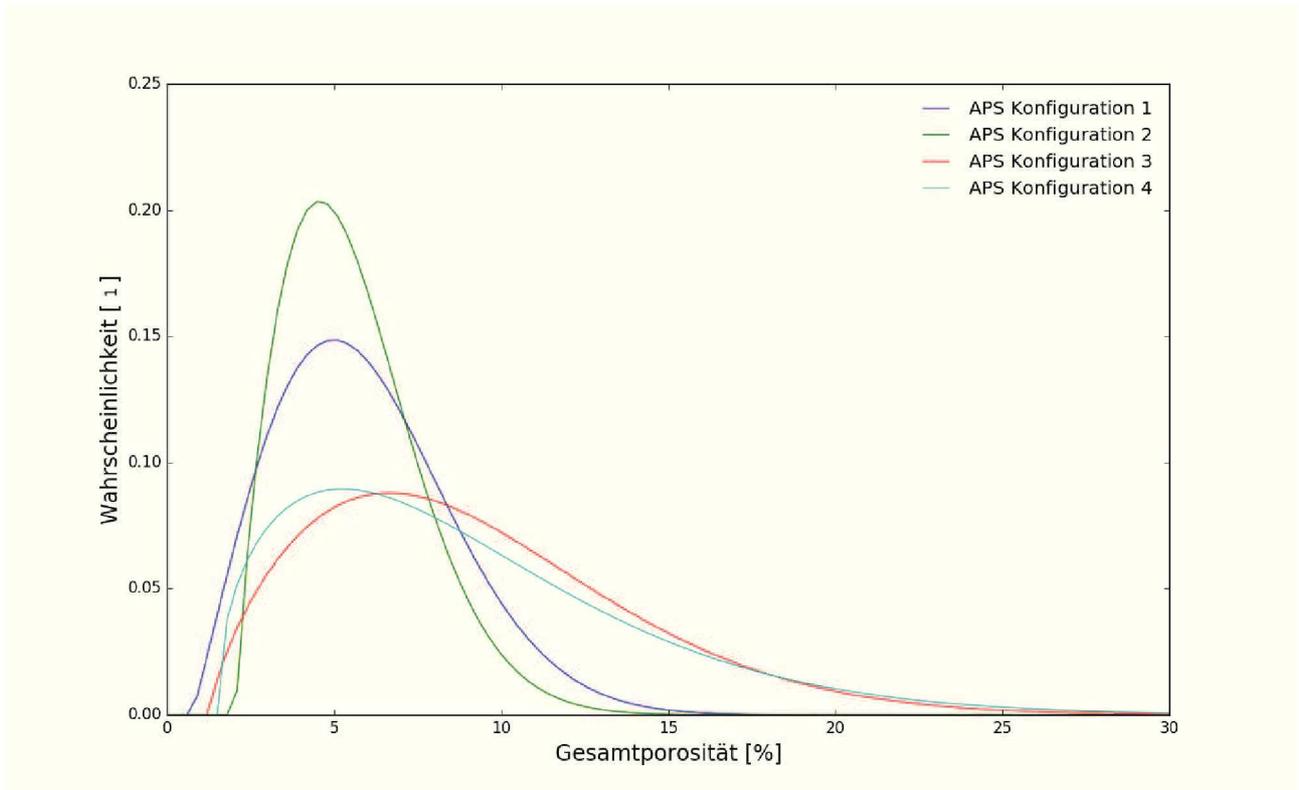


Abbildung 5-27: Verteilung der Gesamtporosität APS.

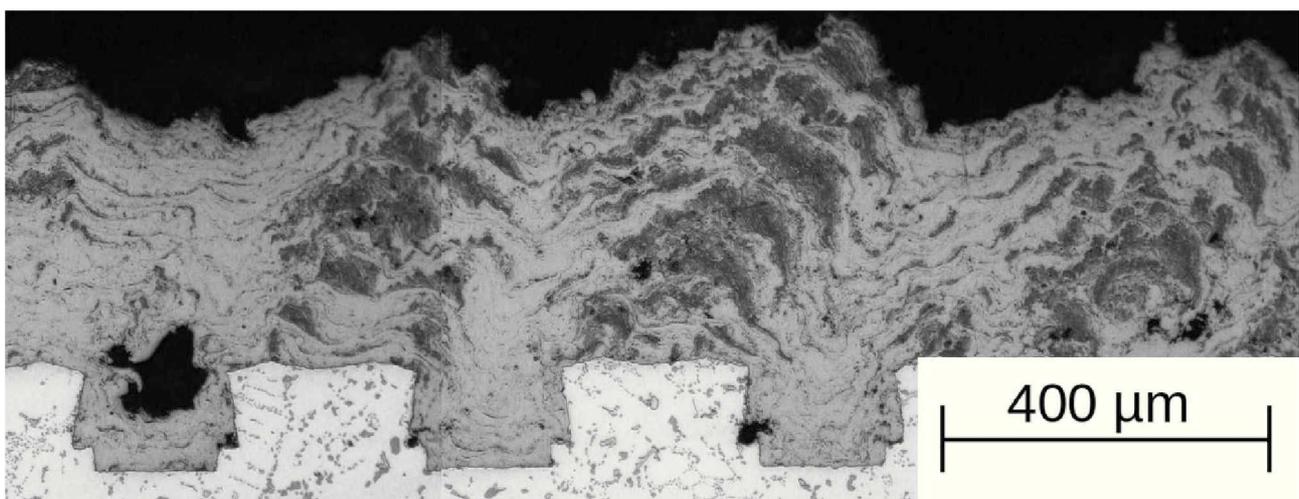


Abbildung 5-28: Poren im Haftgrund.

Die Entstehung dieser Ungängen liegt in einem zu hohen Materialauftrag während der ersten Lagen. Der zeitliche Ablauf der Bildung einer solcher Pore ist in Abbildung 5- 29 abgebildet. Anfangs bildet sich an den beiden Kanten der Kavität ein Dom, der sich nach wenigen Zyklen schließt und ein Füllen der Pore nicht mehr ermöglicht. Dies konnte auch bei den APS Versuchen beobachtet werden.

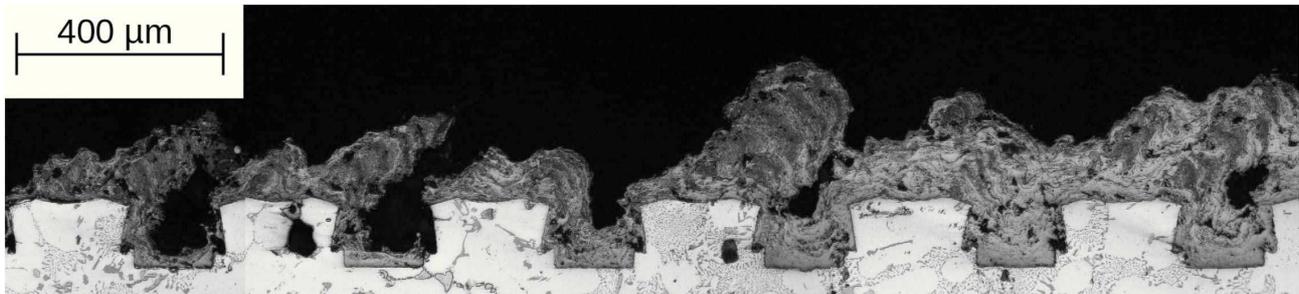


Abbildung 5- 29: Entstehung Poren im Haftgrund.

Das im Hohlraum verbleibende Material kann nun keinen ausreichenden Widerstand mehr gegen ein Abziehen erzeugen und bricht bei Belastung an der Pore. Dies ist in Abbildung 5- 30 , an einem Schliff im Bereich der Haftzugprüfung, ersichtlich.

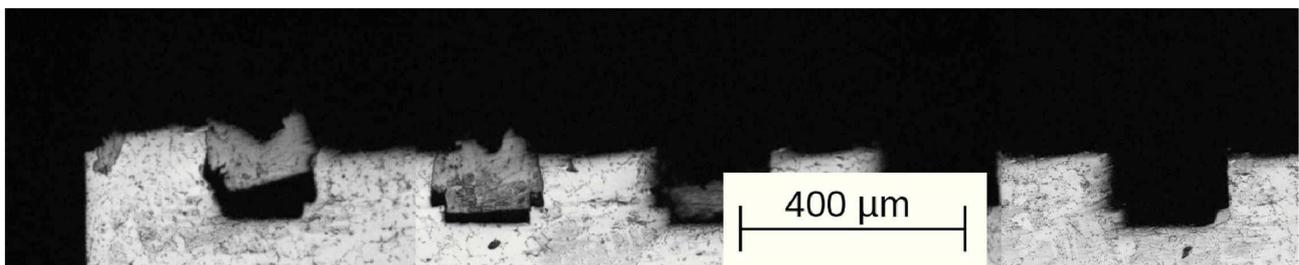


Abbildung 5- 30: Bruch Pore im Haftgrund.

5.1.6 Haftzugfestigkeit

In Tabelle 5- III sind die Ergebnisse der Haftzugmessung aufgelistet. Dabei streuen die Ergebnisse der offenen Konfiguration stärker und weisen eine 9.2 % höhere Haftzugfestigkeit auf. Aufgrund der hohen Porosität weisen die APS Beschichtungen deutlich schlechtere Ergebnisse auf.

Tabelle 5- III: Haftzugfestigkeiten

Aufbau	Haftzugfestigkeit [MPa]	Mittelwert [MPa]
Geschlossen	30.6	31.4±1.39
	33.0	
	30.6	
Offen	37.8	34.6 ±3.67
	35.4	
	30.6	
APS Konfiguration 1	4.8	5.6 ±1.1
	7.2	
	4.8	
APS Konfiguration 2	19.3	14.8 ±5.1
	7.2	
	18	
APS Konfiguration 3	11.4	7.0 ±3.1
	7.2	
	2.4	
APS Konfiguration 4	15	12.4 ±3.5
	15	
	7.2	

5.1.7 Temperaturlaufzeichnung

5.1.7.1 Offener Aufbau

In Abbildung 5-31 sind die aufgezeichneten Temperaturverläufe eingetragen. Für eine bessere Vergleichbarkeit werden diese in Kelvin betrachtet. Dabei ist erkennbar, dass die maximale Temperatur des Motorblocks auch bei einer beidseitigen Beschichtung gegen 430K konvergiert und lokal nach 3min die 370K unterschreitet.

