

Technische Universität Dresden  
Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik  
Professur für Energieverfahrenstechnik

**Entwicklung und Integration eines prozessspezifischen Turbo-Compound-Systems als Bestandteil eines neuen Verfahrens zur dezentralen Erzeugung elektrischer Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem AZ37754/01-24/0 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

| <b><u>Forschungspartner 1:</u></b>   | <b><u>Forschungspartner 2:</u></b>  |
|--|---|
| Technische Universität Dresden<br>Professur für Energieverfahrenstechnik<br>Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann<br>George-Bähr-Str. 3b<br>01062 Dresden<br><br>Ansprechpartner:<br>Dr.-Ing. Daniel Bernhardt<br>Luis Wunder<br>Email: <a href="mailto:daniel.bernhardt@tu-dresden.de">daniel.bernhardt@tu-dresden.de</a> | Nagel Ingenieurbau GmbH<br><br>Torsten Nagel<br>Straße B Nr. 1<br>02979 Spreetal<br><br>Email: <a href="mailto:torsten@nagel-ib.de">torsten@nagel-ib.de</a> |

Dresden, den 30.01.2025

## Inhalt

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Zusammenfassung.....   | 6  |
| 2     | Einleitung.....  | 7  |
| 3     | Hauptteil.....   | 8  |
| 3.1   | Filmkühlung als Schutzmaßnahme für partikelbeladenes Gas (AP1).....                    | 8  |
| 3.1.1 | Eingangsbedingungen aus Turbinenauslegung und dimensionslose Kennzahlen .....          | 9  |
| 3.1.2 | Fertigungsmöglichkeiten für die Filmkühlung.....                                       | 11 |
| 3.1.3 | Parametrisierung der Bohrungen.....  | 11 |
| 3.1.4 | Erstellen einer Versuchsmatrix zur Überprüfung der Ablagerungstendenzen .....          | 14 |
| 3.1.5 | Konstruktion von Turbinenschaufeln mit einer Filmkühlung.....                          | 17 |
| 3.2   | CFD-Studie zur Einflussanalyse einer Strömungsschutzschicht (AP1).....                 | 20 |
| 3.2.1 | Planung und Aufbau der Simulation zur Untersuchung der Grenzschicht.....               | 20 |
| 3.2.2 | Vernetzung und Durchführung einer Netzkonvergenzstudie .....                           | 22 |
| 3.2.3 | Auswertungsaufbau der Simulationen.....  | 25 |
| 3.2.4 | Auswertung und Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse.....                        | 27 |
| 3.2.5 | Auswahl der Testschaufel für die Durchführung von Ablagerungsversuchen .....           | 32 |
| 3.3   | Entwicklung eines Versuchstandes und Fertigung von Testschaufeln (AP3).....            | 33 |
| 3.3.1 | Konzipierung des Versuchstandes zur Untersuchung an einer Einzelschaufel.....          | 33 |
| 3.3.2 | Fertigung der Testschaufel für die Durchführung der Ablagerungsversuche .....          | 35 |
| 3.4   | Herstellung von Testaschen und Versuchsdurchführung (AP2).....                         | 36 |
| 3.4.1 | Komponentenauswahl und Herstellung der Testaschen zur Erzeugung der Ablagerungen ..... | 36 |
| 3.4.2 | Versuchsablauf und eingestellte Versuchspunkte .....                                   | 40 |
| 3.5   | Auswertung der Versuche und Rückskalierung der Bohrungskonturen (AP2) .....            | 42 |
| 3.5.1 | Vergleich der Ablagerungserscheinungen mit Strömungssimulationen.....                  | 42 |
| 3.5.2 | Durchführung einer REM-EDX zur Charakterisierung der Ablagerungen.....                 | 44 |
| 3.5.3 | Konstruktion der Turbinenstufe mit Filmkühlung.....                                    | 48 |
| 3.6   | Konzeptionelle und konstruktive Anpassung des TCS (AP3).....                           | 49 |
| 4     | Zusammenfassung, Fazit und Ausblick.....   | 52 |
| 5     | Literaturverzeichnis.....  | 53 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1 Verfahrenskonzept der Vergasung mit nachgeschalteter Verbrennung und Turbo-Compound-System .....   | 7  |
| Abbildung 2 Formen von Kühlbohrungen zusammengestellt von [3].....   | 12 |
| Abbildung 3 Parametrisierung der Kühlbohrungen auf der Turbinenschaufel.....   | 13 |
| Abbildung 4 Grundkonfigurationen der Turbinenschaufeln für die Durchführung der Versuche.....  | 15 |
| Abbildung 5 Beispielkontur für eine Schaufel mit Frontlöchern und Bohrungen druckseitig .....  | 17 |
| Abbildung 6 Darstellung der Integration der Kühlkanäle bei unterschiedlichen Umlenkswinkeln der Testschaufeln .....  | 17 |
| Abbildung 7 Methode zur Positionierung der Kühlkanäle auf den Testschaufeln für die Ablagerungsuntersuchungen .....  | 18 |
| Abbildung 8 Darstellung der Schaufelkonfigurationen mit Zuordnung der Winkelumlenkungen und Konfigurationsausführungen.....  | 19 |
| Abbildung 9 Darstellung der Kühlbohrungen mit einfachen Bohrungen (links) und Diffusionswinkel (rechts) .....  | 20 |
| Abbildung 10 Simulationsaufbau zur Bewertung der Grenzschichtausbildung der Filmkühlung für unterschiedliche Umlenkswinkel der Schaufeln .....   | 21 |
| Abbildung 11 Darstellung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur aus der Netzkonvergenz zur Auswahl der Vernetzung .....  | 23 |
| Abbildung 12 Berechnungszeit von 1000 Iterationsschritten für unterschiedliche Netzelemente.....   | 24 |
| Abbildung 13 Darstellung ausgewählter Vernetzungseinstellungen zur Veranschaulichung der Auswirkung der Netzeinstellungen .....  | 24 |
| Abbildung 14 Simulationsergebnisse ausgewählter Schaufelkonfigurationen für den Simulationspunkt $T_{Gas} = 873K$ ; $v_{Gas} = 20m/s$ ; $TKL = 293K$ .....   | 25 |
| Abbildung 15 Schnittebenen für die Aufnahme der Temperaturverläufe auf der Oberfläche der Turbinenschaufel.....  | 26 |
| Abbildung 16 Beispielhafter Vergleich zwischen den Schaufelkonfigurationen V002 und V005 im Betriebspunkt $T_{Gas} = 873K$ ; $v_{Gas} = 20m/s$ ; $TKL = 293K$ .....  | 26 |
| Abbildung 17 Visualisierung des Geschwindigkeitseinflusses bei der Durchführung der Simulationen bei konstanten Parametern $T_{Gas} = 873K$ ; $TKL = 293K$ und variablen Parametern in Zeile 1,2,3 mit $v_{Gas} = 20m/s$ , $50m/s$ und $150m/s$ .....    | 27 |
| Abbildung 18 Visualisierung des Gasttemperatureinflusses bei der Durchführung der Simulationen bei konstanten Parametern $v_{Gas} = 50m/s$ ; $TKL = 293K$ und variablen Parametern in Zeile 1,2,3 mit $T_{Gas} = 873K$ , $1023K$ und $1173K$ .....       | 29 |
| Abbildung 19 Visualisierung des Kühllufttemperatureinflusses bei der Durchführung der Simulationen bei konstanten Parametern $v_{Gas} = 50 m/s$ ; $T_{Gas} = 873K$ und variablen Parametern in Zeile 1,2,3 mit $TKL = 293 K$ , $423 K$ und $573 K$ ..... | 30 |
| Abbildung 20 Visualisierung des Geometrieinflusses aus Abbildung 8 bei der Durchführung der Simulationen bei konstanten Parametern $v_{Gas} = 50 m/s$ ; $T_{Gas} = 873 K$ und mit $TKL = 293 K$ .....  | 31 |
| Abbildung 21 Schaufelkonfigurationen die für die Durchführung der Versuche gefertigt wurden .....  | 32 |
| Abbildung 22 Konzept des Versuchsstandes zur Durchführung der Versuche an der Einzelschaufel..   | 33 |
| Abbildung 23 Partikeleintrag mit darauf folgenden Schaufelkanal für die Untersuchung der Testschaufel in partikelbeladenem Gas .....   | 34 |
| Abbildung 24 Erichteter Versuchsstand mit Darstellung des Schaufeleinsatzes .....  | 35 |
| Abbildung 25 Fotografien der gefrästen und nitrierten Schaufeln für die Versuchsdurchführung.....  | 35 |
| Abbildung 26 REM-EDX-Aufnahmen der Einzelkomponenten der Asche vor der Mischung.....   | 37 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 27 Kumulative Partikelgrößenverteilung der Einzelstoffe und der gemischten Testasche mit Standardabweichung.....  | 38 |
| Abbildung 28 Fotografie der in Tabelle 10 (1-6) aufgeführten Einzelstoffe und die Asche im gemischten Zustand (7).....  | 39 |
| Abbildung 29 Aufzeigen der verschiedenen Versuchsabläufe für die vier Ablagerungsversuche mit den ausgewählten Testschaufeln.....                                   | 40 |
| Abbildung 30 Ergebnisse der Ablagerungsversuche im Vergleich zu Strömungssimulationen mit identischen Versuchspunkten.....  | 42 |
| Abbildung 31 Vorderkante der Testschaufeln mit und ohne Frontalbohrungen sowie repräsentative Saugseite der Testschaufeln.....                                      | 44 |
| Abbildung 32 REM-Aufnahmen entsprechend der Entnahmestellen von Tabelle 13.....   | 45 |
| Abbildung 33 Konstruierte und integrierte Filmkühlung auf den Schaufeln des TCS (Laufrad links, Leitrad rechts).....  | 49 |
| Abbildung 34 Konzeptangepasstes TCS mit integrierter Filmkühlung.....   | 49 |
| Abbildung 35 Darstellung der Nutkanäle zur Verteilung der Frischluft für die Kühlbohrungen der Filmkühlung auf den Leit- und Laufrädern der TCS-Turbinenstufen..... | 50 |
| Abbildung 36 Darstellung der konstruktiven Überarbeitung des TCS.....   | 51 |

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1 Eingangparameter aus Turbinenauslegung zur Erzeugung ähnlicher Versuchsschaufeln...   | 10 |
| Tabelle 2 Minimal- und Maximalwerte der dimensionslosen Kennzahlen zur Skalierung der Turbine   | 10 |
| Tabelle 3 Betrachtung möglicher Fertigungsverfahren zu Herstellung der Filmkühlung.....   | 11 |
| Tabelle 4 Parameter für die Konstruktion einer Filmkühlung auf einer Turbinenschaufel.....  | 13 |
| Tabelle 5 Thermodynamische Parameter für den Versuchsstand.....   | 14 |
| Tabelle 6 Parameter für die Integration der Filmkühlung auf den Schaufeln.....  | 16 |
| Tabelle 7 Parametersatz zur Durchführung der Simulationen zur Bewertung der Grenzschichtausbildung unter verschiedenen Strömungsbedingungen.....              | 21 |
| Tabelle 8 Parametereinstellung für die durchgeführte Netzkonvergenzstudie der Einzelschaufelsimulationen.....   | 22 |
| Tabelle 9 Mögliches Parameterfeld zur Durchführung der Versuche an der Einzelschaufel.....  | 35 |
| Tabelle 10 Zusammensetzung der Testasche für die Durchführung der Versuche.....   | 36 |
| Tabelle 11 Aufführung der Zusammensetzung der Komponenten Kalk und Gips durch deren Elementarzusammensetzung.....   | 38 |
| Tabelle 12 Aufführung relevanter Parameter aus der Durchführung der Ablagerungstests an der Einzelschaufel für die Einordnung der erzeugten Ablagerungen..... | 41 |
| Tabelle 13 Zuordnung der Probeentnahmestellen zu Abbildung 32.....  | 44 |
| Tabelle 14 Vergleich der EDX-Analyse der ausgewählten Testpunkte mit der ursprünglichen Aschezusammensetzung.....   | 46 |
| Tabelle 15 Prozentuale Änderung der Zusammensetzung der analysierten Ablagerungen in $\Delta dev$ ...   | 47 |
| Tabelle 16 Parameter zur Integration der Filmkühlung auf den Schaufeln des TCS.....   | 48 |

## Formelverzeichnis

| Symbol        | Einheit    | Bezeichnung                              |
|---------------|------------|--|
| $a$           | $mm$       | Bohrungszwischenabstand                  |
| Anz           | 1          | Anzahl Frontalbohrungen                  |
| $A_{quer}$    | $mm^2$     | Lochquerschnittfläche                    |
| $b$           | $mm$       | seitliche Bohrungserweiterung            |
| $c_0$         | $m/s$      | Absolutgeschwindigkeit Einlass Leitrad   |
| $c_1$         | $m/s$      | Absolutgeschwindigkeit Auslass Leitrad   |
| $c_{P,m}$     | $g/kg$     | gasmassenbasierte Partikelkonzentration  |
| $c_{P,v}$     | $g/m^3$    | gasvolumenbasierte Partikelkonzentration |
| $d_f$         | $mm$       | Durchmesser Frontalbohrung               |
| $d/l$         | 1          | Profildicke                              |
| $h$           | $m$        | Schaufelhöhe                             |
| $I$           | 1          | Impulsverhältnis                         |
| $h/d$         | $mm$       | Basis Höhe/Durchmesser                   |
| $l_b$         | $\%/mm$    | Mittellinienabstand                      |
| $LF$          | 1          | Lochform                                 |
| $l_s$         | $mm$       | Sehnenlänge Turbinenschaufel             |
| $Ma$          | 1          | Mach-Zahl                                |
| $m_p$         | $g$        | injizierte Partikelmasse                 |
| $N$           | 1          | Anzahl Bohrungen                         |
| $Nu$          | 1          | Nusselt-Zahl                             |
| $p_{Gas}$     | $bar, rel$ | Druck Strömungskanal Auslass             |
| $Pr$          | 1          | Prandtl-Zahl                             |
| $r$           | $mm$       | Kantenradius                             |
| $Re$          | 1          | Reynolds-Zahl                            |
| $T_1$         | $K$        | Temperatur Auslass Absolutströmung       |
| $T_2$         | $K$        | Temperatur Auslass Relativströmung       |
| $T_{Gas}$     | $K$        | Gastemperatur                            |
| $T_{KL}$      | $K$        | Temperatur Kühlluft                      |
| $t_p$         | $min$      | Injektionsdauer                          |
| $v_1$         | $m/s$      | Relativgeschwindigkeit Einlass Laufrad   |
| $v_2$         | $m/s$      | Relativgeschwindigkeit Auslass Laufrad   |
| $v_{Gas}$     | $m/s$      | Gasgeschwindigkeit                       |
| $v_{KL}$      | $m/s$      | Geschwindigkeit Kühlluft                 |
| $x_f/l$       | 1          | Wölbungsrücklage                         |
| $\alpha$      | $^\circ$   | Mittellinienwinkel                       |
| $\alpha_0$    | $^\circ$   | Einlasswinkel Absolutströmung Leitrad    |
| $\alpha_1$    | $^\circ$   | Auslasswinkel Absolutströmung Leitrad    |
| $\beta$       | $^\circ$   | Winkel seitliche (laterale) Erweiterung  |
| $\beta_1$     | $^\circ$   | Einlasswinkel Relativströmung Laufrad    |
| $\beta_2$     | $^\circ$   | Auslasswinkel Relativströmung Laufrad    |
| $\Delta\beta$ | $^\circ$   | Umlenkwinkel                             |

|              |                   |  |
|--------------|-------------------|--|
| $\delta$     | $^{\circ}$        | Winkel rückgewinkelte Erweiterung                    |
| $\Delta dev$ | %                 | prozentuale Änderung der Ablagerungszusammensetzung  |
| $\eta_{FK}$  | 1                 | adiabater Filmkühlungswirkungsgrad                   |
| $\xi_{E,m}$  | Ma – %            | gemessener Anteil eines Elements in den Ablagerungen |
| $\xi_{E,ex}$ | Ma – %            | erwarteter Anteil eines Elements in den Ablagerungen |
| $\rho_{Gas}$ | kg/m <sup>3</sup> | Dichte Gas   |
| $\rho_{KL}$  | kg/m <sup>3</sup> | Dichte Kühlluft                                      |

## Abkürzungsverzeichnis

|     |  |
|-----|--|
| CFD | numerische Strömungssimulation         |
| EDX | energiedispersive Röntgenspektroskopie |
| FWL | Feuerungswärmeleistung                 |
| REM | Rasterelektronenmikroskopie            |
| TCS | Turbo-Compound-System                  |
| WS  | Wirbelschicht                          |

# 1 Zusammenfassung

Zur energetischen Nutzung von vornehmlich biogenen Rest- und Abfallstoffen wurde von den Projektpartnern in Vorprojekten das sogenannte TC<sup>2</sup>-Verfahren entwickelt, patentiert und in einer Demonstrationsanlage umgesetzt. Dabei wird der Einsatzstoff in einem druckaufgeladenen Wirbelschichtreaktor in ein brennbares Vergasungsgas konvertiert und in einer nachgeschalteten Brennkammer verbrannt. Mittels eines Turbo-Compound-Systems (TCS) wird die Abgasenthalpie anschließend zum Antrieb des Luftverdichters und zur Stromerzeugung genutzt. Die ebenfalls anfallende thermische Energie kann zur Wärmebereitstellung (Prozesswärme, Gebäudeheizung) genutzt werden.