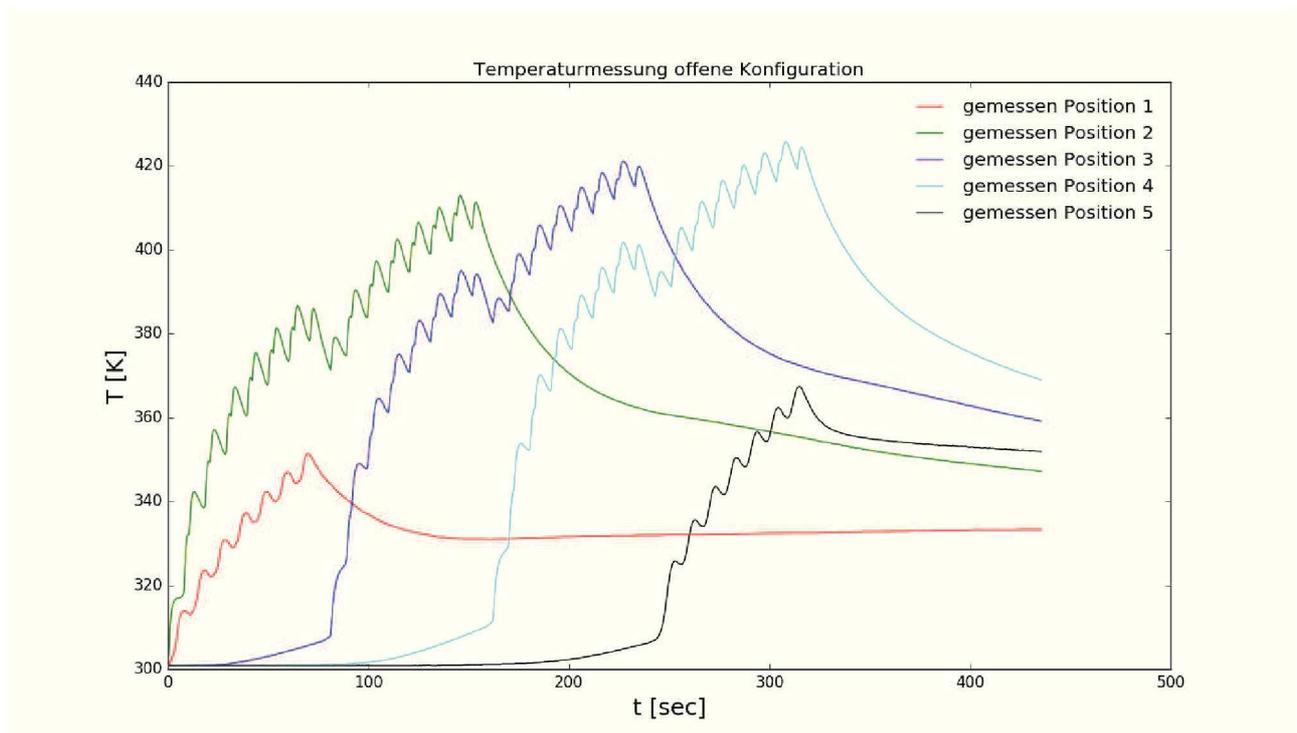


Abbildung 5-31: Gemessene Temperaturen im offenen Aufbau.

Dadurch ist eine Beeinflussung des Grundgefüges unwahrscheinlich. Wird die Beschichtung nach dem Lösungsglühen durchgeführt, ist es durchaus denkbar, dass es hier zu einer Bildung feindispers verteilter Keime, für eine spätere Warmauslagerung, kommt. Untersuchungen für das System AlSi12Cu [33] zeigten, wie in Abbildung 5-32 ersichtlich, dass bei der Anwesenheit von Kupfer eine Alterung schon bei kurzen Haltezeiten und Temperaturen eintritt. Das System AlSi7Mg0.3 zeigt ohne Kupfer bei diesen Temperaturen und Behandlungszeiten nicht dieses Verhalten, Abbildung 5-33. Erst Haltezeiten von 500h bei diesen Temperaturen und ein Cu -Gehalt von mindestens 0.5% führen zu einer signifikanten Änderung[35].

5.1.7.2 Geschlossener Aufbau

Hier wurde der erste Zylinder mit 11 Lagen beschichtet. Dadurch ist auch die gesamte thermische Belastung höher. Dennoch konvergiert die maximale Temperatur hier wieder

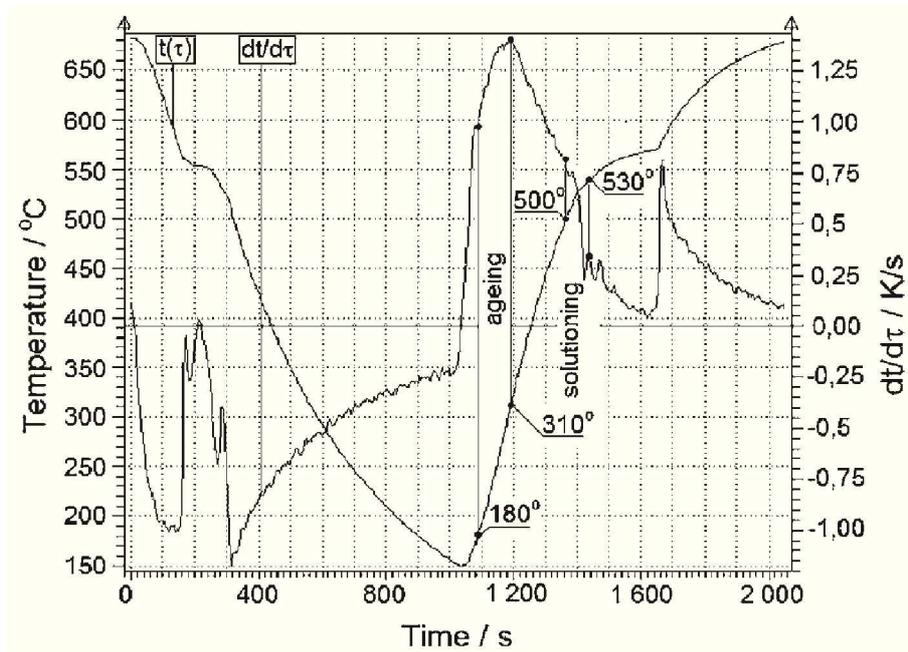


Abbildung 5- 32: ATND Aufzeichnung AlSi12Cu[33].

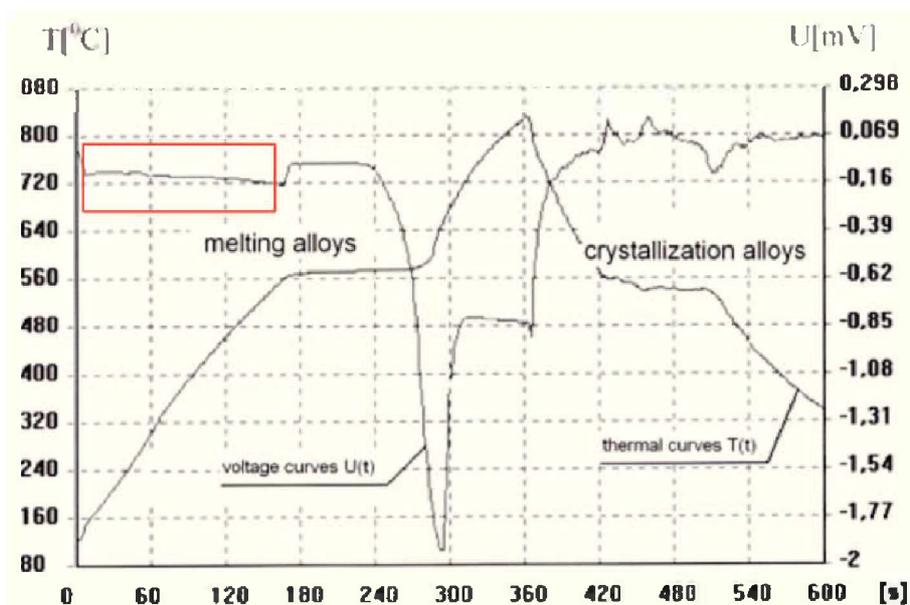


Abbildung 5- 33: ATND Aufzeichnung einer Kupfer freien AlSi9Mg Legierung[34].

gegen $430K$ und zeigt insgesamt einen ähnlichen Verlauf wie der offene Aufbau.

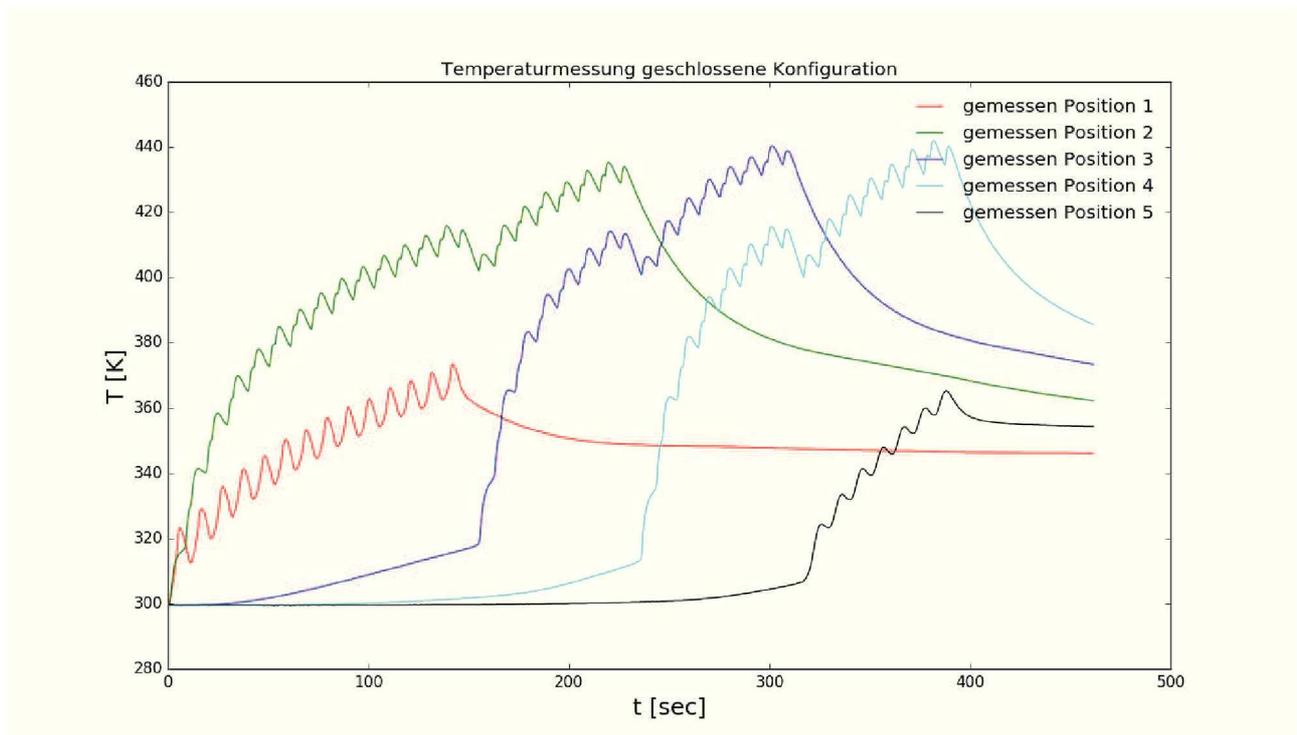


Abbildung 5- 34: Gemessene Temperaturen im geschlossenen Aufbau.

5.1.7.3 Vergleich

Bei dem Vergleich der beiden Kurven für die Position 2, die dem Kontakt zum Kurbelgehäuse entspricht, ist nach 7 Zyklen ein Unterschied von $4K$ zwischen beiden Varianten messbar. Hier ist bereits erkennbar, dass es kaum einen Unterschied in der Strömung durch die unterschiedliche Absaugung kommt. Bei der Position 1 zeigt sich im geschlossenen Aufbau ein höherer Ausschlag als bei der offenen Bauform. Betrachtet man den zeitlichen Versatz des Anstieges legt dies den Verdacht nahe, dass dieses Thermoelement geringfügig näher an der Oberfläche platziert ist, als das vom offenen Aufbau, da dieser hier voreilt. Eine Begründung für diese Abweichung liegt in der schweren Zugänglichkeit dieser Position bei der Platzierung vor dem Versuch.

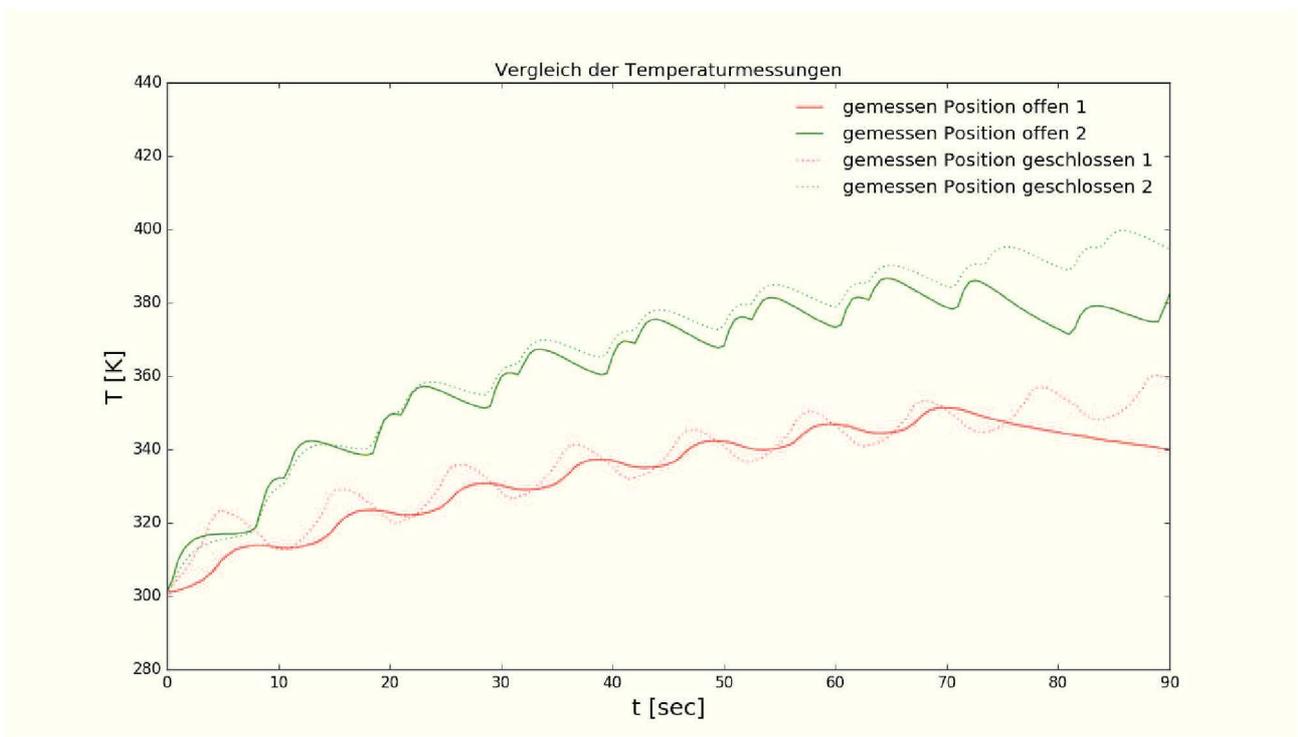


Abbildung 5- 35: Vergleich der gemessenen Temperaturen zu Beginn.

5.2 Simulation

Von vorangiger Interesse ist hier die Abbildung des Wärmeeintrages in das System. In Abbildung 5-36 ist die Verteilung der Temperatur über den Querschnitt dargestellt. Hier ist erkennbar, dass der Hauptenergieeintrag lokal begrenzt erfolgt, sowie die tatsächliche Materialverteilung und Wandstärke den Haupteinfluss auf die Temperaturverteilung hat, da die Wärmeleitung im Gussteil den Wärmeeintrag über die Primärzone reduziert.

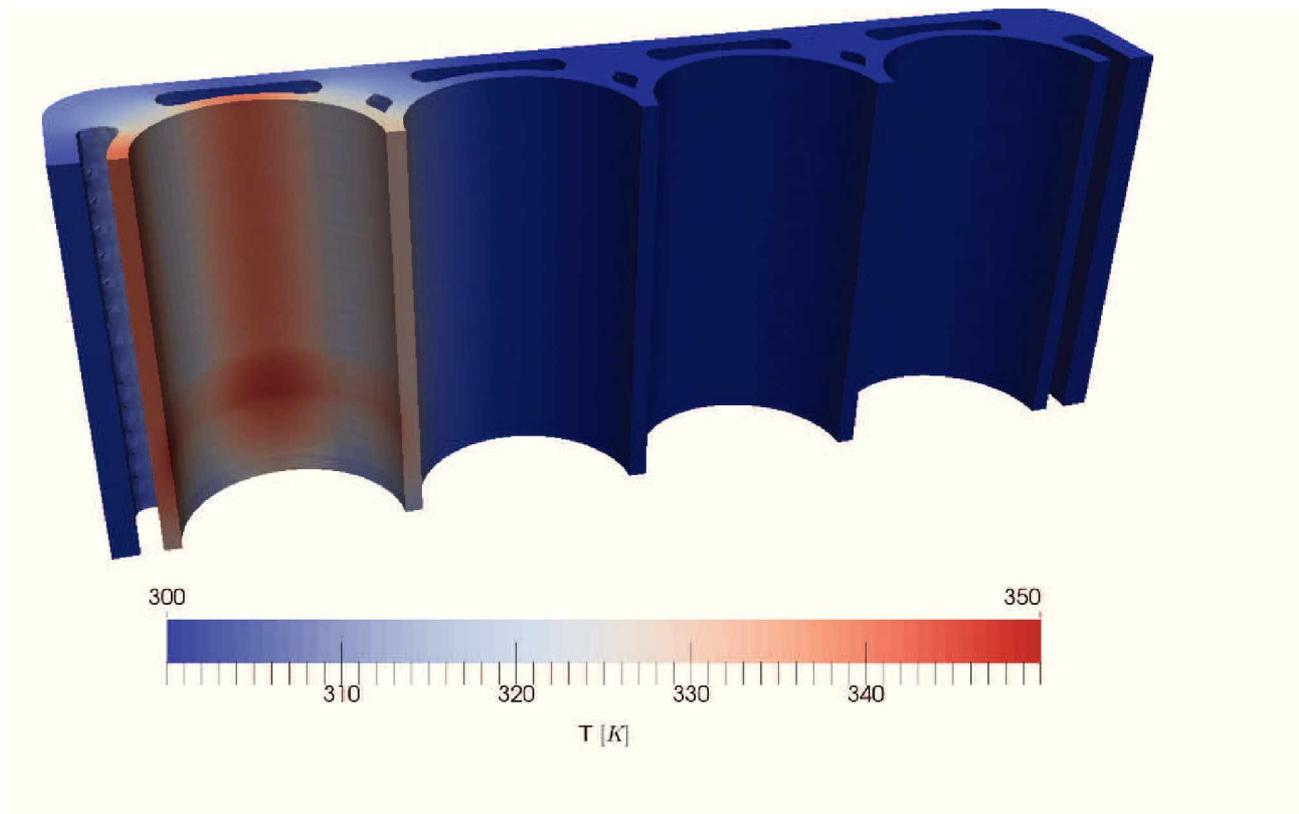


Abbildung 5-36: Temperaturverteilung nach 50 Sekunden.

In Abbildung 5-37 ist der Wärmestrom ersichtlich. Im Steg zum zweiten Zylinder ist ein weitere Wärmeleitung möglich und somit liegt die Temperatur an dieser Stelle niedriger als an der gegenüber liegenden Seite, was zu den tatsächlichen Messwerten ein konträres Bild zeigt. Mangels genauer Geometriedaten kann dies aber nicht adäquater abgebildet werden. In Abbildung 5-38 zeigt sich außerdem ein weiteres Problem der Simulation, der Wärmeübergang ist zeitlich sehr begrenzt, dies wird mit einer zu groben Auflösung des Primärmeshes begründet, sowie einer ungenügenden Abbildung der adhärenierenden Schicht. Dies ist jedoch den hohen Strömungsgeschwindigkeiten geschuldet, da mit steigender Auflösung des Meshes die zeitliche Schrittweite, durch die maximal zulässige Courantzahl, proportional sinkt und somit die Rechenzeit der Simulation deutlich verlängert.

Der Wärmeeintrag fällt somit in der Simulation geringer aus, folgt jedoch dem Trend der Messkurven.