Um das Verfahrenskonzept in eine kommerzielle Gesamtanlage zu überführen, muss das TCS an die rauen Prozessbedingungen (partikelbeladenes heißes Abgas) adaptiert und unter diesen Bedingungen getestet werden. Das Ziel dieses Vorprojektes bestand daher in der Entwicklung von Maßnahmen, die Partikelablagerungen auf den Schaufeln des TCS minimieren. Diese sollten experimentell an Einzelschaufeln getestet und eine Vorzugsvariante für den Aufbau eines an das Verfahren angepassten TCS ausgewählt werden. Zur Umsetzung wurde die Filmkühlung als Schutzmaßnahme ausgewählt, die sich bereits in anderen Turbomaschinenanwendungen als vorteilhaft erwiesen hat. Für die Integration wurden Schaufelschnitte aus der Anwendung des bestehenden TCS entnommen und Testschaufeln geschaffen, auf denen typische Ausführungen einer Filmkühlung generiert wurden. Eine Vorauswahl und Analyse der Strömungsmuster der Schaufeln wurde durch CFD-Studien vorgenommen. Aus den Erkenntnissen der CFD-Studien wurden die Schaufelsätze mit einem Umlenkwinkel von  $\Delta\beta = 40,6^\circ$  ausgewählt. Diese wurden anschließend in experimentell untersucht. Dazu wurde ein Versuchsstand entworfen und aufgebaut, mit dem der Einfluss der Filmkühlung auf Partikelablagerungen unter prozesstypischen Betriebsbedingungen an Einzelschaufeln untersucht werden kann. Der Versuchsstand wurde so konzipiert, dass er relevante Parameter wie Gastemperatur, Gasgeschwindigkeit und Partikelkonzentration im Gasstrom der späteren Anwendung nachempfunden. Als Asche für die Versuchsdurchführung wurden anorganische Komponenten ausgewählt (Kalk, Gips,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2SO_4$ ,  $NaCl$ ,  $KCl$ ), die als typische Flugaschebestandteile gelten. Diese wurden in definierten Anteilen gemischt, in den Gasstrom des Versuchsstandes dosiert und mit einer definierten Massenkonzentration den Einzelschaufeln zugeführt. Die Bewertung der Ablagerungen erfolgte visuell, durch den Vergleich mit CFD-Simulationen und mittels REM-EDX-Analysen. Gleichzeitig wurden die ausgewählten Testschaufeln mit einem spanenden Fertigungsverfahren aus 1.2343 hergestellt und nitriert.

Die CFD-Studie hat gezeigt, dass bei der Ausbildung des Kühlfilms vor allem eine Umlenkung von  $\Delta\beta = 40,6^\circ$  begünstigt wird. Bei dieser Gegebenheit ist deswegen die beste Schutzwirkung zu erwarten. Zusätzlich zeigte die Variation mit gefächelter Bohrung die beste Schutzwirkung sowohl in den CFD-Simulationen als auch in den Versuchen gegenüber Partikelablagerung. Im Ergebnis der Experimente des Einzelschaufelversuchsstandes wurde festgestellt, dass Frontalbohrungen im Kontext einer Schutzwirkung kontraproduktiv sind, da sie eine verstärkte Durchmischung der Strömung hervorrufen und damit den Partikeltransport zur Oberfläche der Schaufel begünstigen. Auch zeigten in diesem Zusammenhang niedrige Impulsverhältnisse einen positiven Effekt auf die Reduzierung der Ablagerungstendenz auf der Druckseite der Turbinenschaufel. Insgesamt ist die Filmkühlung eine vielversprechende Anwendung, um die Betriebszeit des TCS mit einem festen Brennstoff zu verlängern.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein finales TCS mit Filmkühlung entworfen und zur Fertigung vorbereitet. Dieses soll nun im Rahmen eines Hauptprojektes in die Demonstrationsanlage integriert und unter den realen Betriebs- und Prozessbedingungen getestet werden.

## 2 Einleitung

Biomasse ist als erneuerbarer Energieträger zur Reduzierung der fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen und Ressourcenschonung anerkannt. Vom gesamten Spektrum fester Biobrennstoffe wird in thermochemischen Konversionsanlagen vor allem Holz als vergleichsweise qualitativ hochwertige Biomasse zur Wärme- und Strombereitstellung eingesetzt. Das Potential alternativer Einsatzstoffe, zu denen insbesondere biogene Rest- und Abfallstoffe zählen, die im Bereich der stofflichen Biomassenutzung (z. B. Möbelwerke, Brauereien, Molkereien, Papier- und Wellpappenverarbeitung, usw.) dezentral am Produktionsort anfallen und aufgrund ihrer Eigenschaften für eine weitere stoffliche Nutzung ungeeignet sind, bleibt hingegen bisher weitestgehend ungenutzt. Gleichzeitig suchen diese Industriezweige zunehmend nach Möglichkeiten, um ihre auf fossilen Brennstoffen beruhende Energieversorgung durch eigene biogene Rest- und Abfallstoffe zu substituieren und so auch steigende Kosten für fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen einzusparen.

Da es sich bei diesen Einsatzstoffen produktionsbedingt meist um „kleinteilige“ Stoffströme von einigen 1000 Tonnen pro Jahr handelt, sind Anlagenkonzepte im Leistungsbereich von 100 – 1000 kW Feuerungswärmeleistung (FWL) zur dezentralen, CO<sub>2</sub>-neutralen Wärmeversorgung und Stromerzeugung erforderlich. In dieser Leistungsklasse sind fast ausschließlich Festbettvergasungsanlagen kommerziell verfügbar, in denen Holz als Brennstoff eingesetzt wird. Der wirtschaftliche Betrieb dieser Anlagen stellt dabei hohe Anforderungen an die Holzqualität, v.a. an die Stückigkeit, den Wasser- und Aschegehalt, den Heizwert, das Ascheerweichungsverhalten und erlaubt nur geringfügige Schwankungen. Für heterogene Einsatzstoffe mit veränderlichen Eigenschaften, zu denen auch biogene Rest- und Abfallstoffe zählen, sind diese Anlagen daher ungeeignet.

Daher wurde von den Forschungspartnern ein alternatives Verfahren entwickelt, patentiert [1] und in einer Demonstrationsanlage umgesetzt, das für schwierige biogene Festbrennstoffe geeignet ist und die Nachteile im Stand der Technik behebt. Das Verfahrenskonzept ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei dem Verfahren wird ein Einsatzstoff in einem druckaufgeladenen Wirbelschichtreaktor (WS) in ein brennbares Vergasungsgas konvertiert und in einer nachgeschalteten Brennkammer (BK) verbrannt. Mittels eines Turbo-Compound-Systems (TCS) wird die Abgasenthalpie anschließend zum Antrieb des Luftverdichters und zur Stromerzeugung genutzt. Die ebenfalls anfallende thermische Energie kann zur Wärmebereitstellung (Prozesswärme, Gebäudeheizung) genutzt werden und so zusätzlich den Einsatz fossiler Energieträger (z.B. Erdgas, Erdöl, etc.) reduzieren, wodurch eine höhere Ressourcenunabhängigkeit aus wirtschaftlicher oder politischer Sicht erreicht wird.

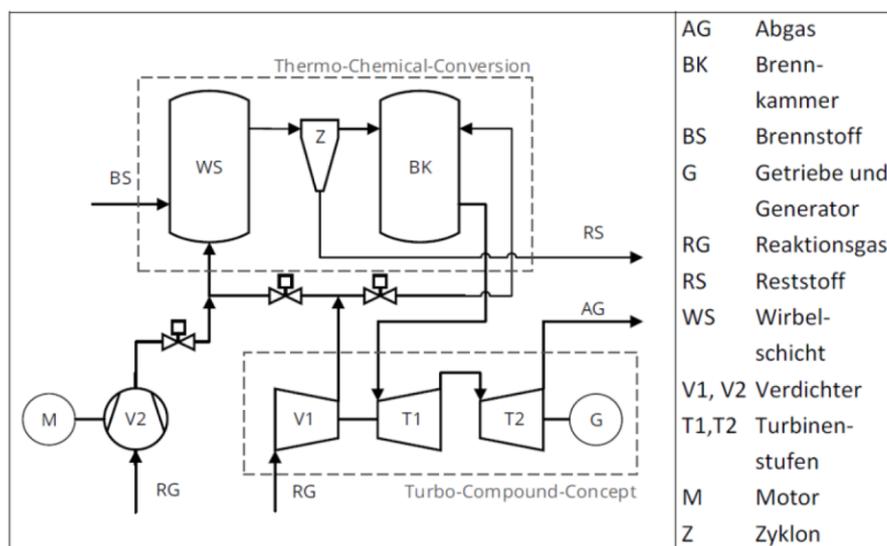


Abbildung 1 Verfahrenskonzept der Vergasung mit nachgeschalteter Verbrennung und Turbo-Compound-System

Die Funktion des thermischen Hauptverfahrens (Vergasung, Brennkammer) wurde bereits in einem Projekt erfolgreich nachgewiesen und in einer Dissertation [2] dokumentiert. Größere Herausforderungen ergaben sich bei der Auswahl eines kommerziell verfügbaren TCS, das für die Verfahrensspezifikationen geeignet ist. Da für diesen Anwendungsfall weder ein gesamtes TCS noch einzelne Komponenten kommerziell verfügbar waren, wurde eine TCS-Eigenentwicklung durchgeführt (SAB-Projekt 100383697). Um das Verfahrenskonzept in eine Gesamtanlage zu überführen, muss das TCS abschließend an die rauen Prozessbedingungen (partikelbeladenes heißes Abgas) adaptiert und unter diesen Bedingungen getestet werden.

Aus diesem Grund wurde in dem hier durchgeführten Vorprojekt eine Filmkühlung auf den Schaufeln des TCS integriert. Erster Schritt der Integration war der funktionelle Nachweis der Filmkühlung bei der Anwendung auf einer Einzelschaufel. Danach wurde die konstruktive Überarbeitung des TCS für die Integration der Filmkühlung vorgenommen. Ergebnis ist das CAD-Modell des TCS mit Filmkühlung, mit welchem eine Fertigung durchgeführt werden kann. Die zur Durchführung gehörenden Arbeiten werden im Hauptteil dieses Berichtes beschrieben.

### 3 Hauptteil

Im Hauptteil des Berichts wird die detaillierte Entwicklung einer Filmkühlung und die damit verbundenen Änderungen in Bezug auf den Turbinenaufbau beschrieben. Ziel des Vorhabens ist es eine Filmkühlungsmethode in einer Kleingasturbine zu integrieren, um die Ablagerungen durch den Einsatz von biogenen Reststoffen zu reduzieren. Ausgangspunkt ist die in einem Vorgängerprojekt entwickelte Gasturbine. Um die Filmkühlung für die Schadminderung erfolgreich im Turbinenkonzept zu integrieren, musste das Konzept zuerst erfolgreich auf der Einzelschaufel angewandt werden. Dafür wurden im ersten Schritt Testschaufeln konstruiert und ein Parameterfeld erstellt, welches den Bedingungen in den Schaufelschnitten der Turbine entspricht. Das Parameterfeld umfasst zum einen thermodynamische Bedingungen der Gasströme sowie konstruktive Parameter von Turbinenschaufel und Filmkühlkanäle. Im nächsten Schritt wurden mit den konstruierten Schaufeln CFD-Simulationen durchgeführt, um eine geeignete Filmkühlmethode zu entwickeln. Während der CFD-Simulationen wurden die konstruktiven Parameter der Filmkühlung sukzessiv angepasst, bis eine ausreichende Strömungsgrenzschicht zum Schutz der Schaufeln entstanden ist. Als Vergleichsgröße wurde auf der Turbinenschaufel die adiabate Filmkühleffektiv im Abgleich mit der Kühllufttemperatur am Eintritt gewählt. Schließlich wurde noch ein Versuchsstand für den realen Test der Partikelablagerung entwickelt und ausgewählte Testschaufeln für die Versuchsdurchführung gefertigt. Die anschließenden Versuche wurden mit einer selbst erstellten Asche durchgeführt, welche den Bedingungen der späteren Anwendung entsprechen. Die Ergebnisse wurden visuell und mit einer REM-EDX-Untersuchung analysiert, woraufhin die beste Kühlbohrungskonfiguration ausgewählt wurde. Anschließend wurde die beste Kühlbohrungskonfiguration auf den Schaufeln des TCS rückskaliert. Zusätzlich wurden Änderungen im bestehenden TCS vorgenommen, um die Methode einer Filmkühlung zu integrieren. Das Ergebnis ist ein fertiges Turbinenmodell, welches eine Filmkühlung zum Schutz vor potentiellen Ablagerungen enthält. Im nächsten Schritt wird das Turbinenmodell gefertigt, um es anschließend im Betrieb der Wirbelschicht zu testen.

#### 3.1 Filmkühlung als Schutzmaßnahme für partikelbeladenes Gas (AP1)

Die Integration einer Filmkühlung ist eine besondere ingenieurtechnische Herausforderung. Bei ihrer Auslegung müssen sowohl strömungsmechanische wie auch thermodynamische Aspekte in Einklang gebracht werden. Zusätzlich muss die Gestaltung mechanischen Anforderungen entsprechen sowie

Gesichtspunkte für eine Fertigung berücksichtigen. Im hier angestrebten Vorhaben sollen dazu noch die Aspekte einer Partikelablagerung in die Auslegung einfließen.

Der Entwurf einer realen Turbinenschaufel unterliegt einer dreidimensionalen Gestaltung. Das heißt, innerhalb der Turbinenstufe (sowohl Lauf- und Leitrad) bilden sich verteilt über die Schaufelhöhe komplexe Interaktionen zwischen Strömungsführung, Energieumsatz und Änderung des Gaszustandes. Eine Gestaltung und Überprüfung der Wirkung einer Filmkühlung im Hinblick auf den zusätzlichen Aspekt der Partikelablagerung gestaltet sich damit als schwer. Um eine Filmkühlung zur Vermeidung der Partikelablagerung erfolgreich zu integrieren, ist es dafür zuerst notwendig die Funktion an einer einzelnen nicht gewundenen Einzelschaufel nachzuweisen. Ziel dieses Arbeitsabschnittes ist es einen Satz an Turbinenschaufeln zu schaffen, welcher die realen Bedingungen in der Kleingasturbine widerspielt. Auf diesen Schaufeln soll anschließend die Anwendung der Filmkühlung entwickelt werden, um sie in einem späteren Schritt wieder auf die eigentliche Schaufel zurück zu skalieren. Zusätzlich muss ein Parameterfeld zur Durchführung der numerischen Strömungssimulationen geschaffen werden, wodurch die realen Bedingungen in der Turbine dargestellt werden.