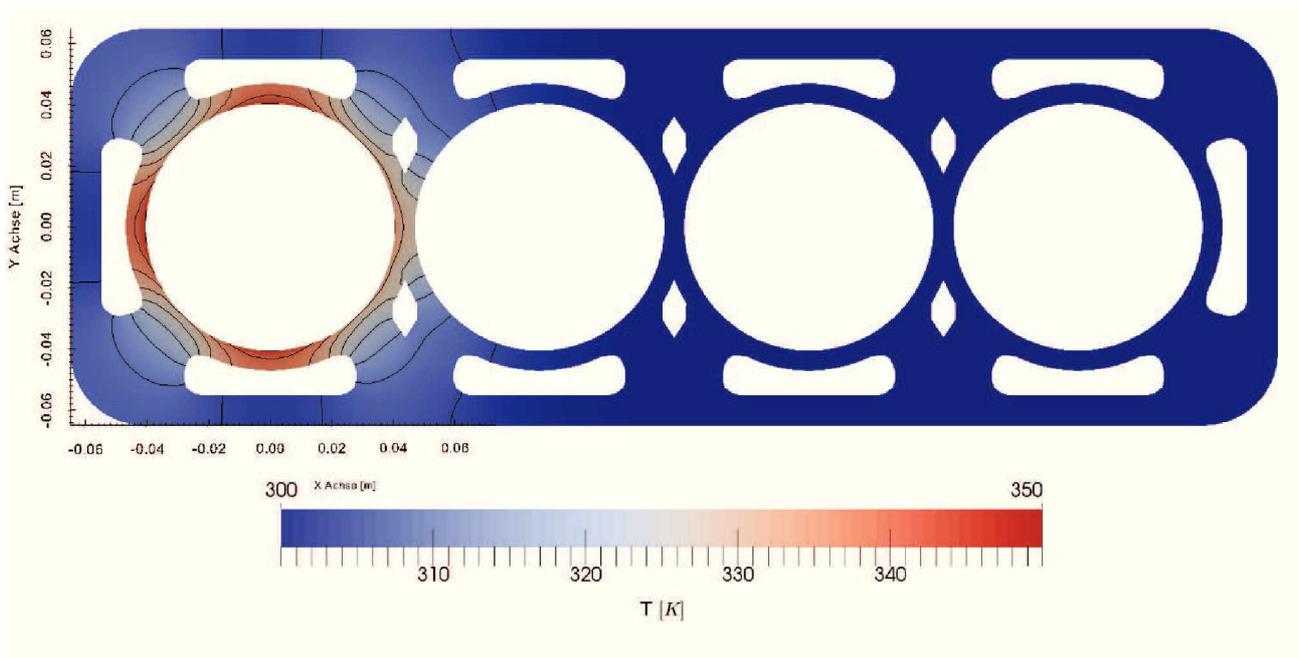


Abbildung 5- 37: Temperaturverteilung im Querschnitt nach 50 Sekunden.

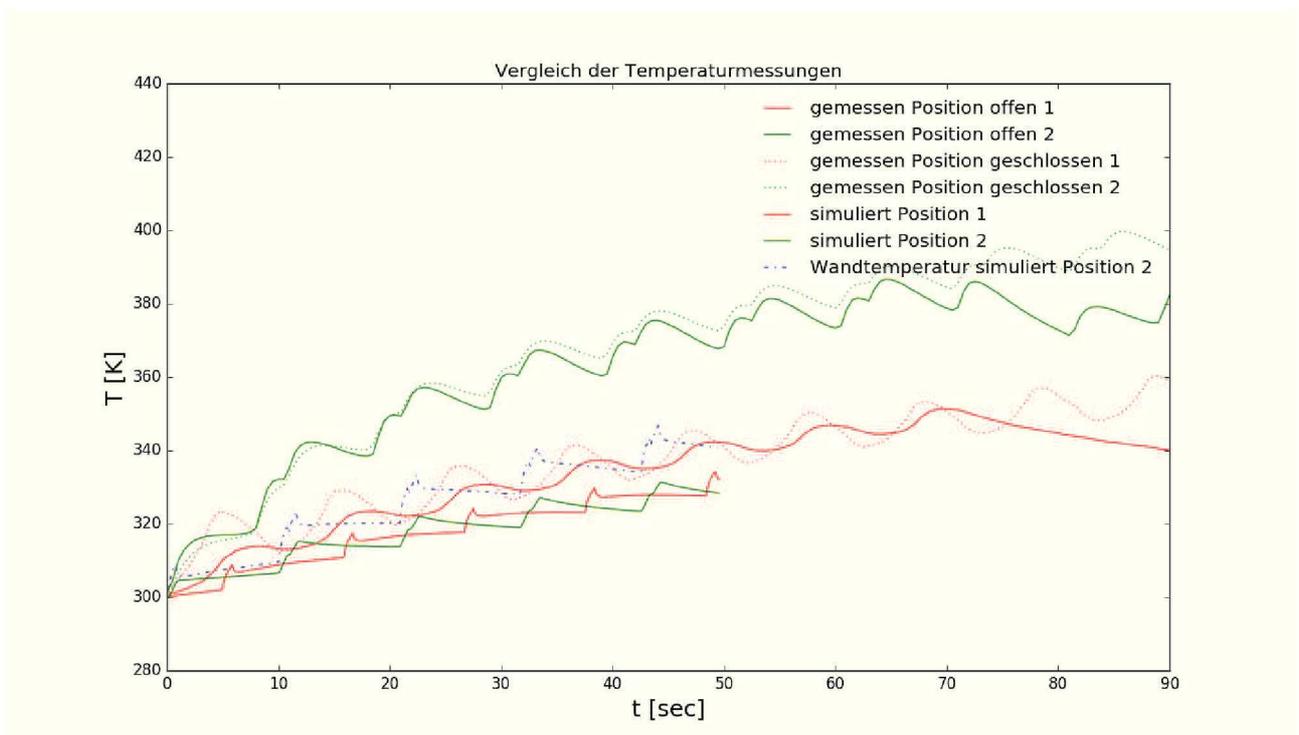


Abbildung 5- 38: Vergleich der Temperaturkurven.

6 Diskussion

6.1 Quantifizierung der Schicht

Die Auswertung der Versuchsergebnisse für den PTWA Prozess zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen einem offenen und geschlossenen Aufbau hinsichtlich der Qualität der Beschichtung. Der Einsatz dieser Technik für die geforderte Aufgabenstellung ist jedoch nicht möglich, da die gewünschte Beschichtungslänge aus konstruktiven Gründen nicht erreicht werden kann. Durch die Bauform des Sprühkopfes ist die maximale Annäherung an das Feuerdeck auf 20mm limitiert. Eine Entwicklung eines angestellten Sprühkopfes für den PTWA Prozess ist prinzipiell möglich, jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden, da der Draht in das Zentrum der zweiten Expansionsdüse geführt werden muss und somit bei einer Anstellung durch den Zerstäuberring geleitet werden müsste. Außerdem ist bei diesem Ansatz, wie in den APS Versuchen beobachtet werden konnte mit einem Auftreten von Sprühschatten zu rechnen. Die bei den APS Versuchen erreichte Beschichtungslänge ist für das Ziel ausreichend, jedoch mit einer minderen Qualität, hinsichtlich Haftzugfestigkeit und Homogenität, der Beschichtung verbunden. Um dieses Verhalten zu verbessern ist es notwendig die Geometrie des Aufrauungsprofils so anzupassen, dass eine Bildung von Sprühschatten unterbunden wird. Dies kann entweder durch das Ändern des Profils oder durch das Wechseln auf ein anderes Aufrauungsverfahren, welches keine Hinterschneidungen verursacht. Während dieser Arbeit wurden mehrere Werkzeuge für die systematische Erfassung und Auswertung von Beschichtungen entwickelt, diese ermöglichen es zukünftige Auswertungen weitestgehend zu automatisieren und somit den zeitlichen Aufwand für eine Analyse von Beschichtungsstärke, Rauigkeit, Porosität und der Materialverteilung deutlich zu reduzieren.

6.2 Simulation des Wärmeeintrages

Die Simulationsergebnisse zeigen eine prinzipielle Darstellbarkeit dieses Prozesses und erreichen in anbetracht der großen Anzahl an Annahmen gute Ergebnisse. Eine Verwendung der Standardmodelle für die thermodynamischen Daten zeigte sich als nicht zielführend, da bei konstanten Stoffwerten die Simulationsergebnisse zu hohe und unrealistische Werte zeigten und der polynomiale Ansatz, sowie der einfache Janaf-Ansatz zu negativen Wärmekapazitäten im Bereich der Düse führten und die Simulation nicht mehr lauffähig ist.

Auf eine chemische Simulation wurde aus Laufzeitgründen und dem zweifelhaften Mehrwert der Aufgabenstellung verzichtet, zudem musste die Auflösung des Meshes für eine akzeptable zeitliche Schrittweite reduziert werden. Eine genauere Betrachtung ist durch die Dominanz der tatsächlichen Geometrie des Gussbauteiles und der nicht verfügbaren Abmessungen nicht möglich.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Möglichkeit untersucht einseitig verschlossene Motorblöcke, Monoblöcke, mit dem PTWA Verfahren zu beschichten, sowie eine quantitative Erfassung und Beurteilung der Schichtqualität durchgeführt. Hierzu wurden zwei Versuche gefahren, wobei ein unverschlossener Motor als Referenzmotor diente und ein nachträglich Verschlossener, mit ansonst identem Aufbau, beschichtet und die Temperaturentwicklung während dieses Vorganges erfasst wurden. Um einen direkten Vergleich zu dem atmosphärischen Plasmaspritzen erhalten zu können, wurde zusätzlich ein Motorblock mit dem APS Verfahren beschichtet und untersucht. Für eine weitere Untersuchung der Einflüsse der Absaugung wurde der Prozess auch in OpenFoam abgebildet. Dies erfolgte mit Hilfe einer mehrstufigen Simulation und deren Resultate mit den Messergebnissen wurden für eine Plausibilitätsprüfung verglichen. Aufgrund des stark erweiterten Temperaturbereiches dieser Simulation, im Vergleich zu den üblichen Einsatzgebieten dieses Softwarepaketes, werden Teile des thermodynamischen Modells überarbeitet und um die Rechenzeit auf ein technisch sinnvolles Maß zu reduzieren, werden auch die Ergebnisse von Einzelsimulationen auf das Endergebnis übertragen.

Bei der Auswertung des Schichtaufbaues und der Schichtqualität beider Versuche zeigte sich kein signifikanter Unterschied bei dem PTWA Verfahren. Hier werden dichte Schichten mit einer Gesamtporosität 1.62% beziehungsweise von 1.49% erreicht. Der Einsatz des APS Verfahrens führte zu einer deutlich erhöhten Porosität von 7.61%. Bei der Haftzugfestigkeit überzeugt das PTWA Verfahren gegenüber dem APS Verfahren mit Werten von $31.4 - 34.6 \text{ MPa}$ zu $5.6 - 14.8 \text{ MPa}$. Die gewünschte Beschichtungslänge kann mit dem PTWA Verfahren nicht erreicht werden, zeigt sich dafür über die ganze beschichtete Länge als homogen. Bei der Probenvorbereitung zeigten die APS Proben weiters die Eigenschaft den Abrieb und das Poliermittel in die Poren aufzunehmen. Die rechnergestützte optische Auswertung der Schlibilder gestaltete sich nach der Reduktion der Fehler in der Bildpositionierung als schnell und zuverlässig.

Die Auswertung der Temperaturkurven zeigt eine maximale Erwärmung des Beschichtungsbereiches auf 160°C , nach dem Ausgleich der Temperaturverteilung im Gussteil, nach 430 sec sinkt die Temperatur auf unter 100°C . Die Simulation bildet die Erwärmung im unteren Bereich der Zylinderlauffläche sehr gut ab. Dabei zeigt sie sich als agiler als die tatsächlich gemessenen, da hier keine Wärmeübergänge zu den Thermoelmenten die Messergebnisse dämpfen. Durch die gute Korrelation zwischen der gemessenen Kurven und den Simulierten, lässt sich aus der Simulation ablesen, dass die maximale Oberflächentemperatur 15 K über der gemessenen Kerntemperatur liegt. Im oberen Bereich des Zylinders kommt es zu deutlich niedrigeren Temperaturen. Dies lässt sich aber auf die vereinfachte Geometrie der Simulation sowie etwaigen Undichtheiten im Übergang zur Absaugung zurück führen. Für

Cu-arme Legierungen bedeuten diese kurzen thermischen Belastungen keinen Einfluss auf die Entwicklung und Modifikation der Phasen, jedoch kann es bei *Cu* hältigen Legierungen zu einer Inkubation für das spätere Warmauslagern kommen.

Des Weiteren zeigt eine Auswertung der Strömung bei variierenden Parametern der Absaugung keinen maßgebenden Einfluss auf den Kernstrahl während dem Arbeitsschritt. Somit ist eine PTWA Beschichtung dieser Motorenform mit der derzeitig nutzbaren Technik nicht möglich. Jedoch deuten die Ergebnisse, bei einer angepassten Aktivierung der Zylinderlauffläche, den erfolgreichen Einsatz des APS Verfahrens bei diesem Problem an.

8 Literatur

- [1] S. Cha, A. Erdemir: Coating Technology for Vehicle Applications, Springer Verlag, 2015
- [2] Oerlikon Metco, Thermal Spray Brochure 6, 2016
- [3] J. R. Davis, Handbook of Thermal Spray Technology, 2004, Materials Park, OH, USA, ASM International.
- [4] M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, K. I. Li, B. Dussoubs and N. J. Themelis: J. Therm. Spray Technol., 2001, 10, (2), 267–284.
- [5] T. Liu, J. Arnold: Study of in-flight particle stream and particle behavior for understanding the instability phenomenon in plasma spraying process, Institute of Engineering Thermodynamics, German Aerospace Center, 2015
- [6] K. Bobzin, F. Ernst, J. Zwick, T. Schlaefer, D. Cook, K. Nassenstein, A. Schwenk, F. Schreiber, T. Wenz, G. Flores, and M. Hahn : Coating Bores of Light Metal Engine Blocks with a Nanocomposite Material using the Plasma Transferred Wire Arc Thermal Spray Process, Journal of Thermal Spray Technology, Vol 17, 2009
- [7] Patent DE102013226690 A1
- [8] G. Barbezat: Importance of Surface Preparation Technology Prior to Coating Deposition on Cylinder Bores for High Performance Engines, Thermal Spray, ASM, 2007
- [9] E. Lugscheider, R. Dicks, K. Kowalsky, D. Cook: A materials system and method of its application for the wear protection of aluminium engine cylinder bore surfaces ,Thermal Spray 2006: Science, Innovation, and Application, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2006
- [10] P. Ernst, B. Distler: Optimizing the Cylinder Running Surface / Piston System of Internal Combustion Engines Towards Lower Emissions, SAE International, 2012
- [11] A. Harris, A. Beevers: The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion, Adhesion Adhesives, 1998
- [12] T. Taylor: Surface roughening of metallic substrates by high pressure pure waterjet, Surface Coatings and Technology, 1995
- [13] G. Flores: Prozesskette zur Herstellung thermisch beschichteter Zylinderbohrungen, Thermal Spray Bulletin, 1/2011

-
- [14] E. Lugscheider, R. Dicks, K. Wowalsky, D. Cook, K. Nassenstein, C. Verpoort: A materials system and method of its application for the wear protection of aluminium engine cylinder bore surfaces, *Thermal Spray Technology*, 2004
- [15] C. Coddet, G. Montavon, S. Ayrault-Costil, O. Freneaux, F. Rigolet, G. Barbezat, F. Folio, A. Diard, und P. Wazen: Surface Preparation and Thermal Spray in a Single Step: The PROTAL Process— Example of Application for an Aluminum-Base Substrate, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol 8/2, 1999
- [16] S. Gordon, B. McBride: Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, NASA Reference Publication 1311, 1994
- [17] R. Tucker: Introduction to Coating Design and Processing ASM Handbook, Volume 5A, *Thermal Spray Technology*, 2013
- [18] Proceq, Produktbeschreibung Dy-2 Pull Off Tester, 2017
- [19] *Thermal Spray Technology 3*, ASM Handbook, ASM International, 2003, 62-72
- [20] M. Magnani, P. Suegama, C. Fugivura, V. Benedetti: WC-CoCr coatings sprayed by high velocity oxygen-fuel (HVOF) flame on AA7050 aluminum alloy: electrochemical behavior in 3.5% NaCl solution, *Mat. Res. vol.10 no.4 São Carlos*, Oct./Dec. 2007
- [21] S. Suzuki, and K. Abe: Topological structural analysis of digitized binary images by border following *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 30, 1985
- [22] R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy: Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik, *Mathematische Annalen*, Bd 100, 1928
- [23] A. Moraes, P. Lage, G. Cunha, L. da Silva: Analysis of the non-orthogonality correction of finite volume discretization on unstructured meshes, *COBEM, ABCM*, 2013
- [24] CFD Direct, *OpenFoam User Guide v5*, 2017
- [25] J. Rhoads: Effects of grid quality on solution accuracy, *POINTWISE, OpenFOAM Workshop 2014*
- [26] Oerlikon Metco, Produktdatenblatt RotaPlasma HS1
- [27] H. Hoffmeister, C. Schnell: Mechanical roughing of cylinder bores in light metal crank-cases, *German Academic Society for Production Engineering*, 2008
- [28] Andrew Siao Ming Ang Christopher C. Berndt (2014) A review of testing methods for thermal spray coatings, *International Materials Reviews*, 59:4, 179-223

- [29] B. Bertsche: Oberflächenbeurteilung, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart
- [30] I. Gulyaev, A. Dolmatov, M. Kharlamov: Arc-Plasma Wire Spraying, ASM International , Oktober 2015
- [31] D. Bohm, E.P. Gross, Phys. Rev. 75, 1864
- [32] Benson, Tom. Isentropic Flow. NASA.gov. National Aeronautics and Space Administration. 21 June 2014. Accessed 15 July 2014.
- [33] J. Pezda, The effect of the T6 heat treatment on hardness and microstructure of the EN AC- AlSi12CuNiMg alloy, Faculty of Chipless Forming Technology, University of Bielsko-Biala, 2013
- [34] J. Pezda, Heat treatment of AlSi9Mg alloy, Faculty of Chipless Forming Technology, University of Bielsko-Biala, 2007
- [35] F. Feikus: Optimierung von Aluminium-Silicium-Gusslegierungen für Zylinderköpfe, Gießerei-Praxis Nr. 2/1999
- [36] <http://www.salome-platform.org>, zuletzt aufgerufen am 12. Januar 2018
- [37] <https://www.paraview.org>, zuletzt aufgerufen am 12. Januar 2018
- [38] <https://www.openfoam.com>, zuletzt aufgerufen am 12. Januar 2018

9 Anhang

9.1 sampleDict Düsensimulation

```
1 /*----- C++ -----*/
2 |=====|
3 | \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
4 | \\ / O p e r a t i o n | Version: 1.7.1 |
5 | \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.com |
6 | \\ / M a n i p u l a t i o n | |
7 /*-----*/
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         dictionary;
13     location      "system";
14     object        sampleDict;
15 }
16 // ***** //
17 setFormat      raw;
18 surfaceFormat raw;
19
20 interpolationScheme cell;
21 fields
22 (
23     T
24     p
25     U
26     rho
27     k
28     epsilon
29 );
30
31 sets
32 (
33     y1line
34     {
35         type      face;
36         axis      distance;
37         start     (0.0156 0.0 0.000);
38         end       (0.0156 0.021 0.000);
39     }
40     y2line
41     {
42         type      face;
43         axis      distance;
44         start     (0.016 0.0 0.000);
45         end       (0.016 0.021 0.000);
46     }
47     y3line
48     {
49         type      face;
50         axis      distance;
51         start     (0.0165 0.0 0.000);
52         end       (0.0165 0.021 0.000);
53     }
54 )
```

```
53 }
54 y4line
55 {
56     type      face;
57     axis      distance;
58     start     (0.017 0.0 0.000);
59     end       (0.017 0.021 0.000);
60 }
61 y5line
62 {
63     type      face;
64     axis      distance;
65     start     (0.0175 0.0 0.000);
66     end       (0.0175 0.021 0.000);
67 }
68 y6line
69 {
70     type      face;
71     axis      distance;
72     start     (0.018 0.0 0.000);
73     end       (0.018 0.021 0.000);
74 }
75 y7line
76 {
77     type      face;
78     axis      distance;
79     start     (0.0185 0.0 0.000);
80     end       (0.0185 0.021 0.000);
81 }
82 y8line
83 {
84     type      face;
85     axis      distance;
86     start     (0.019 0.0 0.000);
87     end       (0.019 0.021 0.000);
88 }
89 y9line
90 {
91     type      face;
92     axis      distance;
93     start     (0.0195 0.0 0.000);
94     end       (0.0195 0.021 0.000);
95 }
96 y10line
97 {
98     type      face;
99     axis      distance;
100    start     (0.020 0.0 0.000);
101    end       (0.020 0.021 0.000);
102 }
103 y11line
104 {
105     type      face;
106     axis      distance;
107     start     (0.0205 0.0 0.000);
108     end       (0.0205 0.021 0.000);
109 }
110 );
```