Im ersten Schritt wurden daher die Schnittgrößen der Turbinenauslegung des Vorgängerprojektes (Projekt SAB 100383697) entnommen und in dimensionslose Kennzahlen überführt. Weiter wurde eine Matrix an möglichen Geometrieparametern geschaffen. Mit den Geometrieparametern wurden anschließend drei Konfigurationen an Testschaufeln konstruiert, welche die verschiedenen Schaufelschnitte der Auslegung am besten repräsentieren. Als nächstes wurden unter Absprache mit Industriepartnern mögliche Fertigungsverfahren zur Integration der Filmkühlung auf der Turbinenschaufel geführt. Geeignete Fertigungsverfahren für die Erstellung der Austrittslöcher sind zum einen das Bohren, Fräsen und das Senkerodieren. Im nächsten Schritt wurde anhand der möglichen Fertigungsverfahren eine Parametrisierung der Bohrungen auf der Schaufel vorgenommen. Dies geschah im Abgleich mit in der Literatur vorhandener Daten. In diesen Zusammenhang wurden auch Vergleichsgrößen der Filmkühlung geschaffen, um diese später in einer CFD-Simulation bewerten zu können. Schließlich wurde noch eine Versuchsmatrix für die Durchführung der Simulationen erstellt und die Konfigurationen der Schaufelkühlung konstruiert.

### 3.1.1 Eingangsbedingungen aus Turbinenauslegung und dimensionslose Kennzahlen

Ausgangspunkt für die Integration der Filmkühlung ist das Modell einer Gasturbine im niedrigen Leistungsbereich (60 kW mechanisch Brutto), die bereits konzeptionelle für den Einsatz von biogenen Reststoffen angepasst wurde. Während der Auslegung dieser Turbine wurden die verschiedenen Schaufelschnittgrößen dokumentiert, um sie im weiteren Optimierungsprozess der Maschine verändern zu können. Um die Filmkühlung erfolgreich in die Turbine integrieren zu können, muss diese Anwendung zunächst erfolgreich auf einer Einzelschaufel angewandt werden. Hierfür wurden im ersten Schritt die gespeicherten Schnittgrößen der Turbinenauslegung gegenübergestellt, um das Parameterfeld des Einsatzbereiches zu analysieren. Insgesamt besteht die Turbine aus zwei Stufen, wobei jedes Lauf- und Leitrad einer Stufe aus je fünf Schaufelschnitt aufgebaut ist. Relevante Größen dieses Parameterfeldes sind die verschiedenen Winkel von Absolut- und Relativströmung, die Geschwindigkeiten dieser Strömung, Druck und Temperatur sowie weitere geometrische Gegebenheiten der Schaufel. Eine Auflistung aus der Auslegung relevanter Parameter ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Eingangsparameter aus Turbinenauslegung zur Erzeugung ähnlicher Versuchsschaufeln

| Bezeichnung                             | Formelzeichen | min    | max    | Einheit |
|---|---------------|--------|--------|---------|
| Einlasswinkel Absolutströmung (Leitrad) | $\alpha_0$    | 0,00   | 73,91  | °       |
| Auslasswinkel Absolutströmung (Leitrad) | $\alpha_1$    | 63,51  | 73,91  | °       |
| Einlasswinkel Relativströmung (Laufrad) | $\beta_1$     | 103,73 | 161,61 | °       |
| Auslasswinkel Relativströmung (Laufrad) | $\beta_2$     | 168,86 | 160,63 | °       |
| Absolutgeschwindigkeit Einlass          | $c_0$         | 71,09  | 86,09  | m/s     |
| Absolutgeschwindigkeit Auslass          | $c_1$         | 206,17 | 304,60 | m/s     |
| Relativgeschwindigkeit Einlass          | $v_1$         | 82,40  | 268,78 | m/s     |
| Relativgeschwindigkeit Auslass          | $v_2$         | 315,63 | 470,09 | m/s     |
| Temperatur Auslass Absolutströmung      | $T_1$         | 727,92 | 839,81 | K       |
| Temperatur Auslass Relativströmung      | $T_2$         | 721,96 | 798,37 | K       |
| Sehnenlänge Turbinenschaufel            | $l_s$         | 0,0145 | 0,0152 | m       |

Im nächsten Schritt wurden mit diesen Werten, zusammen mit den Stoffwerten der Gasströmung, dimensionslose Kennzahlen berechnet. Um den Zustand zwischen realer Turbine und Testschaufel vergleichen zu können, musste die Mach-Zahl, Reynolds-Zahl, Prandtl-Zahl und Nusselt-Zahl berechnet werden. Für die Prandtl-Zahl wurde die Annäherung über den Isentropenexponenten gewählt. Zusätzlich musste im Rahmen der Mach-Zahl-Berechnung die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt werden. Dafür wurde der Ansatz über Isentropenexponent, individuelle Gaskonstante und Gastemperatur gewählt. Für die Berechnung wurden typische Werte für ein Rauchgas angenommen. Anschließend kann mit den entsprechenden Geschwindigkeiten im Schaufelschnitt der Turbine die Mach-Zahl bestimmt werden. Bei der Bestimmung der Reynolds-Zahl wurde die Sehnenlänge der Turbine als charakteristische Länge verwendet. Zusätzlich wurde über einen Polynomansatz der temperaturabhängige Wert der Viskosität bestimmt. Die Nusselt-Zahl wurde mit der Dittus-Boelter-Gleichung für eine turbulente Strömung berechnet. Auch wurde der Umlenkwinkel zwischen Schaufelein- und austritt bestimmt, um diesen Parameter mit in die Parametermatrix aufzunehmen. Wölbungsrücklage und Schaufelprofilstärke wurden bezogen auf die Sehnenlänge unverändert gelassen. In Tabelle 2 sind die Minimal- und Maximalwerte der dimensionslosen Kennzahlen für die Skalierung der Turbinenschaufel dargestellt. Zusätzlich ist der minimal und maximal auftretenden Umlenkwinkel der Schaufelschnitte aufgeführt, da dieser ebenfalls ein relevanter Parameter zur Untersuchung einer Ablagerungstendenz darstellt.

Tabelle 2 Minimal- und Maximalwerte der dimensionslosen Kennzahlen zur Skalierung der Turbine

| Bezeichnung   | FZ            | Minimalwert | Maximalwert | Einheit |
|---------------|---------------|-------------|-------------|---------|
| Mach-Zahl     | $Ma$          | 0,355       | 0,873       | 1       |
| Reynolds-Zahl | $Re$          | 33905,4     | 104319,5    | 1       |
| Prandtl-Zahl  | $Pr$          | 0,737       | 0,737       | 1       |
| Nusselt-Zahl  | $Nu$          | 136,6       | 335,6       | 1       |
| Umlenkwinkel  | $\Delta\beta$ | 7,8         | 73,9        | °       |

Mit den in Tabelle 2 aufgeführten Parametern wurden später im Rahmen dieser Arbeit drei Testschaufelkonfigurationen und Strömungsparameter erzeugt, welche zur Durchführung der numerischen Strömungssimulationen genutzt wurden.

### 3.1.2 Fertigungsmöglichkeiten für die Filmkühlung

Der Anspruch an das Fertigungsverfahren für die Herstellung von Bohrungen zur Realisierung der Filmkühlung ist aus Sicht der Fertigungsrealisierung möglichst kleine Aussparungen mit definierter Geometrie zu erzeugen. Maße, welche die Aussparungen im Querschnitt annehmen können, sind im Bereich von 0,1 mm – 2 mm. Die Tiefe der Bohrungen liegt im Bereich von unter 10 mm. Ein weiterer Aspekt zur Bewertung des Verfahrens sind die anfallenden Kosten während der Herstellung. Um die Gesamtkosten der Turbine möglichst gering zu halten, soll auch das Einbringen der Aussparungen möglichst wenig Kosten erzeugen. Zusätzlich ist auch die Fertigungsdauer ein Faktor in der Betrachtung. Als gängiges Verfahren bei der Herstellung einer Filmkühlung ist bereits das Erodieren bekannt. Zusätzlich wurde als kostengünstige Alternative das Bohren und Fräsen der Aussparungen betrachtet. Ein weiterer Aspekt, der bei der Fertigung berücksichtigt werden muss, ist die Bearbeitbarkeit des Materials. Für den Einsatz in einer Turbine werden typischerweise hochlegierte Edeltähle oder Nickelbasislegierungen verwendet. Diese Werkstoffe besitzen eine hohe Zugfestigkeit und Härte, wodurch eine Bearbeitung erschwert wird. Auch, wenn alle Verfahren eine Bearbeitung mit diesen Material ermöglichen, zeigt hier das Erodieren Vorteile. Eine Gegenüberstellung der Verfahren ist in Tabelle 3 abgebildet.

*Tabelle 3 Betrachtung möglicher Fertigungsverfahren zu Herstellung der Filmkühlung*

|                | Kosten  | Individualität<br>Geometrie | Güte<br>Materialabtrag | Dauer  |
|----------------|---------|-----------------------------|------------------------|--------|
| Fräsen         | mittel  | mittel                      | mittel                 | mittel |
| Bohren         | niedrig | niedrig                     | niedrig                | kurz   |
| Drahterodieren | hoch    | hoch                        | hoch                   | lang   |

In Tabelle 3 zeigt sich vor allem, dass das Bohren als sehr günstige Alternative für die Herstellung der Bohrungen angesehen werden kann. Problematisch ist allerdings, dass zum einen nur ein sehr limitierter Materialabtrag stattfinden kann und zum anderen auch keine Abweichungen in der Bohrungsgeometrie vorgenommen werden können. Im Kontrast dazu lassen sich mit Drahterodieren sehr individuelle Bohrungen auf nahezu jeden Werkstoff herstellen, wodurch das Verfahren jedoch auch sehr teuer ist und viel Zeit in Anspruch nimmt. Ein Kompromiss der beiden Verfahren ist das Fräsen. Mit diesem Material lassen sich die meisten für eine Turbinenschaufel relevanten Materialien bearbeiten. Zusätzlich ist es möglich durch die mehrachsigen Ausführungen der Bearbeitungsmaschinen sehr individuelle Geometrien als Bohrung zu erzeugen. Da die Turbinenschaufelgeometrien in jedem Fall gefräst werden und die Kühlbohrungen damit im selben Schritt integriert werden, soll für die erste Fertigungsreihe Fräsen als Herstellungsverfahren gewählt werden. Mit der Fertigungsmöglichkeit als Randbedingung wurden im nächsten Schritt die Aussparungen für die Filmkühlung parametrisiert, um diese auf die Schaufeln der Turbine zu integrieren.

### 3.1.3 Parametrisierung der Bohrungen

Die Anwendung einer Filmkühlung ist eine gängige Methode bei dem Entwurf einer Gasturbine. In der Vergangenheit wurden dazu zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden unter anderem verschiedene Formen für die Anwendung einer Filmkühlung untersucht. Eine Zusammenfassung verschiedener Untersuchungen ist in [3] zu finden. In [3] werden die Ausführungen einer Kühlbohrung in vier verschiedene Untergruppen unterteilt. Hauptsächlicher Unterschied zwischen den Ausführungen besteht dabei in der Ausführung und Richtung des Öffnungswinkels der Bohrung. Die Einteilung dieser Kategorien ist in Abbildung 2 dargestellt.

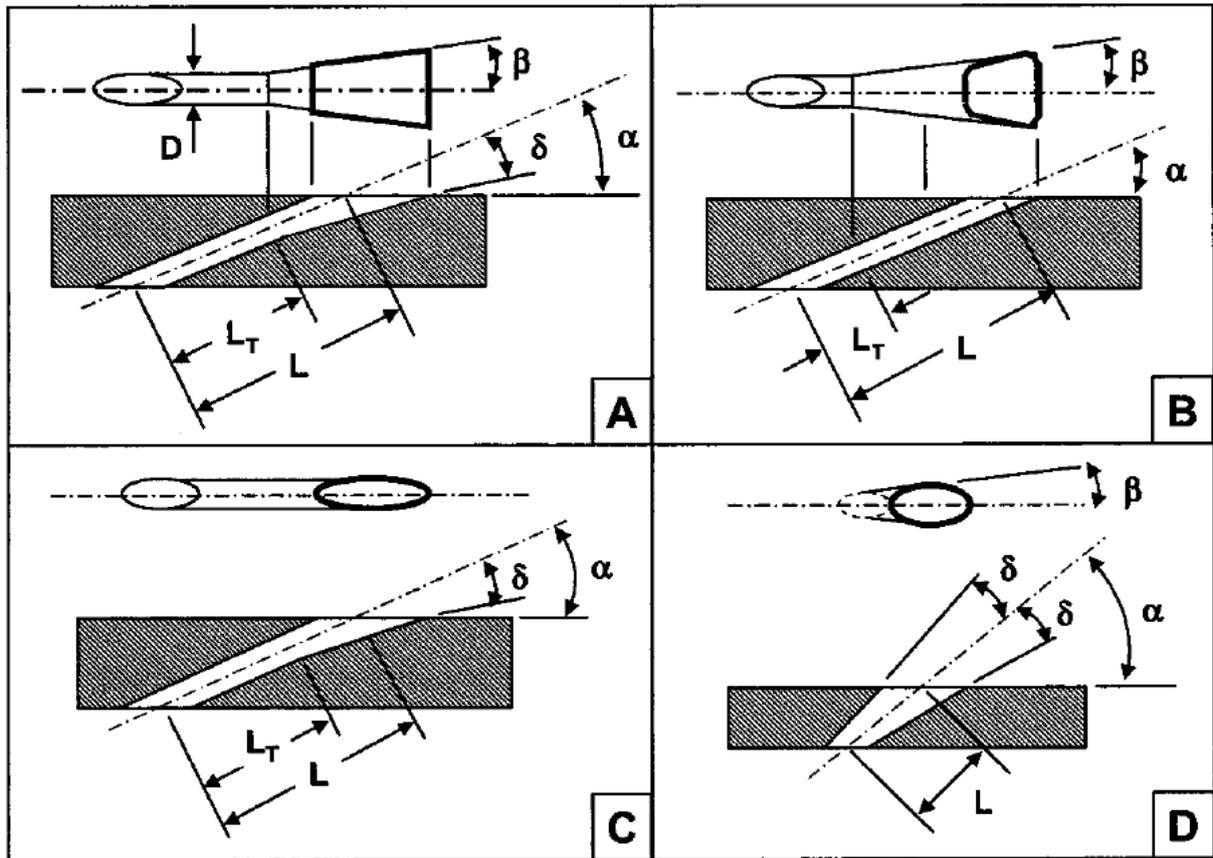


Abbildung 2 Formen von Kühlbohrungen zusammengestellt von [3]

Geometrie A repräsentiert eine klassische Kühlbohrung einer Filmkühlung. Bei dieser Konfiguration sind beide Formen der Lochexpansion vorhanden. Dies ist zum einen die „lateral expansion“, welche die Verbreiterung des Kühlkanals in radialer Richtung beschreibt und die „laidback expansion“, wodurch die Verbreiterung in die Schaufeloberfläche beschrieben wird. Im Folgenden wird die „lateral expansion“ als seitliche Erweiterung und „laidback expansion“ als rückgewinkelte Erweiterung bezeichnet. Die seitliche Erweiterung wird durch den Winkel  $\beta$  beschrieben. Die rückgewinkelte Erweiterung wird durch den Winkel  $\delta$  definiert. Beide Winkel werden ausgehend von der Mittelpunkttachse der ursprünglichen Bohrung gemessen. Als Variation von Geometrie A besitzt Geometrie B nur einen Winkel der seitlichen Expansion. Bei Geometrie C hingegen ist die Bohrung nur als rückgewinkelte Erweiterung ausgeführt. Geometrie D ist eine konische Bohrung, weswegen der Winkel von rückgewinkelter und seitlicher Erweiterung denselben Wert besitzen. Ein weiterer relevanter Parameter ist der „centerline angle“ oder Mittellinienwinkel  $\alpha$  der Bohrung. Dieser Winkel beschreibt den Austrittswinkel der Bohrung relativ zur Schaufeloberfläche. Um eine möglichst gute Kühlwirkung zu erzielen, muss dieser Winkel möglichst flach sein, um die Luft aus den Kühlbohrungen nah an der Oberfläche zu führen. Dem gegenüber steht die Problematik kleine Aussparungen mit flachen Winkeln auf der Schaufeloberfläche zu fertigen. Eine Zusammenfassung der nötigen Parameter für die Konstruktion einer Filmkühlung ist in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4 Parameter für die Konstruktion einer Filmkühlung auf einer Turbinenschaufel

| Nr. | Bezeichnung                       | FZ       | Minimal-Wert         | Maximal-Wert | Einheit    |
|-----|-----------------------------------|----------|----------------------|--------------|------------|
| 1   | Winkel rückgewinkelte Erweiterung | $\delta$ | 0                    | 15           | $^{\circ}$ |
| 2   | Winkel seitliche Erweiterung      | $\beta$  | 0                    | 15           | $^{\circ}$ |
| 3   | Mittellinienwinkel                | $\alpha$ | 30                   | 55           | $^{\circ}$ |
| 4   | Lochform                          | LF       | A-B                  | Bohrung      | —          |
| 5   | Mittellinienabstand               | $L_b$    | 10                   | 80           | %          |
| 6   | Basis Höhe/Durchmesser            | $h/d$    | Gestaltungsparameter |              | $mm$       |
| 7   | Zwischenlochabstand               | $a$      | Gestaltungsparameter |              | $mm$       |
| 8   | Kantenradius                      | $r$      | 0,5                  | 0,5          | $mm$       |
| 9   | Seitliche Bohrungserweiterung     | $b$      | Gestaltungsparameter |              | $mm$       |

In den ersten drei Zeilen von Tabelle 4 sind die drei bereits aus [3] bekannten Winkel aufgelistet. Die Grenzen für Minimal- und Maximalwert dieser Winkel ergeben sich aus der von [3] durchgeführten Literaturstudie. In der folgenden Zeile wird die Tabelle um den Parameter der Lochform erweitert. Die Formen der Bohrung für die Filmkühlung richten sich nach den vorher aufgeführten Fertigungsmöglichkeiten. In diesem Fall wird sich auf die Geometrien A und B beschränkt, um das Parameterfeld für die Integration möglichst gering zu halten. Der Parameter des Mittellinienabstandes  $L_b$  beschreibt die Position der Bohrung auf der Schaufel. Für die Positionierung wurde ein prozentualer Wert der Schaufelsehnenlänge angenommen. Als Gestaltungsparameter frei wählbar wurde der Bohrungsdurchmesser und Zwischenlochabstand definiert. Zusätzlich wurde ein Kantenradius der Kühlbohrungen von  $r = 0.5mm$  festgesetzt, um den Einfluss von fertigungsbedingten Rundungen zu berücksichtigen. In Abbildung 3 wird die Anwendung der in Tabelle 4 aufgeführten Parameter auf einer Turbinenschaufel dargestellt. Mit der in Abbildung 3 vorgenommenen Parametrisierung wird im nächsten Schritt eine Versuchsmatrix für die Bedingungen der Versuche und Fertigung der Schaufeln geschaffen.

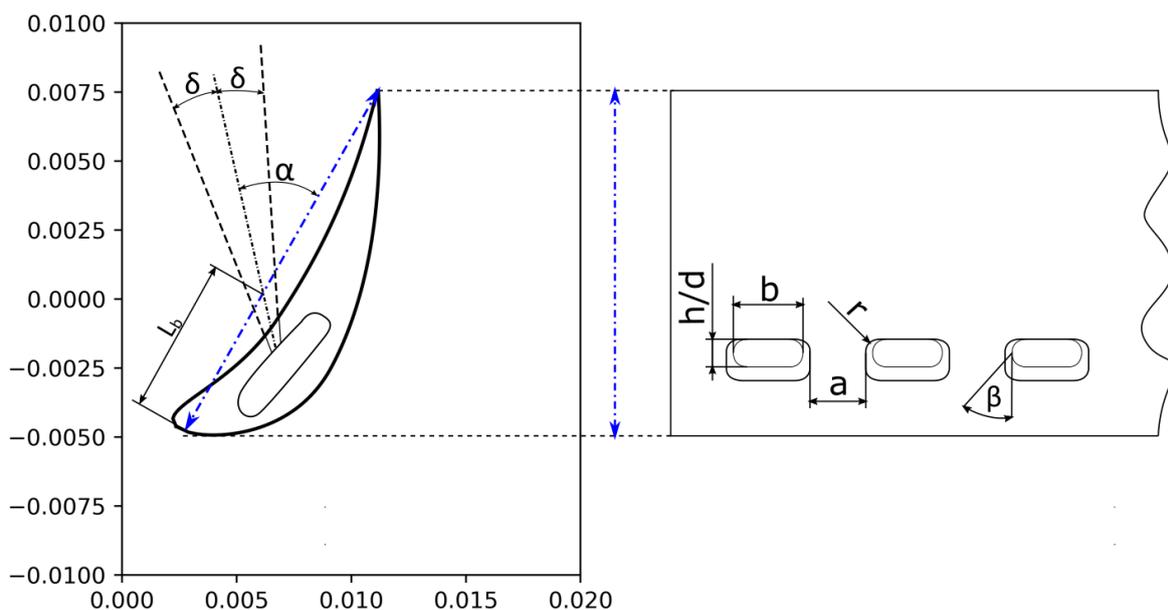


Abbildung 3 Parametrisierung der Kühlbohrungen auf der Turbinenschaufel

### 3.1.4 Erstellen einer Versuchsmatrix zur Überprüfung der Ablagerungstendenzen

Ziel der Versuchsmatrix ist es, Bedingung zu schaffen, die der Anwendung in der realen Kleingasturbine entsprechen. Dafür müssen zum einen repräsentative Turbinenschaufeln geschaffen werden, die in der Lage sind die Bedingungen in der realen Anwendung widerzuspiegeln. Zum anderen muss die Versuchsmatrix auch den thermodynamischen Bedingungen der realen Anwendung entsprechen. Beide Gesichtspunkte sollen einerseits in einer numerischen Strömungssimulation und einen realen Versuchsstand bezüglich des Partikelablagerungsverhaltens untersucht werden. Für das Erstellen der Versuchsmatrix wird zuerst auf die Definition der Bedingungen für die Gasparameter eingegangen. Die Werte für die Bedingungen der Gasströmung sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 Thermodynamische Parameter für den Versuchsstand

| Bezeichnung         | Minimalwert | Maximalwert | Einheit    |
|---------------------|-------------|-------------|------------|
| Temperatur Gas      | 600         | 900         | [°C]       |
| Geschwindigkeit Gas | 20,0        | 150,0       | [m/s]      |
| Druck Gas           | 0,0         | 0,0         | [bar, rel] |
| Impulsverhältnis    | 1,0         | 3,0         | [1]        |
| Temperatur Kühlluft | 20          | 300         | [°C]       |

Die erste Zeile in Tabelle 5 zeigt den Temperaturbereich der Gasströmung für die Durchführung der Simulationen und den Versuchen am Einzelversuchsstand. Als Ober- und Untergrenze für den Temperaturbereich wird die minimale und maximale Eintrittstemperatur des TCS angesetzt. Damit ist die Versuchstemperatur für das Gas in einem Bereich von  $T_{Gas} = 600 \text{ °C} - 900 \text{ °C}$  festgelegt. Gleichzeitig wird mit der Wahl identischer Gastemperaturen die Einhaltung der Analogie der Mach-Zahl zwischen Versuch und Realanwendung sichergestellt. Für die Gasgeschwindigkeit wird ein Wert von  $c_{Gas} = 20 \text{ m/s} - 150 \text{ m/s}$  vorgesehen. Die Wahl für die Untergrenze des Geschwindigkeitswerts liegt in der Reduzierung der nötigen Brennerleistung, um den Gasstrom zu erwärmen, begründet. Mit der Wahl der Obergrenze soll die Wirkung einer Filmkühlung auch bei hohen Geschwindigkeiten widerspiegelt werden. Weiter werden die Simulationen und Versuche unter atmosphärischen Bedingungen durchgeführt.

Für die Simulationen wird die Wahl des Impulsverhältnisses von Gas- zu Kühlluftströmung auf 1 gehalten, damit die beiden Strömungen immer bei einer ähnlichen Interaktion in den Kanal eingetragen werden. Für die späteren Versuche kann das Verhältnis auch bis auf 3 erhöht werden, um dessen Einfluss zu überprüfen. Als Wahl für die Kühllufttemperatur wird ein Bereich von  $T_{Kühlluft} = 293,15 \text{ K} - 573,15 \text{ K}$  ausgewählt. Mit diesem Temperaturbereich wird sowohl die Kühlwirkung bei normalen Umgebungsbedingungen, wie auch bei höheren Temperaturen wie z.B. nach einer Verdichtung, untersucht. Im nächsten Schritt wurden anhand der in Tabelle 2 bestimmten Ähnlichkeitskennzahlen die Testschaufeln für die Versuche des Einzelversuchsstandes erstellt. Eine Aufführung der Grundkonfigurationen der Testschaufeln ist in Abbildung 4 dargestellt.

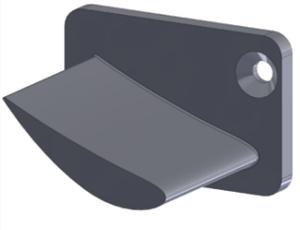
| Bezeichnung                 | Formelzeichen   |  |  |  | Einheit |
|-----------------------------|-----------------|---|--|---|---------|
| Strömungswinkel Vorderkante | $\alpha_0$      | 0   | 0  | 0   | °       |
| Strömungswinkel Hinterkante | $\alpha_1$      | 7,8   | 40,6   | 73,9  | °       |
| Schaufelhöhe                | $h$             | 0,05  | 0,05   | 0,05  | $m$     |
| Sehnenlänge                 | $l$             | 0,05  | 0,05   | 0,05  | $m$     |
| Wölbungsrücklage            | $\frac{x_f}{l}$ | 0,4   | 0,4  | 0,4   | 1       |
| Profildicke                 | $\frac{d}{l}$   | 0,2   | 0,2  | 0,2   | 1       |

Abbildung 4 Grundkonfigurationen der Turbinenschaufeln für die Durchführung der Versuche

Für den Anströmwinkel an der Vorderkante wurde immer ein Winkel von  $\alpha_0 = 0^\circ$  vorausgesetzt. Der Strömungswinkel an der Hinterkante richtet sich nach dem Grad der Umlenkung für die Untersuchung. Als Bereich wird der Umlenkwinkel  $\Delta\beta$  aus Tabelle 2 angesetzt. Da der Wert des Umlenkwinkels  $\Delta\beta = 7,8^\circ - 73,9^\circ$  einen großen Wertebereich umfasst, wird für die Untersuchung zusätzlich noch ein Zwischenwert von  $\Delta\beta = 40,6^\circ$  eingeführt. Die Sehnenlänge ergibt sich aus einer Reynolds-Analogie zu der realen Turbine. Dabei wurde mit einer Erhöhung der Sehnenlänge eine Reduzierung der nötigen Geschwindigkeit erreicht. Durch das Einhalten eines identischen Temperaturbereichs lässt sich auch eine identische Viskosität für die Berechnung der Reynolds-Zahl annehmen. Die Wölbungsrücklage liegt im Bereich der realen Gasturbinenanwendung. Für die Profildicke wurde der Wert von  $d/l = 0,1$  auf  $d/l = 0,2$  erhöht, da in die Schaufelprofile auch noch ein Verteilungskanal für die Kühlluft eingearbeitet werden musste. Da in der Realanwendung auch Verteilungskanäle eingearbeitet werden müssen, entspricht die gewählte Profildicke auch mehr den später erzeugten Schaufelprofilen im TCS. Mit den Grundkonfigurationen der Schaufelprofile wurden im nächsten Schritt Varianten einer Filmkühlung auf den Schaufeln integriert. Die Parameter der verschiedenen Konfigurationen ist in Tabelle 6 dargestellt. Bei der Gestaltung der Bohrungsausführung fanden 3 grundlegend verschiedene Ausführungen Anwendung. Mit den drei vorgesehenen Umlenkwinkeln  $\Delta\beta$  ergaben sich damit 9 unterschiedliche Schaufeln. Der erste Ansatz der Bohrungsgestaltung umfasst die Konfigurationen 1-3. Bei dieser Anwendung wurden auf der Schaufeloberfläche Langlöcher integriert. Bereits bei Vorversuchen zeigte diese Konfiguration ein besseres Anlegen der Strömung gegenüber normalen Bohrungen.

Tabelle 6 Parameter für die Integration der Filmkühlung auf den Schaufeln

| Parameter                 |                                   |                   |                 | Konfiguration 1 | Konfiguration 2 | Konfiguration 3 | Konfiguration 4 | Konfiguration 5 | Konfiguration 6 | Konfiguration 7 | Konfiguration 8 | Konfiguration 9 |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Nr.                       | Bezeichnung                       | FZ                | Einheit         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 0                         | Schaufelwinkel                    | $\Delta\beta$     | °               | 7,8             | 40,6            | 73,9            | 7,8             | 40,6            | 73,9            | 7,8             | 40,6            | 73,9            |
| 1                         | Winkel rückgewinkelte Erweiterung | $\delta$          | °               | 0,0             | 0,0             | 0,0             | 0,0             | 0,0             | 0,0             | 0,0             | 0,0             | 0,0             |
| 2                         | Winkel seitliche Erweiterung      | $\beta$           | °               | 0,0             | 0,0             | 0,0             | 15,0            | 15,0            | 15,0            | 15,0            | 15,0            | 15,0            |
| 3                         | Mittellinienwinkel                | $\alpha$          | °               | 30,0            | 30,0            | 30,0            | 30,0            | 30,0            | 30,0            | 30,0            | 30,0            | 30,0            |
| 4                         | Lochform                          | LF                | -               | LL              |
| 5                         | Mittellinienabstand               | $l_b$             | mm              | 14,5            | 14,5            | 14,5            | 14,5            | 14,5            | 14,5            | 14,5            | 14,5            | 14,5            |
| 6                         | Basis Höhe/Durchmesser            | d/h               | mm              | 1,25            | 1,25            | 1,25            | 1,25            | 1,25            | 1,25            | 1,25            | 1,25            | 1,25            |
| 7                         | Zwischenlochabstand               | a                 | mm              | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            |
| 8                         | Kantenradius                      | r                 | mm              | 0,5             | 0,5             | 0,5             | 0,4             | 0,25            | 0,25            | 0,4             | 0,25            | 0,25            |
| 9                         | Seitliche Bohrungsweiterung       | b                 | mm              | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            | 2,50            |
| 10                        | Durchmesser Frontalbohrung        | df                | mm              | -               | -               | -               | -               | -               | -               | 1,00            | 1,00            | 1,00            |
| Zusätzliche Vorgabegrößen |                                   |                   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| a                         | Anzahl Bohrungen                  | Anz               | 1               | 8               | 8               | 8               | 7               | 8               | 7               | 7               | 7               | 7               |
| b                         | Lochquerschnittsfläche            | A <sub>quer</sub> | mm <sup>2</sup> | 23,28           | 23,28           | 23,28           | 20,91           | 24,57           | 21,50           | 31,12           | 31,71           | 31,71           |
| c                         | Impulsverhältnis                  | J                 | 1               | 1,0             | 1,0             | 1,0             | 1,0             | 1,0             | 1,0             | 1,0             | 1,0             | 1,0             |
| d                         | Anzahl Frontbohrungen             | Anz               | 1               | -               | -               | -               | -               | -               | -               | 13              | 13              | 13              |

Als Mittellinienwinkel  $\alpha$  wurde der kleinste untersuchte Winkel aus [3] mit  $\alpha = 30^\circ$  verwendet. Für die Positionierung der Kühlbohrungen wurde einheitlich ein Abstand vom Start der Profelsehne von  $l_b = 14,5 \text{ mm}$  verwendet. Die erste Bohrungsgestaltung wurde komplett ohne Diffusionswinkel  $\delta$  und  $\beta$  ausgeführt. Weitere konkrete geometrische Ausformungen können Tabelle 6 entnommen und mit der Parametergestaltung aus Abbildung 3 abgeglichen werden. Der zweite Satz der Bohrungsgestaltung umfasst die Konfigurationen 4-6. Bei dieser Konfiguration wurde bei der Integration der Langlöcher zusätzlich ein seitlicher Diffusionswinkel  $\beta$  eingeführt. Auf einen rückgewinkelten Diffusionswinkel  $\delta$  wurde in diesem Zusammenhang verzichtet, da der Mittellinienwinkel  $\alpha$  für die Fertigung bereits sehr flach gewählt wurde und bei der Anwendung eines rückgewinkelten Diffusionswinkel der Bearbeitungswinkel noch flacher hätte ausfallen müssen. Aus Untersuchungen von [4,5] geht die Druckseite des Schaufelprofils als die kritische Seite für die Blockade durch Ablagerungen hervor, weswegen bei den Testschaufeln die Filmkühlung vorerst nur auf der Druckseite integriert wird. Zusätzlich stellt die Schaufelvorderkante eine weitere kritische Stelle auf dem Profil einer Turbinenschaufel hinsichtlich der Ablagerungsproblematik dar. Deswegen werden in der letzten Betrachtung von Konfiguration 7-9 noch Frontbohrungen an der Vorderkante der Turbinenschaufeln angebracht. Für die Fronbohrungen wurde ungefähr die doppelte Anzahl an Bohrungslochern im Gegensatz zu den Langlöchern gewählt. Damit befindet sich eine Frontalbohrung in der Symmetrieachse einer Kühlbohrung auf der Druckseite und eine in der Spiegelachse dazwischen. Zusätzlich wurden in Tabelle 6 für die Gestaltung der Filmkühlung möglichst viele Parameter dokumentiert, um eine Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Anwendung zu gewährleisten. Eine Beispielkontur für die Ausführung der Kühlbohrungen auf der Schaufeldruckseite und an der Schaufelvorderkante ist in Abbildung 5 dargestellt. Im nächsten Schritt wurden mit den Parametern der Filmkühlung neun Schaufelmodelle erstellt.