9.2 Interpolationsklasse

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 from os.path import expanduser
3 from math import pi, sin, cos, tan, asin, acos, atan
4 import numpy.polynomial.polynomial as poly
5 import numpy as np
6
7 home = expanduser("~/")
8
9 class InterpolateField:
10     def __init__(self, fieldName):
11         self.xRef=[0.0156,0.016,0.0165,0.017,0.0175,0.018,0.0185,0.019,0.0195,0.020,0.0205]
12         self.changeField(fieldName)
13         self.scale=1.0 #for testing only
14         self.outOfBounds=0.0
15         self.filter=False
16         self.VectorFilter=True
17
18     def setLinePath(self, linePath):
19         self.linePath=linePath
20
21     def changeField(self, field):
22         set1=["T", "p", "rho", "k", "epsilon"]
23         set2=["Ux", "Uy", "Uz"]
24         self.field=field
25         if self.field in set1:
26             self.filename="line_T_p_rho_k_epsilon.xy"
27             self.Type="ScalarField"
28             self.fieldRow=set1.index(self.field)
29         elif self.field in set2:
30             self.filename="line_U.xy"
31             self.Type="VectorField"
32             self.fieldRow=set2.index(self.field)
33         else:
34             print("Sorry, unknown field: "+ self.field+" , Quitting now");exit(0)
35
36     def loadLine(self, line):
37         document=open("%s/%s/%s" % (self.linePath, str(line), self.filename), "r")
38         temp = document.read();document.close()
39         y=[];val=[]
40         temp=temp.replace("\t", "").split("\n")
41         for entry in temp:
42             if len(entry)>5:
43                 array=entry.split(" ")
44                 y.append(float(array[0]))
45                 val.append(float(array[self.fieldRow+1]))
46         return y, val
47
48     def mapCoeffs(self, grade):
49         self.coeffs=[];v=[];upperLim=[];lowerLim=[]
50         self.grade=grade
51         for i in range(1, len(self.xRef)+1):
52             y, val=self.loadLine(i)
53             upperLim.append(max(val))
54             lowerLim.append(min(val))
55             temp=poly.polyfit(y, val, grade)
56             self.coeffs.append(temp)

```

```
57     self.min=min(lowerLim)
58     self.max=max(upperLim)
59     return self.coeffs
60
61     def getValue(self ,x,y,z):
62         self.xm=self.xRef
63         rs=(x**2+y**2+(z-self.z_center)**2)**0.5 #cross 2 vectors and get the angle
64         theta=acos((x*cos(phi)+y*sin(phi))/rs)
65         xD=rs*cos(theta)
66         r=rs*sin(theta)
67         i=0
68         while self.xRef[i]<=xD: #to select the correct interpolation functions
69             i+=1
70         val= self.between(coeffs[i-1],coeffs[i],self.xm[i-1],self.xm[i],xD,r)
71         return val
72
73     def between(self ,coeffs0 ,coeffs1 ,x0,x1,x,r): #simple linear interpolation
74         U1=poly.polyval(r, coeffs0)
75         U2=poly.polyval(r, coeffs1)
76         yn = U1+(x-x0)*(U2-U1)/(x1-x0)
77         return yn
```

9.3 Mappingklasse Multicore

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import numpy as np
5 from scipy.interpolate import interp2d, RectBivariateSpline, griddata
6 from math import pi, sin, cos
7 from scipy import signal
8 from datetime import datetime
9 import os
10 import multiprocessing as mp
11 import time
12
13 class Interpolate(object):
14     def __init__(self, tPos):
15         path="/home/loki/diplomarbeit/simulationen/lastModell/subCases/primary/postProcessing/
16         surfaces/0/primary_rot_cylinder/"#
17         filename="points"
18         self.boundaryPath="constant/boundaryData/primary_rot_cylinder"
19
20         tStart=0.0
21         rpm=500
22         pitch=0.01
23         cycles=5
24         self.t0=float(tStart)
25         self.path=path
26         self.filename=filename
27         self.phi0=pi/4.0 #offset in radiant, "mathematical correct"
28         self.pitch=float(pitch) #m/turn
29         self.rpm=float(rpm) #rounds per minute, usual 500
30         self.cycles=float(cycles) #down/up cycles
31         self.res = 3*(2*pi/360.0) #3 degree per mapping cycle
32         self.omega = 2*pi*self.rpm/60.0 #angular velocity
33         self.dt = self.res/self.omega #timestep per interpolation
34         self.debug = False #print detailed messages, draw graphs etc
35         self.rs=0.02 #diameter interpolated section from nozzle
36         self.linePath="createVectors/0.00055383159/"
37         self.xRef=[0.0156,0.016,0.0165,0.017,0.0175,0.018,0.0185,0.019,0.0195,0.020,0.0205]
38         self.readPoints()
39         self.z0 = 0.0 #start height spraying, in the mesh it is 0/0/0
40         self.zmin = self.zp.min()
41         self.zmax = self.z0
42         self.xc=0.0 #define center of rotation axis
43         self.yc=0.0
44         self.createTimeArray()
45         self.loadSet()
46         self.interpolate(tPos)
47
48     def loadSet(self):
49         self.loadVektorLine()
50         self.loadSkalarLine()
51         self.scalarFields=["T","p","k","epsilon"]
52         self.funcArray=[self.T, self.p, self.k, self.epsilon]
53
54     def createTimeArray(self):
55         turns = 2*((self.zmax-self.zmin)/self.pitch)*self.cycles
56         time = turns*2*pi/self.omega

```

```

56     cycleTime = time/self.cycles
57
58     self.t = np.linspace(0,time,time/self.dt)
59     self.z = -((signal.sawtooth(2*self.t,width=0.5))*abs(self.zmax-self.zmin)/2.0-abs(self.zmax
-self.zmin)/2.0
60     self.phi = self.t*self.omega
61
62     self.t=self.t+self.t0           #add offset to time, needed for multiple bores
63
64     if self.debug:
65         xs = np.cos(self.phi)*0.4
66         ys = np.sin(self.phi)*0.4
67         zs = self.z
68
69         fig = plt.figure()
70         ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
71         ax.plot(xs,ys,zs)
72         plt.show()
73
74     def pltZ(self):                 #show head position over time
75         fig = plt.figure()
76         plt.plot(self.t,self.z)
77         plt.ylabel("z [m]")
78         plt.xlabel("t [sec]")
79         plt.title("Z over t")
80         plt.show()
81
82     def readPoints(self):           #imports the point cloud from the patch
83         temp = open(self.path+self.filename,"r").read()
84         temp=temp.split("\n")
85
86         i=0
87
88         while i<3:
89             temp.pop(0)             #remove header lines
90             i+=1
91         temp.pop(len(temp)-1)      #remove empty line at the bottom
92
93         x=[];y=[];z=[]
94         for line in temp:
95             line=line.replace(",","").replace(")","")
96             line=line.split(" ")
97             try:
98                 x.append(float(line[0]))
99                 y.append(float(line[1]))
100                z.append(float(line[2]))
101             except:
102                 pass #just found an empty line, pass on, nothing to see here....
103
104         self.xp=np.asarray(x)
105         self.yp=np.asarray(y)
106         self.zp=np.asarray(z)
107         self.nodes=np.asarray([x,y,z]).T #easier for iterating
108
109     def loadSkalarLine(self):       #imports scalar fields
110         y=[];T=[];T2=[];p=[];rho=[];k=[];epsilon=[];x=[]
111         fileArray=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11]
112         i=0
113         for element in fileArray:

```

```

114     try:
115         filename=self.linePath+"y%sline_T_p_rho_k_epsilon.xy"%(str(element))
116         temp = open(filename, "r").read().replace("\t", "")
117         for n in range(5):
118             temp = temp.replace(" ", " ")
119
120         temp=temp.split("\n")
121         for line in temp:
122             if len(line) > 3: #skip empty lines
123                 line = line.split(" ")
124                 x.append(self.xRef[i])
125                 y.append(float(line[0]))
126                 T.append(float(line[1]))
127                 p.append(float(line[2]))
128                 rho.append(float(line[3]))
129                 k.append(float(line[4]))
130                 epsilon.append(float(line[5]))
131     except Exception, e:
132         print(str(e))
133     i+=1
134
135     self.xI=x
136     self.yI=y
137     self.TI=np.asarray(T)
138     self.kI=np.asarray(k)
139     self.epsilonI=np.asarray(epsilon)
140     self.pI=np.asarray(p)
141     self.rhoI=np.asarray(rho)
142     self.net = np.asarray([self.xI, self.yI]).T
143
144     def loadVektorLine(self): #import vector fields
145         x=[];y=[];Ux=[];Uy=[];Uz=[]
146         fileArray=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11]
147         i=0
148         for element in fileArray:
149             filename=self.linePath+"y%sline_U.xy"%(str(element))
150             temp = open(filename, "r").read().replace("\t", "")
151             for n in range(6):
152                 temp = temp.replace(" ", " ")
153
154             temp=temp.split("\n")
155             for line in temp:
156                 if len(line)>3:
157                     line = line.split(" ")
158                     x.append(self.xRef[i])
159                     y.append(float(line[0]))
160                     Ux.append(float(line[1]))
161                     Uy.append(float(line[2]))
162                     Uz.append(float(line[3]))
163
164             i+=1
165         self.xII = x
166         self.yII = y
167         self.net2= np.asarray([x,y]).T #additional net for more freedom for interpolation base
168         self.UxI = np.asarray(Ux)
169         self.UyI = np.asarray(Uy)
170         self.UzI = np.asarray(Uz)
171
172         #interpolation functions, not the fastest way, but rock solid
173         def T(self, x, y):

```

```

173     return griddata(self.net, self.TI, (x,y))
174 def p(self,x,y):
175     return griddata(self.net, self.pI, (x,y))
176 def rho(self,x,y):
177     return griddata(self.net, self.rhoI, (x,y))
178 def k(self,x,y):
179     return griddata(self.net, self.kI, (x,y))
180 def epsilon(self,x,y):
181     return griddata(self.net, self.epsilonI, (x,y))
182 def Ux(self,x,y):
183     return griddata(self.net2, self.UxI, (x,y))
184 def Uy(self,x,y):
185     return griddata(self.net2, self.UyI, (x,y))
186 def Uz(self,x,y):
187     return griddata(self.net2, self.UzI, (x,y))
188 def getZ(self,t):
189     pass
190
191 def interpolate(self,aPos):
192     interFuncs=self.funcArray
193     funcNames = self.scalarFields
194
195     t = self.t[aPos]
196     z = self.z[aPos]
197     phi = self.phi[aPos]
198
199     a = np.asarray([cos(phi),sin(phi),0])           #orientation vector
200     C = np.asarray([self.xc,self.yc,z])           #base point
201
202     interpolArray=[]
203
204     n = 0
205     toIntArray=[]
206     notIntArray=[]
207
208     gamma = 3*pi/2.00                             #angle for tangent
209     rotMatrix = np.array([[cos(gamma),sin(gamma),0],[-sin(gamma),cos(gamma),0],[0,0,1]]) #
rotation matrix around z
210
211     tempResults =[]
212     tempU=[]
213
214     for i in range(self.nodes.shape[0]):
215         affected = False
216         P = self.nodes[i]
217         xp,yp,zp = P
218         d = a[0]*xp+a[1]*yp+a[2]*zp
219         F = C+d*a
220         PF = P-F
221         zeta = np.linalg.norm(PF)
222         chi = np.linalg.norm(F-C)
223
224         if zp >= (z-self.rs) and zp <= (z+self.rs) : #ok, the height is in range
225             if d > self.rs:                             #alternative chi, but has problems with
direction
226                 if zeta < self.rs:
227                     affected=True
228
229         e1 = (PF)/np.linalg.norm(PF)