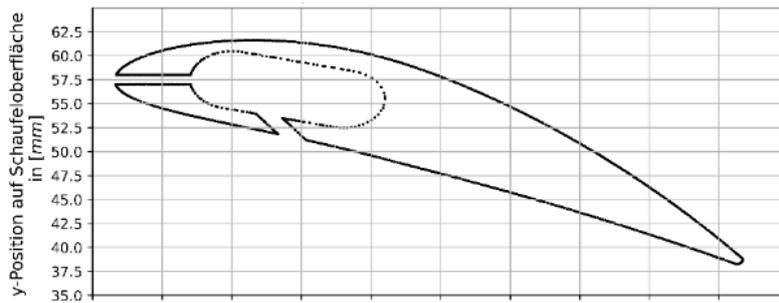


Abbildung 5 Beispielkontur für eine Schaufel mit Frontlöchern und Bohrungen druckseitig

### 3.1.5 Konstruktion von Turbinenschaufeln mit einer Filmkühlung

Im nächsten Schritt wurde auf den Grundkonfigurationen der Testschaufeln für die Ablagerungsuntersuchung die Kühlbohrungen aus Tabelle 6 konstruiert. Dafür war es im ersten Schritt notwendig, eine Aussparung für die Verteilung der Kühlluft in den Kanälen zu erzeugen. In Abbildung 6 sind die eingebrachten Verteilungskanäle in den Schaufeln dargestellt.

|                                     | Schaufelwinkel            |                            |                            |
|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                                     | $\Delta\beta = 7,8^\circ$ | $\Delta\beta = 40,6^\circ$ | $\Delta\beta = 73,9^\circ$ |
| <b>Grundkonfiguration</b>           |                           |                            |                            |
| <b>Bohrungsquerschnitt frontal</b>  |                           |                            |                            |
| <b>Bohrungsquerschnitt seitlich</b> |                           |                            |                            |

Abbildung 6 Darstellung der Integration der Kühlkanäle bei unterschiedlichen Umlenk winkeln der Testschaufeln

Die eingebrachten Kanäle befinden sich im vorderen Bereich der Testschaufeln. Damit lassen sich Kühlbohrungen im frontalen Bereich der Testschaufeln erzeugen, welche in der Lage sind, einen Schutzfilm im folgenden Bereich der Turbinenschaufel zu erzeugen. Ausgeführt sind die Kanäle als Langlöcher mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Länge von 14 mm. Bei der Einbringung der Zuführung wurde zusätzlich darauf geachtet, dass an jeder Stelle der Schaufel eine Wandstärke von mindestens 1 mm eingehalten wurde. Die Tiefe der Bohrung beträgt aus Fertigungsgründen 39,5 mm. Nach der Einbringung der Verteilungskanäle in die Grundkonfigurationen der Testschaufeln wurde im

nächsten Schritt eine Konstruktionsmethodik zur definierten Erzeugung der Kühlbohrungen auf der Turbinenschaufeloberfläche entwickelt. Zweck dieser vorgebenden Konstruktionsmethodik ist eine Vergleichbarkeit der Schaufelkonfigurationen untereinander zu schaffen. Gleichzeitig soll eine identische Fertigung der verschiedenen Schaufeln sichergestellt werden. Dafür muss bei allen Schaufelkonfigurationen dasselbe Vorgehen angewandt werden. In Abbildung 7 ist der grundsätzliche Aufbau zur Erzeugung der Kühlbohrungen zu sehen.

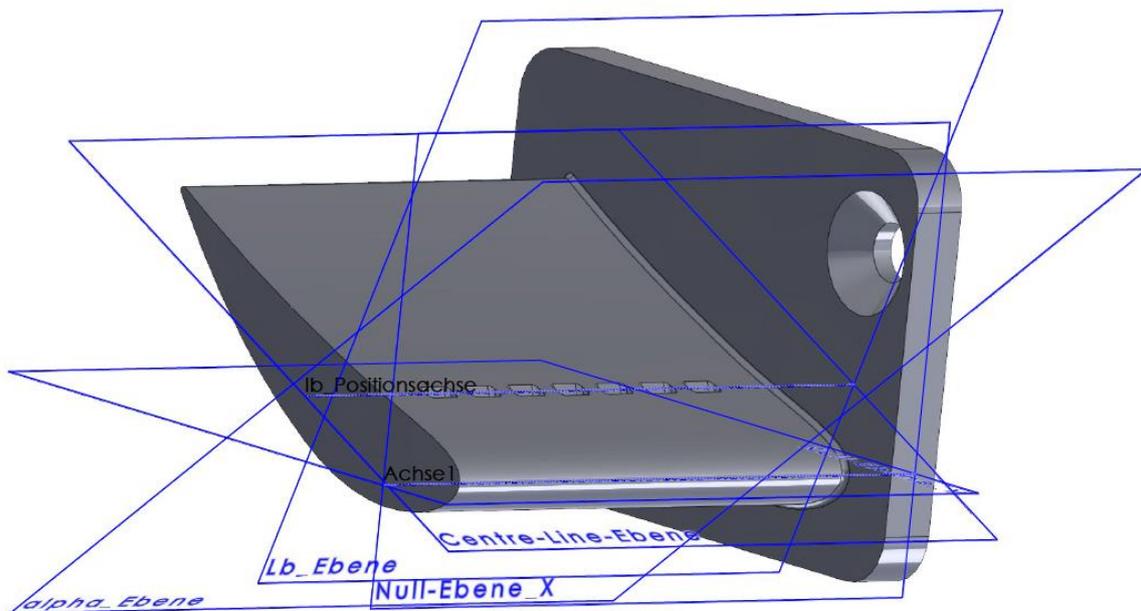


Abbildung 7 Methode zur Positionierung der Kühlkanäle auf den Testschaufeln für die Ablagerungsuntersuchungen

Ausgangspunkt für die Konstruktion ist die Null-Ebene in x- und y-Ebene (Für eine bessere Übersicht ist in Abbildung 7 nur die x-Ebene dargestellt). Schnittpunkt dieser beiden Ebenen stellt die Vorderkante der Testschaufel dar. Durch diesen Schnittpunkt wird unter Vorgabe des aus der Profilrechnung bestimmten Anstellwinkels die „Center-Line-Ebene“ erzeugt, welche auf der Profilschneide der Turbinenschaufel liegt. Senkrecht zur „Center-Line-Ebene“ und im Abstand zum Schnittpunkt der Null-Ebenen wird die „centerline-distance-Ebene“ oder „Lb-Ebene“ erzeugt, um die Position der Bohrungen vorzugeben. Im Schnittpunkt der „Center-Line-Ebene“ mit der „Lb-Ebene“ wird schließlich die „Alpha-Ebene“ mit dem „centerline angle“ erzeugt. Auf der Schnittachse der „Center-Line-Ebene“ mit der „Lb-Ebene“ werden dann schließlich im Winkel der „Alpha-Ebene“ die Kühlbohrungen konstruiert und auf der Turbinenschaufel erzeugt. Für die Konstruktion der Kühlbohrungen werden alle neun Konfigurationen aus Tabelle 6 angewandt. Die Konstruktion der Kühlbohrungen ist in Abbildung 8 dargestellt. In der ersten Spalte sind alle Konfigurationen mit einem Umlenkwinkel von  $\Delta\beta = 7,8^\circ$ , in der zweiten mit  $\Delta\beta = 40,6^\circ$  und in der dritten mit  $\Delta\beta = 73,9^\circ$  dargestellt. Zeile eins zeigt die Grundkonfigurationen der Schaufel. Mit der zweiten Zeile werden die Schaufeln mit Kühlbohrungen ohne Öffnungswinkel dargestellt. Bei der dritten Zeile wurden die Kühlbohrungen um einen seitlichen Öffnungswinkel von  $\beta = 15^\circ$  erweitert. In der vierten und letzten Zeile wurden die Ausführungen der Kühlbohrungen noch um Frontalbohrungen erweitert, wie es bei der Anwendung auf Turbinenschaufeln gängig ist. Ziel der letzten Konfiguration ist es, zusätzlich die Interaktion von den Frontbohrungen mit den auf der Druckseite befindlichen Kühlbohrungen zu überprüfen und die Eignung hinsichtlich Ablagerungsvermeidung zu untersuchen.

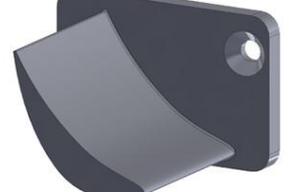
|                           | Schaufelwinkel  |  |   |
|---------------------------|---|--|---|
|                           | $\Delta\beta = 7,8^\circ$   | $\Delta\beta = 40,6^\circ$   | $\Delta\beta = 73,9^\circ$  |
| <b>Grundkonfiguration</b> |    |    |    |
| <b>Konfiguration 1-3</b>  |    |    |    |
| <b>Konfiguration 4-6</b>  |   |   |   |
| <b>Konfiguration 7-9</b>  |  |  |  |

Abbildung 8 Darstellung der Schaufelkonfigurationen mit Zuordnung der Winkelumlenkungen und Konfigurationsausführungen

In Abbildung 9 ist noch einmal ein Schnitt durch die Kühlluftzuführung und den Kühlbohrungen zusammen zu sehen. Gleichzeitig ist auch die Auswirkung des Öffnungswinkels auf den Turbinenschaufeln zu erkennen. Die Grundfläche der Bohrungen ist durch den Parametersatz an der Innenseite des Schaufelkanals definiert. Der Winkel im folgenden Verlauf sorgt für eine Erweiterung der Bohrung hin zur Oberfläche. Zweck dieser Gestaltung ist konstante Durchflussbedingungen an der Innenseite des Kanals zu schaffen und Einflüsse der Diffusion beim Durchströmen der Kühlkanäle mit erfassen zu können. Die erzeugten Schaufelkonstruktionen wurden im nächsten Schritt dazu genutzt, eine CFD-Simulation durchzuführen, um die Bohrungen hinsichtlich Kühlwirkung und Ablagerungsgesichtspunkten zu überprüfen. Weiter wurden die CAD-Modelle dazu genutzt, um Versuchsstücke für Realversuche zu fertigen.

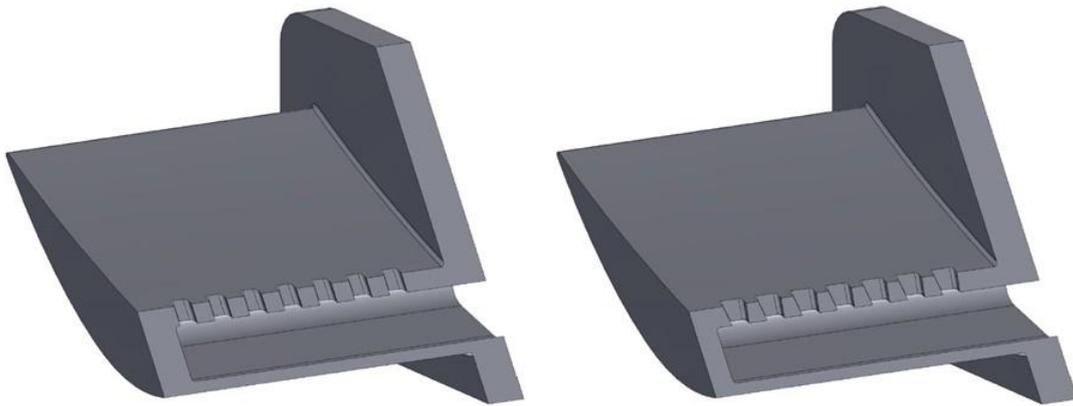


Abbildung 9 Darstellung der Kühlbohrungen mit einfachen Bohrungen (links) und Diffusionswinkel (rechts)

### 3.2 CFD-Studie zur Einflussanalyse einer Strömungsschutzschicht (AP1)

Mit der durchgeführten CFD-Studie soll der Einfluss verschiedener Kühlbohrungsgeometrien auf die Ausbildung einer Filmkühlungsgrenzschicht als Schutzmechanismus zur Partikelablagerung untersucht werden. Weiterer Aspekt der durchgeführten CFD-Studie war grundsätzliche Einflüsse festzustellen, um den Versuchsplan für die Ablagerungstests zu reduzieren. Für die Durchführung der numerischen Strömungssimulationen wurden die konstruierten Turbinenschaufeln mit Filmkühlung aus Abbildung 8 verwendet. Zur Erstellung des Parameterfelds, für die durchgeführte Studie, wurden die Werte in Tabelle 5 herangezogen. Ergebnis dieses Kapitels ist ein reduzierter Versuchsplan zur Durchführung der Ablagerungstests und eine erste Abschätzung der Schutzwirkung der Filmkühlung. Bewertungskriterium der Filmkühlungswirkung war die Oberflächentemperatur der Turbinenschaufel. Inhalt des Arbeitsabschnittes ist zuerst das Vorstellen der Simulationsumgebung und Aufzeigen des untersuchten Parameterfeldes. Als nächstes wird der Auswertungsablauf der Simulationen vorgestellt, um eine Nachvollziehbarkeit der Datenakquise zu gewähren. Für die Sicherstellung der physikalischen Korrektheit der Ergebnisse wurde eine Netzkonvergenz durchgeführt. Annahmen der Vernetzung und die Ergebnisse der Netzkonvergenz werden deshalb im Rahmen dieses Kapitels ebenfalls vorgestellt. Schließlich werden die grundlegenden Ergebnisse und Erkenntnisse der durchgeführten CFD-Studie vorgestellt. Im letzten Schritt wird eine Auswahl der Schaufelkonfigurationen und Gasparameter zur Durchführung der Ablagerungstest vorgenommen.

#### 3.2.1 Planung und Aufbau der Simulation zur Untersuchung der Grenzschicht

Ziel der durchgeführten Simulationen war es die Kühlwirkung von der Filmkühlung auf den entworfenen Schaufeln zu überprüfen. Für diesen Zweck wurden die Testschaufeln in eine Simulationsumgebung in Form eines Strömungskanals gesetzt, um die Ausbildung der Filmkühlung zu bewerten. Als Simulationsprogramm wurde Ansys CFX verwendet. Der Aufbau der Simulationen ist in Abbildung 10 dargestellt. Da im Versuchsplan drei verschiedene Umlenkwinkel ( $\Delta\beta = 7,8^\circ; 40,6^\circ; 73,9^\circ$ ) einer Turbinenschaufel zu untersuchen waren, wurden insgesamt drei verschiedene Simulationsaufbauten erstellt. Jeder Simulationsaufbau entspricht der Umlenkung der jeweiligen eingesetzten Schaufel. Um möglichst realistische Strömungsbedingungen auf den Schaufeln bei der Anwendung der Filmkühlung zu schaffen, wurden zusätzlich ober- und unterhalb der zu betrachtenden Schaufel zwei weitere Schaufeln positioniert. Der Abstand zwischen den Schaufeln beträgt jeweils ihre eigene Sehnenlänge  $l$ . Die Dicke des Strömungskanals richtet sich nach der Schaufelhöhe  $h$ . Der Abstand zwischen oberer und unterer Kanalwand und Schaufeln beträgt ebenfalls einmal ihre eigene Sehnenlänge  $l$ . Gemessen wurde der Abstand von der Position des Anstellwinkels der Schaufel. Als

Einlaufbereich wurde ein Vorlauf mit der Länge von 6 mal  $l$  konstruiert. Für den Nachlauf wurde eine Länge von 5  $l$  zugelassen. Um Kanaleinflüsse zu minimieren, wurden die Wände des Strömungskanal als reibungsfrei angenommen.

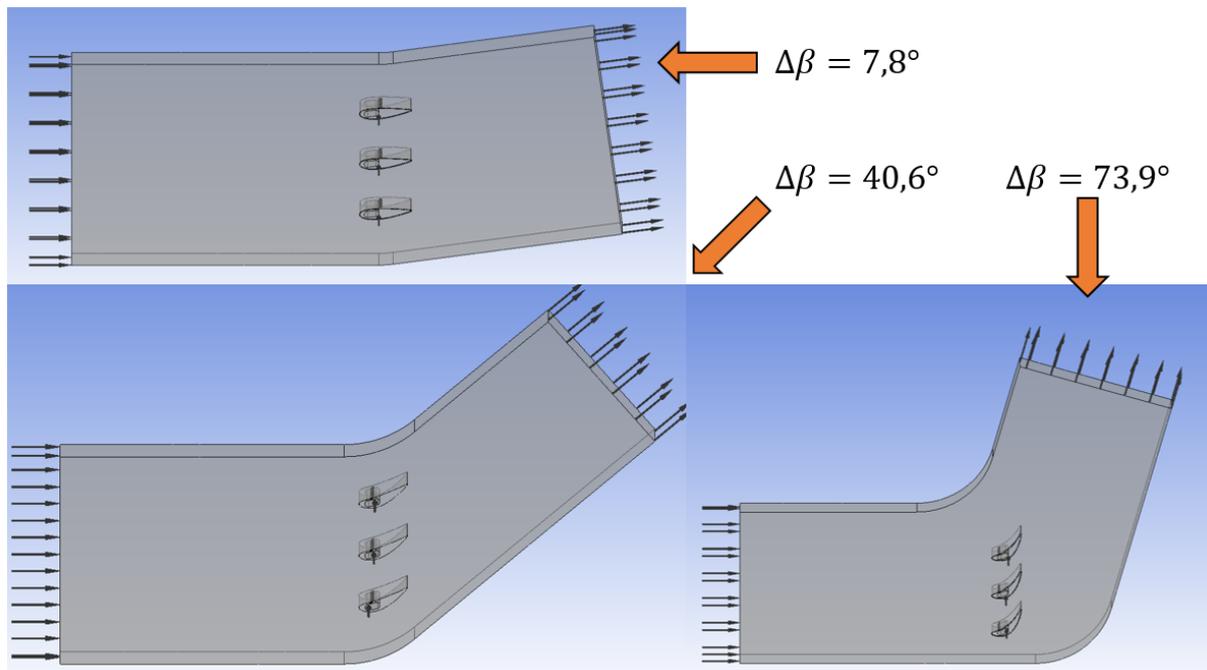


Abbildung 10 Simulationsaufbau zur Bewertung der Grenzschichtausbildung der Filmkühlung für unterschiedliche Umlenkwinkel der Schaufeln

Der Einlass ist als „velocity inlet“ und der Auslass als „pressure outlet“ unter atmosphärischen Bedingungen definiert. Die Kühlluft wird als „mass flow inlet“ in die Simulationsumgebung eingeführt. Nach der Definition der Simulationsumgebung wurde im nächsten Schritt der Versuchsplan für die Gasparameter der Simulationen erstellt. Die Parameter des Versuchsplans sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7 Parametersatz zur Durchführung der Simulationen zur Bewertung der Grenzschichtausbildung unter verschiedenen Strömungsbedingungen

| Beschreibung         | FZ        | Werte           | Einheit    |
|----------------------|-----------|-----------------|------------|
| Gastemperatur        | $T_{Gas}$ | [600, 750, 900] | [°C]       |
| Gasgeschwindigkeit   | $v_{Gas}$ | [20, 50, 150]   | [m/s]      |
| Temperatur Kühlluft  | $T_{KL}$  | [20, 150, 300]  | [°C]       |
| Impulsverhältnis     | $I$       | [1,0]           | [1]        |
| Druck Strömungskanal | $p_{Gas}$ | [0,0]           | [bar, rel] |

Die Parameter in Tabelle 7 richten sich hauptsächlich nach den Gasbedingungen des TCS aus Tabelle 5. Als Stützwert für die Durchführung der Simulation wurde für die Gastemperatur, Gasgeschwindigkeit und für die Temperatur der Kühlluft noch zusätzlich ein Stützwert eingeführt. Für die Gastemperatur und Kühllufttemperatur wurden dafür der Mittelwert des Parameterbereiches verwendet. Bei der Gasgeschwindigkeit wurde zusätzlich die Geschwindigkeit  $v_{Gas} = 50 \text{ m/s}$  in das Parameterfeld eingefügt, da diese die dominante Geschwindigkeit im Leitrad ist und ihr daher

besonderes Interesse gilt. Der für die Filmkühlung zugeführte Massenstrom richtet sich nach den Bedingungen der jeweils herrschenden Gasströmung. Als Vergleichs- und Berechnungsgröße wird hier die Kennzahl des Impulsverhältnisses  $I$  herangezogen. Das Impulsverhältnis beschreibt den Impuls von Kühlluftströmung zur umgebenden Gasströmung. Die Berechnungsformel für dieses Verhältnis ist in Formel (1) dargestellt.

$$I = \frac{\rho_{KL} \cdot v_{KL}^2}{\rho_{Gas} \cdot v_{Gas}^2} \quad (1)$$

Durch Umstellen dieser Formel lässt sich durch Vorgabe des Impulsverhältnisses die Austrittsgeschwindigkeit des Kühlluftstroms berechnen und folglich unter Kenntnis des Bohrungsquerschnittes der Kühlbohrung der benötigte Massenstrom über die Kontinuitätsgleichung. Wie in Tabelle 7 aufgeführt, wird für alle Simulationen das Impulsverhältnis bei einem konstanten Wert von  $I = 1$  gehalten. Der Druck  $p_{Gas}$  wird für alle Simulationen auf einem atmosphärischen Niveau gesetzt. Aus Tabelle 7 ergibt sich eine Summe von 27 Simulationspunkten. Zusätzlich werden 9 verschiedene Schaufelkonfigurationen betrachtet. Insgesamt ergibt sich daraus ein Gesamtaufwand von 243 durchgeführten Simulationen.

### 3.2.2 Vernetzung und Durchführung einer Netzkonvergenzstudie

Nachdem der Aufbau der Simulation und ein Versuchsplan erstellt wurde, ist im nächsten Schritt eine Netzkonvergenzstudie durchgeführt worden, um die Korrektheit der Simulationsergebnisse sicherzustellen. Als Referenz für die Durchführung der Netzkonvergenzstudie wurde der Versuchspunkt  $T_{Gas} = 600 \text{ °C}$ ;  $v_{Gas} = 50 \text{ m/s}$ ;  $T_{KL} = 20 \text{ °C}$  und die Schaufelkonfiguration V002 gewählt. Die überprüften Konfigurationen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 Parametereinstellung für die durchgeführte Netzkonvergenzstudie der Einzelschaufelsimulationen

| Nr.     | Standardelementgröße | Elementgröße Schaufel | Dicke Prismenschicht | Dicke erste Prismenschicht | Elementzahl | Zeit für 1000 | Iterationen zur Temperaturkonvergenz | Durchschnittstemperatur Schaufeloberfläche |
|---------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|-------------|---------------|--------------------------------------|--|
| 1       | 20,0                 | 2,00                  | 5,0                  | -                          | 1,28E+06    | 5,95          | 50                                   | 517,6                                      |
| 2       | 10,0                 | 1,00                  | 5,0                  | -                          | 2,40E+06    | 11,33         | 175                                  | 523,8                                      |
| 3       | 5,0                  | 0,50                  | 5,0                  | -                          | 4,08E+06    | 25,31         | 170                                  | 538,9                                      |
| 4       | 2,5                  | 0,25                  | 5,0                  | -                          | 8,74E+06    | 44,78         | 210                                  | 542,1                                      |
| 5       | 20,0                 | 0,25                  | 5,0                  | -                          | 3,90E+06    | 24,37         | 320                                  | 550,5                                      |
| 6       | 5,0                  | 0,15                  | 5,0                  | -                          | 1,05E+07    | 56,08         | 1000                                 | 542,4                                      |
| 7       | 3,0                  | 0,10                  | 5,0                  | -                          | 2,01E+07    | 116,75        | 250                                  | 544,8                                      |
| 8       | 7,0                  | 0,20                  | -                    | 0,05                       | 8,74E+06    | 6,01          | 200                                  | 548,5                                      |
| 9       | 14,0                 | 0,40                  | -                    | 0,05                       | 3,68E+06    | 2,42          | 160                                  | 552,0                                      |
| 10      | 3,5                  | 0,10                  | -                    | 0,05                       | 2,29E+07    | 21,30         | 180                                  | 552,0                                      |
| Einheit | [mm]                 | [mm]                  | [mm]                 | [mm]                       | [1]         | [h]           | [1]                                  | [°C]                                       |

In der ersten Spalte befindet sich die Standardelementgröße für die Simulationsumgebung. Die zweite Spalte beinhaltet die verfeinerte Elementgröße auf der Oberfläche der Schaufel. Die Verfeinerung auf der Oberfläche der Schaufeln wurde vorgenommen, da hier die größte Veränderung von Strömungsbedingungen erwartet wird. Dritte und vierte Spalte beinhalten die Einstellungen zur Erzeugung der Prismenschicht auf der Oberfläche der Schaufel. Die Prismenschicht auf den Schaufeln dienen zur verbesserten Simulation der dort entstehenden Grenzschicht. Um einen Vergleich zwischen den verschiedenen Netzeinstellungen herzustellen, wird die Elementzahl der Vernetzung auf der Abszisse aufgetragen. Für den Vergleich der Simulationsdauer wird die Zeit für die Berechnung von 1000 Iterationen, die durchschnittliche Oberflächentemperatur auf der Schaufel und die Anzahl der Iterationen zur Erreichung einer Temperaturkonvergenz herangezogen. Um eine Auswahl für die Vernetzung zu treffen, wird im ersten Schritt der Verlauf der durchschnittlichen Oberflächentemperatur über die Anzahl der Netzelemente betrachtet. Die Darstellung der Ergebnisse ist im Diagramm von Abbildung 11 gezeigt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, nähert sich die durchschnittliche Temperatur einem ungefähren Wert von  $T_{Oberfläche} = 547\text{ °C}$  an. Dieses Verhalten ist ab einer Elementzahl von ungefähr  $5 \cdot 10^6$  zu verzeichnen. In diesem Bereich scheinen vor allem die Vernetzungseinstellungen von Punkt 8 interessant zu sein, da hier die verbesserte Grenzschichtannahme zur Einhaltung eines  $y_+ < 5$  vorliegt.

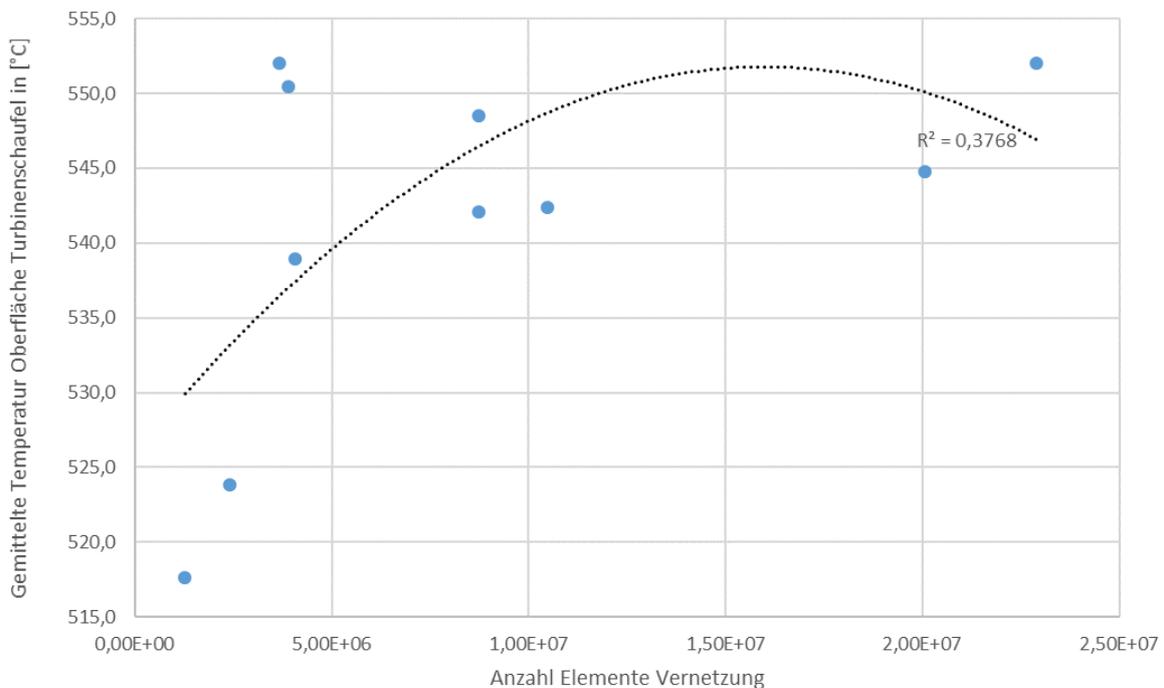


Abbildung 11 Darstellung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur aus der Netzkonvergenz zur Auswahl der Vernetzung

Gleichzeitig wird in Abbildung 12 die Berechnungsdauer für 1000 Iterationen über die Anzahl der Elemente aus der Vernetzung dargestellt. Hier ist, wie zu erwarten, eine exponentiell steigende Simulationsdauer mit steigender Anzahl der Elemente zu beobachten. Gleichzeitig ist aber mit der Anpassung der Einstellung der Prismenschichten (Punkte 8,9,10) eine Reduktion der Simulationszeit gegenüber der vorherigen Einstellung zu verzeichnen. Rückführen lässt sich dieses Verhalten auf eine verbesserte Lösbarkeit gegebener physikalischer Bedingungen. Insgesamt scheint auch bei der Betrachtung der Rechenzeit der Vernetzungszustand von 8 einen idealen Punkt darzustellen.