```

```

230     k = P-C
231     e2 = k/(np.linalg.norm(k))
232
233     if affected:
234         teAcc=[]
235         for interFunc in interFuncs:           #calculate Scalars
236             teAcc.append(interFunc(chi , zeta))
237         tempResults.append(teAcc)
238
239         Uzeta = self.Uy(chi , zeta)*e1         #calculate vector
240         Uchi  = self.Ux(chi , zeta)*a
241
242         U = Uzeta + Uchi
243         tempU.append(U)
244
245     else:
246         tempResults.append([300.0,1E5,0.03,1.4])
247         rDir=P*np.asarray([1,1,0])-C*np.asarray([1,1,0])
248         rVer=np.linalg.norm(rDir)
249         e2 = rDir/rVer
250         U = rotMatrix.dot(e2)*rVer*self.omega
251
252         tempU.append(U)
253
254     self.writeDataSet(aPos, tempResults,tempU ,funcNames)
255
256 def writeDataSet(self ,t , scalarResults , vectorResults , scalarNames):
257     scalarHeader = open("scalarTemplate.txt","r").read()
258     target=self.boundaryPath+"/"+"{:10.6f}".format(round(self.t[t],7))
259     if not os.path.exists(target):
260         os.makedirs(target)
261
262     for field in range(len(scalarNames)):
263         out=scalarHeader
264         out=out.replace("$$counts$$",str(self.nodes.shape[0]))
265         name = "{:10.6f}".format(round(self.t[t],7))
266         out=out.replace("$$time$$",name.replace(" ",""))
267         out=out.replace("$$type$$",scalarNames[field])
268         temp=""
269         for i in range(self.nodes.shape[0]):
270             temp+=str(scalarResults[i][field])+"\n"
271         temp+=")"
272         out=out.replace("$$entries$$",temp)
273         outFile=open(target+"/"+scalarNames[field],"w")
274         outFile.write(out)
275         outFile.close()
276
277     vectorHeader = open("vectorTemplate.txt","r").read()
278     out=vectorHeader
279     out=out.replace("$$counts$$",str(self.nodes.shape[0]))
280     name = "{:10.6f}".format(round(self.t[t],7))
281     out=out.replace("$$time$$",name.replace(" ",""))
282     temp=""
283     for i in range(self.nodes.shape[0]):
284         temp+=(" "+str(vectorResults[i][0]) + " "+str(vectorResults[i][1]) + " "+ str(
vectorResults[i][2]) + ")")+"\n"
285     temp+=")"
286     out=out.replace("$$entries$$",temp)
287     outFile=open(target+"/U","w")

```

```
288     outFile.write(out)
289     outFile.close()
290
291 if __name__=="__main__":
292     A=Interpolate(0)
293     A.loadSet()
294
295     pool = mp.Pool(4)
296     pool.map(Interpolate, range(A.t.shape[0]))
297     pool.close()
298     pool.join()
299
300     print("Done")
```

9.4 Randbedingungen Hauptsimulation

9.4.1 Primärmesh

9.4.1.1 Geschwindigkeitsfeld U

```

1  /*-----* C++ -*-----*/
2  | ===== |
3  | \\      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
4  | \\      / O p e r a t i o n | Version: 3.0.1 |
5  | \\      / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
6  | \\      / M a n i p u l a t i o n | |
7  /*-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         volVectorField;
13     location      "0/primary";
14     object        U;
15 }
16 // ***** //
17
18 dimensions      [ 0 1 -1 0 0 0 0 ];
19
20 internalField    uniform ( -2.0 0 0 );
21
22 boundaryField
23 {
24     primary_adb_bottom
25     {
26         type      fixedValue;
27         value      uniform ( 0 0 0 );
28     }
29     primary_adb_top
30     {
31         type      fixedValue;
32         value      uniform ( 0 0 0 );
33     }
34     primary_adb_topInner
35     {
36         type      fixedValue;
37         value      uniform ( 0 0 0 );
38     }
39     primary_adb_topOuter
40     {
41         type      fixedValue;
42         value      uniform ( 0 0 0 );
43     }
44     primary_atm_seal
45     {
46         //type      inletOutlet;
47         type      fixedValue;
48         value      uniform ( 0.0 0 0 );
49         //inletValue    uniform ( 0 0 0 );
50     }
51     primary_atm_topOuter

```

```

52 {
53     type          zeroGradient;//inletOutlet;
54     value         uniform ( 0.0 0 0 );
55     inletValue    uniform ( 0 0 0 );
56 }
57 primary_out_bottom
58 {
59     type          fixedValue;//pressureInletOutletVelocity;//inletOutlet;
60     value         uniform ( 0.0 0 -1.0 );
61     inletValue    uniform ( 0 0 0 );
62 }
63 primary_out_top
64 {
65     type          fixedValue;//pressureInletOutletVelocity;
66     value         uniform ( -5.0 0 0 );
67     inletValue    uniform ( 0 0 0 );
68 }
69 primary_rot_bottom
70 {
71     type          fixedValue;
72     value         uniform ( 0 0 0 );
73 }
74 primary_rot_cylinder
75 {
76     type          timeVaryingMappedFixedValue;
77     setAverage    0;
78     perturb       0;
79     mapMethod     nearest;
80     offset        (0 0 0);
81     value         uniform (0 0 0);
82 }
83 primary_to_cylinder
84 {
85     type          fixedValue;
86     value         uniform ( 0 0 0 );
87 }
88 primary_to_plastic
89 {
90     type          fixedValue;
91     value         uniform ( 0 0 0 );
92 }
93 }
94
95
96 // ***** //

```

9.4.1.2 Temperaturfeld T

```

1 /*-----* C++ -----*/
2 |=====|
3 | \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
4 | \ \ / O p e r a t i o n | Version: 3.0.1 |
5 | \ \ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
6 | \ \ / M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;

```



```

70     type          fixedValue;
71     value         uniform 300;
72 }
73 primary_rot_cylinder
74 {
75     type          timeVaryingMappedFixedValue;
76     setAverage    0;
77     perturb       0;
78     mapMethod     nearest;
79     offset        0;
80     value         uniform 300;
81 }
82 primary_to_cylinder
83 {
84     type          compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
85     value         uniform 300;
86     Tnbr          T;
87     kappa         fluidThermo;
88     kappaName     none;
89     kappaMethod   fluidThermo;
90 }
91 primary_to_plastic
92 {
93     type          compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
94     value         uniform 300;
95     Tnbr          T;
96     kappa         fluidThermo;
97     kappaName     none;
98     kappaMethod   fluidThermo;
99 }
100 }
101
102
103 // ***** //

```

9.4.1.3 Druckfeld p

```

1 /*-----* C++ -*-----*\
2 | ===== | |
3 | \\      / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
4 | \\      / O peration | Version: 3.0.1 |
5 | \\      / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
6 | \\      / M anipulation | |
7 /*-----* */
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        volScalarField;
13     location     "0/primary";
14     object       p;
15 }
16 // ***** //
17
18 dimensions      [ 1 -1 -2 0 0 0 0 ];
19
20 internalField   uniform 100000;
21

```

```

22 boundaryField
23 {
24     "*"
25     {
26         type            zeroGradient;
27         value            uniform 100000;
28     }
29
30
31     primary_atm_topOuter
32     {
33         type            fixedValue;
34         value            uniform 100000;
35         p0                uniform 1e5;
36     }
37     primary_atm_seal
38     {
39         type            zeroGradient;
40         value            uniform 100000;
41     }
42     primary_out_top
43     {
44         type            zeroGradient;
45         value            uniform 100000;
46     }
47     primary_out_bottom
48     {
49         type            zeroGradient;
50         value            uniform 100000;
51     }
52 }
53 }
54
55
56 // ***** //

```

9.4.1.4 Turbelente kinetische Energie k

```

1 /*-----* C++ -*-----*\
2 | ===== | |
3 | \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
4 | \\ / O p e r a t i o n | Version: 3.0.1 |
5 | \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
6 | \\ M a n i p u l a t i o n | |
7 /*-----*//
8 FoamFile
9 {
10     version    2.0;
11     format      ascii;
12     class       volScalarField;
13     location    "0/primary";
14     object      k;
15 }
16 // ***** //
17
18 dimensions    [ 0 2 -2 0 0 0 0 ];
19
20 internalField  uniform 0.1;

```

```
21
22 boundaryField
23 {
24     primary_adb_bottom
25     {
26         type            kqRWallFunction;
27         value            uniform 0.1;
28     }
29     primary_adb_top
30     {
31         type            kqRWallFunction;
32         value            uniform 0.1;
33     }
34     primary_adb_topInner
35     {
36         type            kqRWallFunction;
37         value            uniform 0.1;
38     }
39     primary_adb_topOuter
40     {
41         type            kqRWallFunction;
42         value            uniform 0.1;
43     }
44     primary_atm_seal
45     {
46         type            inletOutlet;
47         value            uniform 0.1;
48         inletValue      uniform 0.1;
49     }
50     primary_atm_topOuter
51     {
52         type            inletOutlet;
53         value            uniform 0.1;
54         inletValue      uniform 0.1;
55     }
56     primary_out_bottom
57     {
58         type            inletOutlet;
59         value            uniform 0.1;
60         inletValue      uniform 0.1;
61     }
62     primary_out_top
63     {
64         type            inletOutlet;
65         value            uniform 0.1;
66         inletValue      uniform 0.1;
67     }
68     primary_rot_bottom
69     {
70         type            fixedValue;
71         value            uniform 0.1;
72     }
73     primary_rot_cylinder
74     {
75         type            timeVaryingMappedFixedValue;
76         setAverage      0;
77         perturb         0;
78         mapMethod       nearest;
79         offset          0;
```

```

80     value            uniform 0.1;
81   }
82   primary_to_cylinder
83   {
84     type            kqRWallFunction;
85     value            uniform 0.1;
86   }
87   primary_to_plastic
88   {
89     type            kqRWallFunction;
90     value            uniform 0.1;
91   }
92 }
93
94
95 // ***** //