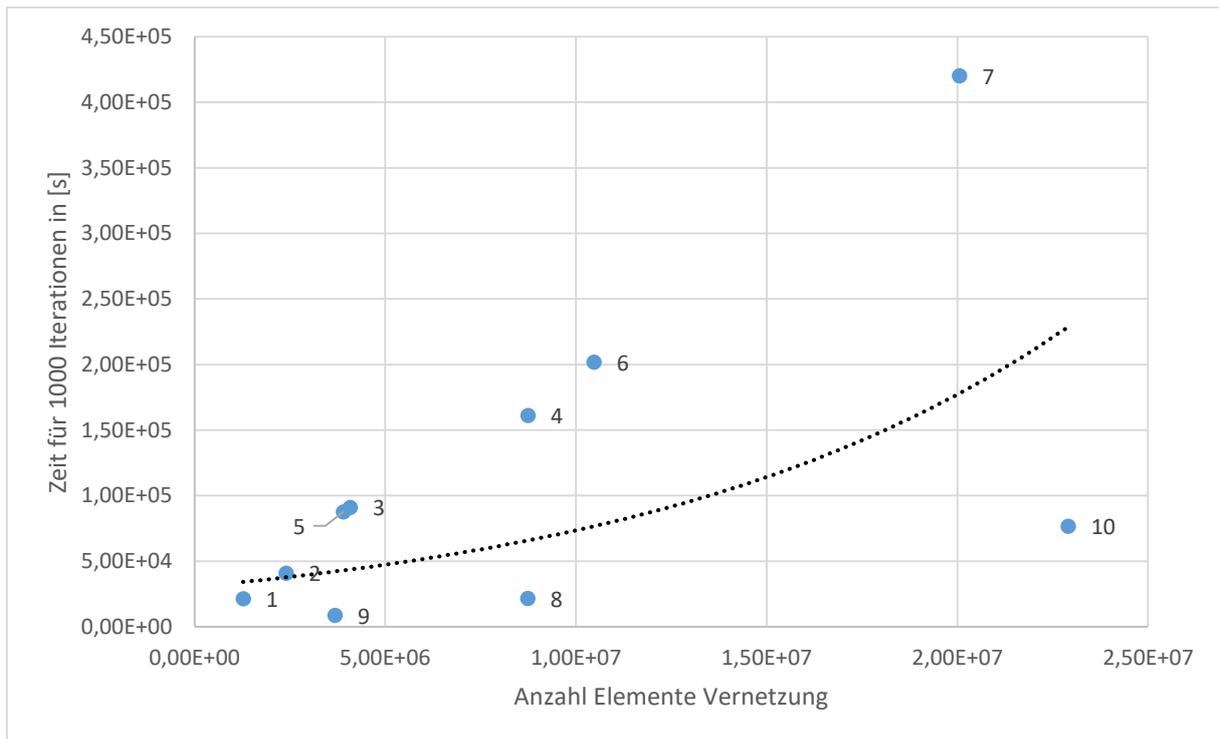


Abbildung 12 Berechnungszeit von 1000 Iterationsschritten für unterschiedliche Netzelemente

Zuletzt werden verschiedene ausgewählte Vernetzungszustände visuell gegenübergestellt. Die Darstellung dieser Zustände ist in Abbildung 13 zu sehen. In der Abbildung ist in der Reihenfolge 2, 8, 3 und 4 eine zunehmende Verfeinerung des Netzes dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass Vernetzungszustand 8 zwar insgesamt ein gröberes Netz im Vergleich zu 3 bzw. 4 darstellt, aber durch die bessere Auflösung im Bereich der Schaufeln bessere Ergebnisse erzielen lässt und damit für die Durchführungen der Simulationen am besten geeignet ist. Für die Durchführungen der Simulationen wird daher der Vernetzungszustand von 8 gewählt.

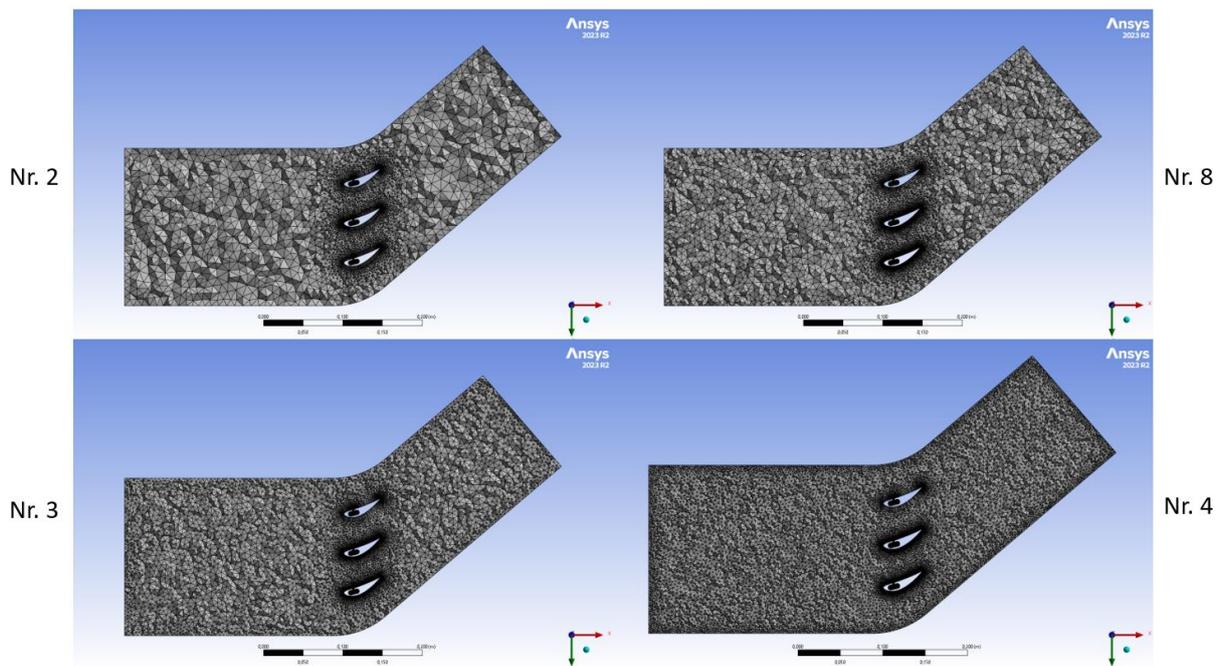


Abbildung 13 Darstellung ausgewählter Vernetzungseinstellungen zur Veranschaulichung der Auswirkung der Netzeinstellungen

### 3.2.3 Auswertungsaufbau der Simulationen

Ziel des Vorhabens war es eine Filmkühlung zum Schutz vor Partikelablagerungen auf den Turbinenschaufeln des TCS zu integrieren. Um die Ausbildung des Filmkühlung potentieller Konfigurationen zu bewerten wurden in einem ersten Schritt numerische Strömungssimulationen für den Versuchsplan aus 3.2.1 erstellt. Für die Bewertung der Schutzwirkung von der Filmkühlung wurde bei der Auswertung die Oberflächentemperatur betrachtet. Die Betrachtung der Oberflächentemperatur diene bei der Bewertung als Analogie zur Ausbildung der Strömungsschutzschicht durch die Filmkühlung. In Abbildung 14 sind Ergebnisse für identische Versuchspunkte aber unterschiedlichen Schaufelkonfigurationen abgebildet.

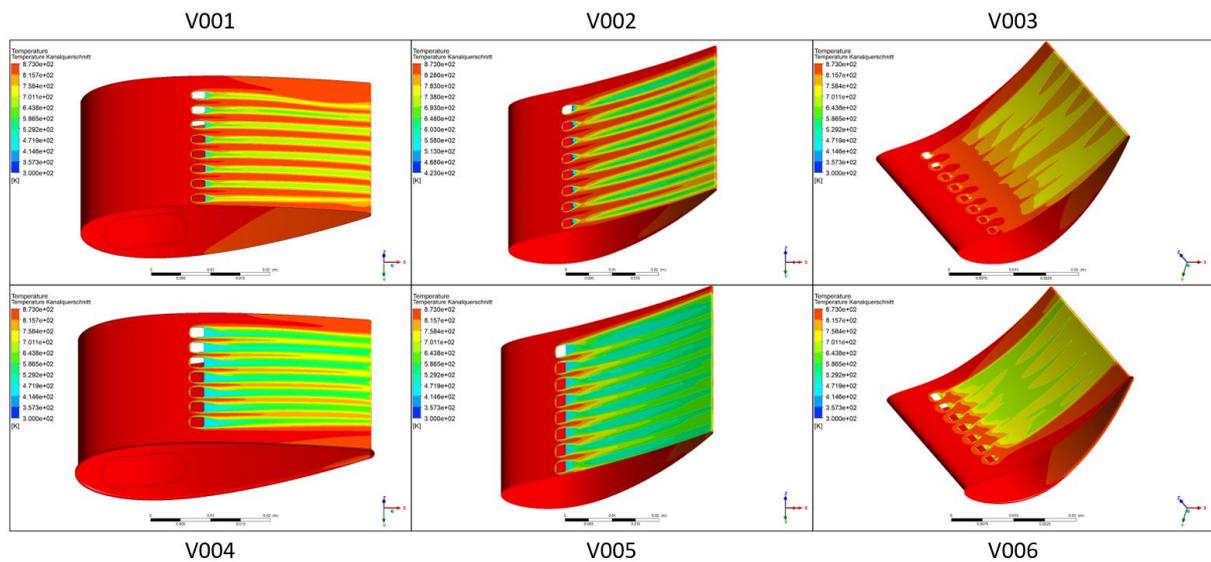


Abbildung 14 Simulationsergebnisse ausgewählter Schaufelkonfigurationen für den Simulationenpunkt  $T_{Gas} = 873K$ ;  $v_{Gas} = 20m/s$ ;  $T_{KL} = 293K$

Wie in Abbildung 14 zu sehen ist, bildet sich im Zentrum der Kühlbohrungen aller Konfigurationen die dominanteste Kühlwirkung aus. Die Intensität der Kühlwirkung unterscheidet sich jedoch bei den unterschiedlichen Schaufelversionen. Zwischen den Kühlbohrungen lassen sich je nach Schaufelversion unterschiedlich große Temperatursenkungen bezogen auf die Kühllufttemperatur beobachten. Auch zeigen Schaufelkonfigurationen mit einem großen Umlenkwinkel  $\Delta\beta$  ein schlechteres Anlegen des Kühlfilms. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Kühlbohrungen auf einer Schaufelkonfiguration lässt sich ebenfalls eine Abweichung des periodischen Temperaturverlaufs entlang der Schaufelhöhe feststellen. Die Stärke dieser Schwankung variiert je nach Schaufelkonfiguration. Insgesamt ist eine rein visuelle Bewertung nur schwer durchzuführen. Durch das Betrachten lässt sich zwar eine grobe Abschätzung der Funktionalität vornehmen, eine klare Einordnung fällt damit allerdings schwer. Für diesen Zweck wurden in der Auswertung der Simulationen Konturen auf der Schaufeloberfläche erzeugt, um die Temperatur auf der Turbinenschaufel auszulesen. Die Schnittkonturen folgen dem Schaufelprofil und lassen so eine Auswertung des Temperaturverlaufes entlang der Gasströmung zu. Die erzeugten Konturen sind in Abbildung 15 dargestellt. Bei der Erstellung der Schnittkonturen wurde abwechselnd ein Schnitt im Zentrum einer Kühlbohrung und zwischen zwei Kühlbohrungen gezogen. Insgesamt wurden bis zu 15 Schnittebenen auf eine Schaufel aufgebracht, wobei 8 dieser Schnitte im Zentrum einer Bohrung und 7 zwischen zwei Bohrungen sind. Ziel dieser Anordnung war eine getrennte Betrachtung zwischen Kühlfilmbildung direkt hinter einer Bohrung und im Bereich zwischen zwei Bohrungen. Zusätzlich lassen sich durch die Betrachtung mehrerer Bohrungen Rückschlüsse auf Konsistenz des ausgebildeten Kühlfilms folgern.

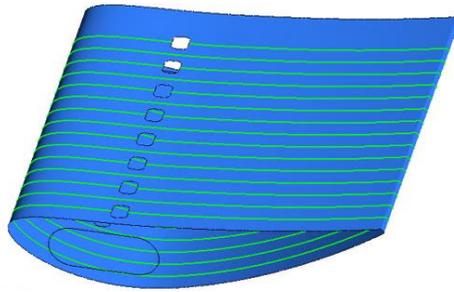


Abbildung 15 Schnittebenen für die Aufnahme der Temperaturverläufe auf der Oberfläche der Turbinenschaufel

Eine erste Auswertung dieser Schaufelschnitte für einen ausgewählten Untersuchungspunkt und Schaufelkonfiguration ist in Abbildung 16 dargestellt. Im oberen Abschnitt von Abbildung 16 ist noch einmal die Schaufelkontur der simulierten Turbinenschaufel dargestellt. Zweck dieser Darstellung ist das Aufzeigen von der Positionierung der Kühlbohrung. Darunter befindet sich der Temperaturverlauf von Schaufelkonfiguration V002. Der Temperaturverlauf im Zentrum einer Bohrung wird in der Abbildung mit roten Punkten dargestellt. Der Verlauf zwischen zwei Kühlbohrungen wird hingegen mit einem violetten Verlauf dargestellt. Um Zusätzlich eine bessere Einschätzung der Kühlwirkung vornehmen zu können, ist der Verlauf der Gasttemperatur mit einer orange gestrichelten und der Kühllufttemperatur mit einer blau gestrichelten Linie dargestellt. Die aus der Simulation entnommenen Temperaturen werden entlang der x-Koordinate des Schaufelprofils dargestellt. Unter der Darstellung von V002 in Abbildung 16 befindet sich die Auswertung von Schaufel V005 im identischen Untersuchungspunkt. Durch die direkte Gegenüberstellung der Verläufe lassen sich verbessert Rückschlüsse auf die Wirkung der Filmkühlung ziehen. So lässt sich bei Konfiguration V005 eine gleichmäßigere und stärkere Kühlwirkung sowohl im Zentrum als auch zwischen den Bohrungen gegenüber V002 feststellen.

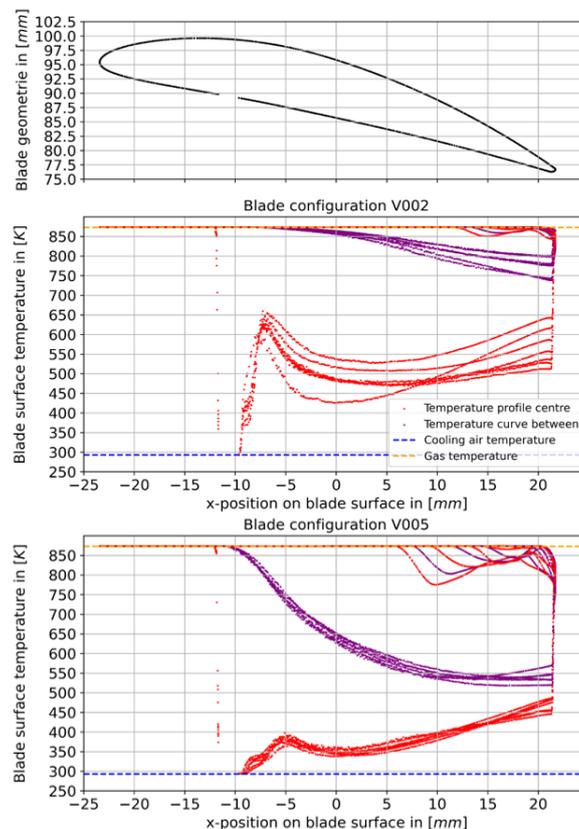


Abbildung 16 Beispielhafter Vergleich zwischen den Schaufelkonfigurationen V002 und V005 im Betriebspunkt  $T_{Gas} = 873K$ ;  $v_{Gas} = 20m/s$ ;  $T_{KL} = 293K$

### 3.2.4 Auswertung und Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Erkenntnisse aus den Simulationsstudien aufgeführt und gegenübergestellt. Dafür werden verschiedene Schaufelkonfigurationen mit Bezug auf einen Parameter aus dem Versuchsplan betrachtet. Parameter, die für diese Betrachtung gegenübergestellt werden, sind die Gasgeschwindigkeit, Gastemperatur, Kühllufttemperatur und verschiedene Ausführungen der Bohrungsgeometrie. Aspekte, auf welche während der Auswertung geachtet wird, sind die erreichbaren Kühlwirkungsgrade und die Gleichmäßigkeit des Kühlfilms auf der Turbinenschaufeloberfläche. In Abbildung 17 wird zuerst der Einfluss verschiedener Geschwindigkeiten auf die Ausbildung des Kühlfilms gegenüber gestellt. Dafür werden die Ergebnisse der Schaufeln V004, V005 und V006 mit der Ausführung einer gefächerten Kühlbohrung ohne Frontalbohrungen aufgeführt. Parameter, die während der Betrachtung konstant gehalten wurden, sind die Gastemperatur  $T_{Gas} = 873 \text{ K}$  und die Kühllufttemperatur  $T_{KL} = 293 \text{ K}$ .