```

9.4.1.5 Turbulente Dissipationsrate ϵ

```

1 /*----- C++ -----*\
2 |=====|
3 | \\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
4 | \\ / Operation | Version: 3.0.1 |
5 | \\ / And | Web: www.OpenFOAM.org |
6 | \\ / Manipulation |
7 /*-----*\
8 FoamFile
9 {
10  version      2.0;
11  format       ascii;
12  class        volScalarField;
13  location     "0/primary";
14  object       epsilon;
15 }
16 // ***** //
17
18 dimensions   [ 0 2 -3 0 0 0 0 ];
19
20 internalField uniform 0.01;
21
22 boundaryField
23 {
24   primary_adb_bottom
25   {
26     type            epsilonWallFunction;
27     value            uniform 0.01;
28   }
29   primary_adb_top
30   {
31     type            epsilonWallFunction;
32     value            uniform 0.01;
33   }
34   primary_adb_topInner
35   {
36     type            epsilonWallFunction;
37     value            uniform 0.01;
38   }
39   primary_adb_topOuter

```

```
40 {
41     type          epsilonWallFunction;
42     value         uniform 0.01;
43 }
44 primary_atm_seal
45 {
46     type          inletOutlet;
47     value         uniform 0.01;
48     inletValue    uniform 0.01;
49 }
50 primary_atm_topOuter
51 {
52     type          inletOutlet;
53     value         uniform 0.01;
54     inletValue    uniform 0.01;
55 }
56 primary_out_bottom
57 {
58     type          inletOutlet;
59     value         uniform 0.01;
60     inletValue    uniform 0.01;
61 }
62 primary_out_top
63 {
64     type          inletOutlet;
65     value         uniform 0.01;
66     inletValue    uniform 0.01;
67 }
68 primary_rot_bottom
69 {
70     type          fixedValue;
71     value         uniform 0.01;
72 }
73 primary_rot_cylinder
74 {
75     type          timeVaryingMappedFixedValue;
76     setAverage    0;
77     perturb       0;
78     mapMethod     nearest;
79     offset        0;
80     value         uniform 0.1;
81 }
82 primary_to_cylinder
83 {
84     type          epsilonWallFunction;
85     value         uniform 0.01;
86 }
87 primary_to_plastic
88 {
89     type          epsilonWallFunction;
90     value         uniform 0.01;
91 }
92 }
93
94
95 // ***** //
```

9.5 Abbildungsverzeichnis

2-1	Prinzipschaubild APS [2].	4
2-2	Übersicht der Verfahren zur Pulverherstellung[28].	5
2-3	Komponenten F210 Brenner[26].	6
2-4	Prinzipschaubild PTWA [6].	7
2-5	Geometrie PTWA Düse[7].	8
2-6	Durch Sandstrahlen aktivierte Oberfläche[10].	10
2-7	Abhängigkeit Haftzugfestigkeit und Oberflächenrauigkeit[10].	10
2-8	Durch Hochdruckwasserstrahlen aktivierte Oberfläche[10].	11
2-9	Mechanisch aktivierte Oberfläche[10].	12
2-10	Oberfläche einer mit einem Laser gereinigten Oberfläche[14].	13
2-11	Einfluss Laserintensität auf die Oberfläche[15].	14
2-12	REM Aufnahme einer mit einem Laser aufgerauten Oberfläche[14].	14
2-13	Beispiele für Ungängen[17].	15
2-14	REM Aufnahme einer Delamination einer <i>WC-CoCr</i> Beschichtung auf einer 7050-Legierung[20].	16
2-15	Ablaufschema Bildanalyse.	18
2-16	Ablauf Haftfestigkeitsprüfung	21
2-17	Brucharten der Beschichtung während der Prüfung[18].	21
2-18	Bildung des arithmetischen Mittenrauwert[29].	22
2-19	Bestimmung der gemittelten Rautiefe[29].	23
2-20	Polyeder mit Flächennormalen[23].	25
2-21	Schiefevektor m zweier Zellen[23].	25
3-1	Skizze mit Position der Messpunkte.	26
3-2	Segmente des Zylinderlaufflächen.	28
3-3	Segmente und resultierende Schnittflächen.	29
3-4	Ablaufschema Konturbestimmung.	30
3-5	Fehlerhafte Positionsauflösung.	30
3-6	Korrekte Positionsauflösung.	30
3-7	Gefiltertes Schliffbild.	31
3-8	Histogramm.	31
3-9	Hilfsprogramm Konturbestimmung.	33
4-1	Oberflächen Mesh.	35
4-2	Volumenmesh.	36
4-3	Gastemperatur bei 100 % Argon.	39
4-4	Oberflächenelemente der Düse.	40
4-5	Stickstoffverteilung.	41
4-6	Vereinfachtes Mesh.	42

4-7	Geometrie Düse Viertelschnitt.	43
4-8	Oberflächenmesh Düse Viertelschnitt.	44
4-9	Hintergrundmesh Düse.	44
4-10	Detailliertes Mesh Düse.	45
4-11	Patche Düse.	45
4-12	Beispielhafte Anordnung der Schnittlinien/Ebenen.	52
4-13	Beispielverläufe an drei Schnittlinien.	53
4-14	Interpoliertes 2D Temperaturfeld entlang der Strahlachse.	53
4-15	Gesamtsimulation.	54
4-16	Modellaufbau.	55
4-17	Volumenmodell und geschnittenes Primärmesh.	56
4-18	Mesh Motorblock.	57
4-19	Mesh Verdeckelung.	58
4-20	Sekundärmesh.	59
4-21	Patche Primär.	61
4-22	Patche Sekundär.	62
4-23	Patche Motorblock.	63
4-24	Patche Verdeckelung.	64
4-25	Skizze Abstandsbestimmung.	65
4-26	Ablaufschema Mappingalgorithmus.	67
4-27	Auf die Rotoroberfläche gemapptes Temperaturfeld.	67
4-28	Ablauf der Gesamtsimulation.	69
5-1	Schliffbild PTWA offener Aufbau, Einlassbereich.	70
5-2	Schliffbild PTWA offener Aufbau, Auslassbereich.	71
5-3	Schliffbild PTWA geschlossener Aufbau, Einlassbereich.	71
5-4	Schliffbild PTWA geschlossener Aufbau, Verdeckelung.	72
5-5	Schliffbild APS Konfiguration 1, Einlassbereich.	72
5-6	Schliffbild APS Konfiguration 1, Verdeckelung.	72
5-7	Schliffbild APS Konfiguration 2, Einlassbereich.	73
5-8	Schliffbild APS Konfiguration 2, Verdeckelung.	73
5-9	Schliffbild APS Konfiguration 3, Einlassbereich.	74
5-10	Schliffbild APS Konfiguration 3, Verdeckelung.	74
5-11	Schliffbild APS Konfiguration 4, Einlassbereich.	74
5-12	Schliffbild APS Konfiguration 4, Verdeckelung.	75
5-13	Maximale Einzelrautiefe.	75
5-14	Mittlere Glättungstiefe.	76
5-15	Vergleich Rautiefe.	76
5-16	Vergleich gemittelte Rautiefe.	77
5-17	Vergleich der Materialverteilungen bei APS und PTWA im Auslaufbereich.	78

5- 18	Vergleich der Materialverteilungen APS im Auslaufbereich.	79
5- 19	Ungefilterter Datensatz der Schichtdicke.	80
5- 20	Schichtdicke Auslauf.	80
5- 21	Porosität der Beschichtung über die Lauflänge der PTWA Versuche.	82
5- 22	Vergleich der Gesamtporosität APS.	82
5- 23	Vergleich der Gesamtporosität.	83
5- 24	Vergleich der Porositätsgeometrie.	84
5- 25	Verteilung der Messwerte der Porosität PTWA und APS.	84
5- 26	Unterschied Ergebnisse und Weibull-Fit.	85
5- 27	Verteilung der Gesamtporosität APS.	86
5- 28	Poren im Haftgrund.	86
5- 29	Entstehung Poren im Haftgrund.	87
5- 30	Bruch Pore im Haftgrund.	87
5- 31	Gemessene Temperaturen im offenen Aufbau.	89
5- 32	ATND Aufzeichnung AlSi12Cu[33].	90
5- 33	ATND Aufzeichnung einer Kupfer freien AlSi9Mg Legierung[34].	90
5- 34	Gemessene Temperaturen im geschlossenen Aufbau.	91
5- 35	Vergleich der gemessenen Temperaturen zu Beginn.	92
5- 36	Temperaturverteilung nach 50 Sekunden.	93
5- 37	Temperaturverteilung im Querschnitt nach 50 Sekunden.	94
5- 38	Vergleich der Temperaturkurven.	94

9.6 Tabellenverzeichnis

2-I	Auszug APS Werkstoffe[28].	4
2-II	Übersicht Aktivierungsverfahren[9].	9
2-III	Vergleich der Aktivierungsverfahren <i>AlSi7-XPT512</i> [8].	9
2-IV	Übersicht Porositätsbestimmungsverfahren[17].	17
3-I	Prozessparameter PTWA.	27
3-II	Übergänge.	27
3-III	Prozessparameter APS.	28
4-I	Mesheigenschaften vereinfachtes Mesh.	42
4-II	Mesheigenschaften detailliertes Mesh.	44
4-III	Randbedingungen Plasmaeinlass.	46
4-IV	Randbedingungen Presslufteinlass.	46
4-V	Randbedingungen physikalische Wand.	47
4-VI	Randbedingungen Symmetrieebene	47
4-VII	Randbedingungen Auslass.	48
4-VIII	Startbedingungen Plasmaeinlass.	51
4-IX	Startbedingungen Presslufteinlass.	51
4-X	Übersicht Hauptmesh.	56
4-XI	Mesheigenschaften Primärmesh.	57
4-XII	Mesheigenschaften Motorblock.	58
4-XIII	Mesheigenschaften Verdeckelung.	59
4-XIV	Mesheigenschaften Verdeckelung.	59
4-XV	Messpunkte Motorblock.	68
5-I	Beschichtungslänge über die Schichtdicke.	81
5-II	Statistik Gesamtporosität.	85
5-III	Haftzugfestigkeiten	88