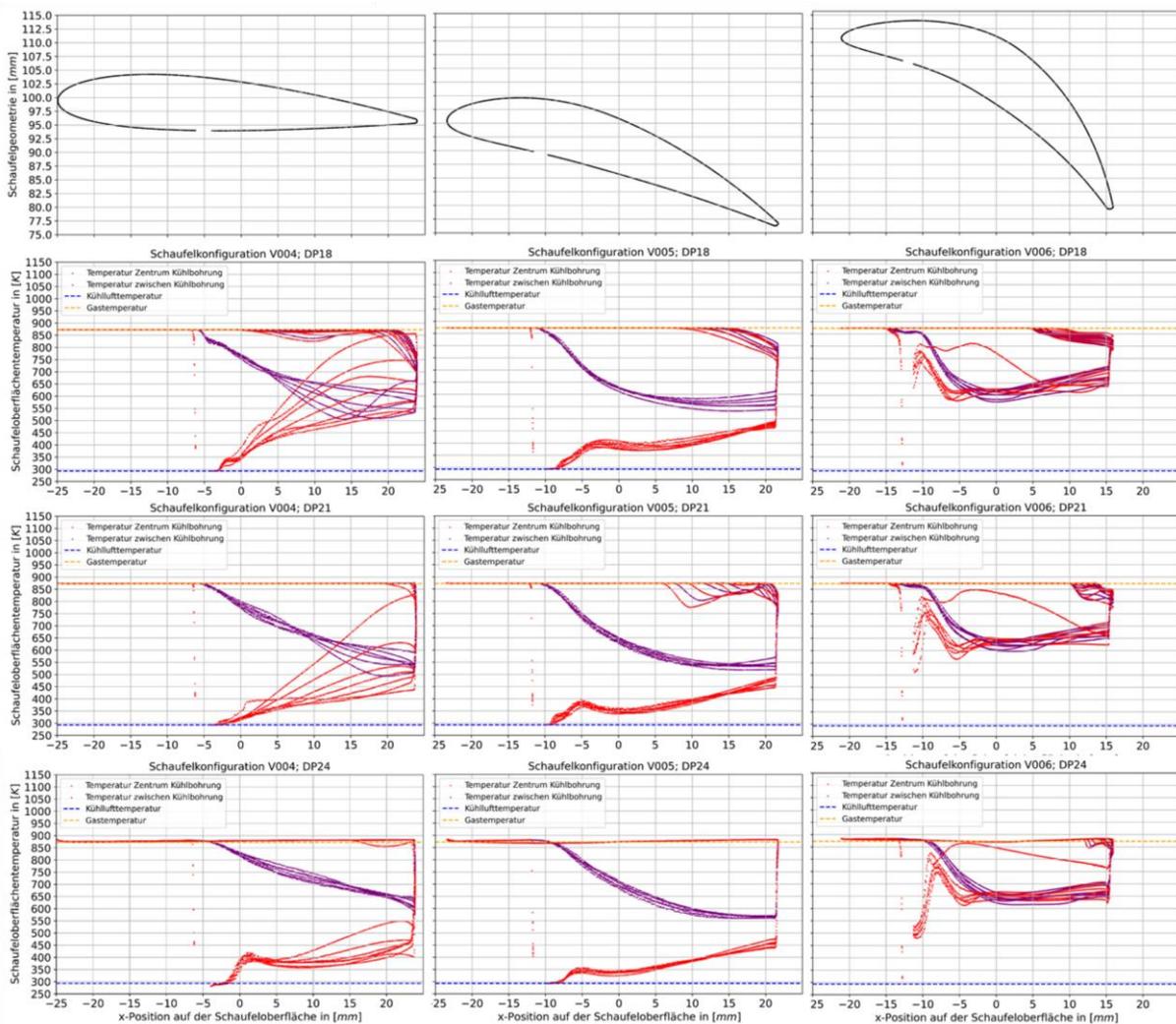


Abbildung 17 Visualisierung des Geschwindigkeitseinflusses bei der Durchführung der Simulationen bei konstanten Parametern  $T_{Gas} = 873 \text{ K}$ ;  $T_{KL} = 293 \text{ K}$  und variablen Parametern in Zeile 1,2,3 mit  $v_{Gas} = 20 \text{ m/s}$ ,  $50 \text{ m/s}$  und  $150 \text{ m/s}$

Zeile 1 von Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse für eine Gasgeschwindigkeit von  $v_{Gas} = 20 \text{ m/s}$ , Zeile 2 für  $v_{Gas} = 50 \text{ m/s}$  und Zeile 3 für  $v_{Gas} = 150 \text{ m/s}$ . Bei der Betrachtung von Abbildung 17 fällt sofort auf, dass die Ausführung der mittleren Schaufel V005 den am besten ausgebildeten Schutzfilm zeigt. Die Temperaturverläufe im Zentrum und zwischen den Kühlbohrungen zeigen jeweils einen sehr homogenen Verlauf, wobei der Verlauf im Zentrum, wie zu erwarten, die höchste Wirkung zeigt. Im Kontrast zu V005 zeigt der Verlauf von Ausführung V004 einen sehr volatilen Verlauf der Temperatur.

Bei identischen Einstellungen ist demnach bei der Reduktion des Umlenk winkels  $\Delta\beta$  von V005 auf V004 eine Verschlechterung der Homogenität des Kühlfilms zu verzeichnen. Insgesamt ist zwischen beiden Konfigurationen eine ähnliche Kühlwirkung zu erkennen, mit einer leicht schlechteren Tendenz zu V004, da hier der Kühlfilm weniger homogen ist. Im Gegensatz zu V004 und V005 bilden sich bei V006 nur sehr hohe Kühltemperaturen aus, was auf einen wenig ausgebildeten Schutzfilm hindeutet. Die Verläufe sind zwar relativ homogen und es gibt kaum einen Unterschied zwischen im Zentrum der Bohrungen und dazwischen verlaufender Temperaturkonturen, jedoch sind die Kühlwirkungsgrade immer sehr niedrig. Betrachtet man nun den Einfluss der Temperaturen von oben nach unten in Abbildung 17 ist mit Erhöhung der Geschwindigkeit eine Erhöhung des Kühlwirkungsgrades zu verzeichnen. Die Erhöhung des Wirkungsgrades fällt allerdings selbst bei signifikanter Erhöhung der Geschwindigkeit marginal aus. Vergleicht man den Wirkungsgradverlauf von V005; DP18 mit V005 DP24 erhöht sich der Wirkungsgrad an der Hinterkante im Zentrum der Kühlbohrungen von  $\eta_{FK} = 0,677$  auf  $\eta_{FK} = 0,712$ . Ein ähnliches Verhalten ist ebenfalls bei Konfiguration V004 zu verzeichnen. Zusätzlich ist bei diesem flachen Profil mit Erhöhung der Geschwindigkeit eine Reduktion der Streuung des Temperaturverlaufs festzustellen. Am Austritt im Zentrum besitzen alle Konfigurationen von V004 und V005 einen Kühlwirkungsgrad von  $\eta_{FK} = 1,000$ , da sich bei diesen Konfigurationen der Kühlfilm gut an die Schaufeloberfläche anlegt und damit die Oberflächentemperatur gleich der Kühllufttemperatur ist. Insgesamt ist ein geringer Einfluss der der Gasgeschwindigkeit auf die Ausbildung des Kühlfilms bei konstantem Impulsverhältnis  $I$  zu verzeichnen.

Nach der Betrachtung des Einflusses der Gasgeschwindigkeit wird im nächsten Schritt der Einfluss der Gastemperatur auf die Ausbildung des Schutzfilms betrachtet. Die Gegenüberstellung für die Einflussanalyse der Gasparameter ist in Abbildung 18 dargestellt. Wie auch in Abbildung 17 wird in Spalte 1 V004, Spalte 2 V005 und Spalte 3 V006 aufgeführt. In Zeile 1 der Diagramme sind die Ergebnisse für eine Gastemperatur von  $T_{Gas} = 873 K$ , in Zeile 2 für  $T_{Gas} = 1023 K$  und Zeile 3 für  $T_{Gas} = 1173 K$  dargestellt. Der grundsätzliche Charakter der Temperaturverläufe in Abbildung 18 ist ähnlich zu denen in Abbildung 17. Am Austritt der Kühlluft von Konfiguration V004 und V005 ist wieder aufgrund des Anlegens der Strömung ein Kühlwirkungsgrad von  $\eta_{KW} = 1$  und zwischen den Kühlbohrungen von  $\eta_{KW} = 0$  zu verzeichnen. Der Verlauf von V004 und V005 ist dabei auch wieder sehr ähnlich, mit dem Unterschied, dass die Steuerung von V004 jetzt noch mehr verstärkt auftritt. An der Hinterkante von V005; DP21 erreicht der Kühlwirkungsgrad im Zentrum der Kühlbohrung ungefähr einen Wert von  $\eta_{KW} = 0,712$ , bei V005; DP22 einen Wert von  $\eta_{KW} = 0,730$  und bei V005; DP23 einen Wert von  $\eta_{KW} = 0,742$ . Zwischen den Kühlbohrungen erreicht der Kühlwirkungsgrad an der Hinterkante der Schaufel in V005; DP21 ungefähr einen Wert von  $\eta_{KW} = 0,557$ , bei V005; DP22 einen Wert von  $\eta_{KW} = 0,579$  und bei V005; DP23  $\eta_{KW} = 0,594$ . Ähnliches Verhalten lässt sich auch bei V006 beobachten, wo DP21 einen ungefähren Kühlwirkungsgrad von  $\eta_{KW} = 0,384$ , DP22  $\eta_{KW} = 0,415$  und DP23 von  $\eta_{KW} = 0,447$  annimmt. Mit einer steigenden Gastemperatur ist demnach auch eine leichte Erhöhung des Kühlwirkungsgrades zu verzeichnen. Dieses Verhalten ist auf die Erhöhung der Differenz zwischen den auftretenden Temperaturen zurückzuführen, da immer von einem Bezugswert der Kühltemperatur von  $T_{KL} = 293 K$  ausgegangen wird. Eine Veränderung des Strömungsmusters ist nicht zu verzeichnen. Der Einfluss der Gastemperatur auf die Ausbildung der Strömungsschutzschicht ist damit als gering bis nicht vorhanden einzustufen.

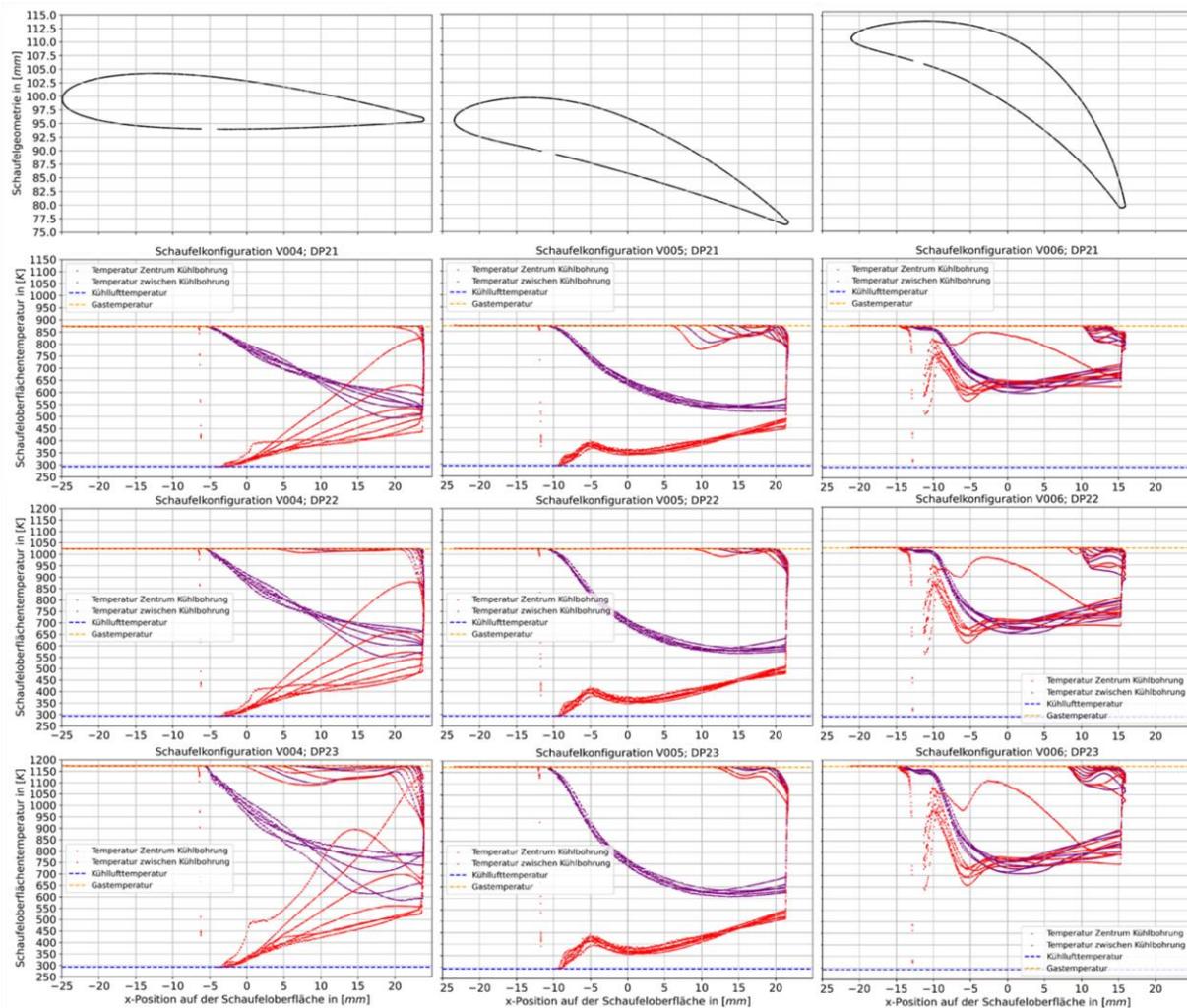


Abbildung 18 Visualisierung des Gasttemperatureinflusses bei der Durchführung der Simulationen bei konstanten Parametern  $v_{Gas} = 50\text{m/s}$ ;  $T_{KL} = 293\text{K}$  und variablen Parametern in Zeile 1,2,3 mit  $T_{Gas} = 873\text{K}$ ,  $1023\text{K}$  und  $1173\text{K}$

Als letzte Fluideinflussgröße wird der Einfluss der Kühllufttemperatur auf die Ausbildung des Kühlfilms betrachtet. Die Darstellung des Einflusses der Kühllufttemperatur ist in Abbildung 19 gezeigt. In Zeile 1 der Graphen werden die Ergebnisse für eine Kühllufttemperatur von  $T_{KL} = 293\text{K}$  gezeigt, Zeile 2 beinhaltet die Ergebnisse mit  $T_{KL} = 423\text{K}$  und Zeile 3 mit  $T_{KL} = 573\text{K}$ . Auch bei der Betrachtung der Ergebnisse sind über die generelle Schutzfilmbildung identische Aussagen wie in Abbildung 17 und Abbildung 18 zu treffen. Die Ergebnisse für den Kühlwirkungsgrad sind identisch zum dem was in der ersten Zeile von Abbildung 18 beschrieben wurde. Mit der Steigerung der Kühllufttemperatur auf  $T_{KL} = 423\text{K}$  ist bei V005 eine Steigerung des Kühlfilmwirkungsgrades auf  $\eta_{KW} = 0,718$  im Zentrum einer Bohrung und  $\eta_{KW} = 0,607$  zwischen zwei Bohrungen zu verzeichnen. Bei weiterer Steigerung der Kühllufttemperatur sinkt der Kühlwirkungsgrad allerdings wieder auf  $\eta_{KW} = 0,676$  im Zentrum einer Bohrung und  $\eta_{KW} = 0,576$  zwischen zwei Bohrungen ab. Identisches Verhalten ist auch bei V006 mit unterschiedlichen Kühllufttemperaturen zu beobachten. Folglich ist bei Veränderung der Kühllufttemperatur der Kühlfilmwirkungsgrad annähernd konstant und die Oberflächentemperatur der Schaufel verändert sich entsprechend der Einstellung der Kühlfilmtemperatur. Für die Ausbildung eines Schutzfilms ist die Kühlfilmtemperatur demnach nicht relevant. Im Hinblick auf die Haftbedingungen könnte die Filmkühltemperatur eine Rolle spielen, um Flüssigkeitsbrücken oder thermophoretische Kräfte auszubilden.

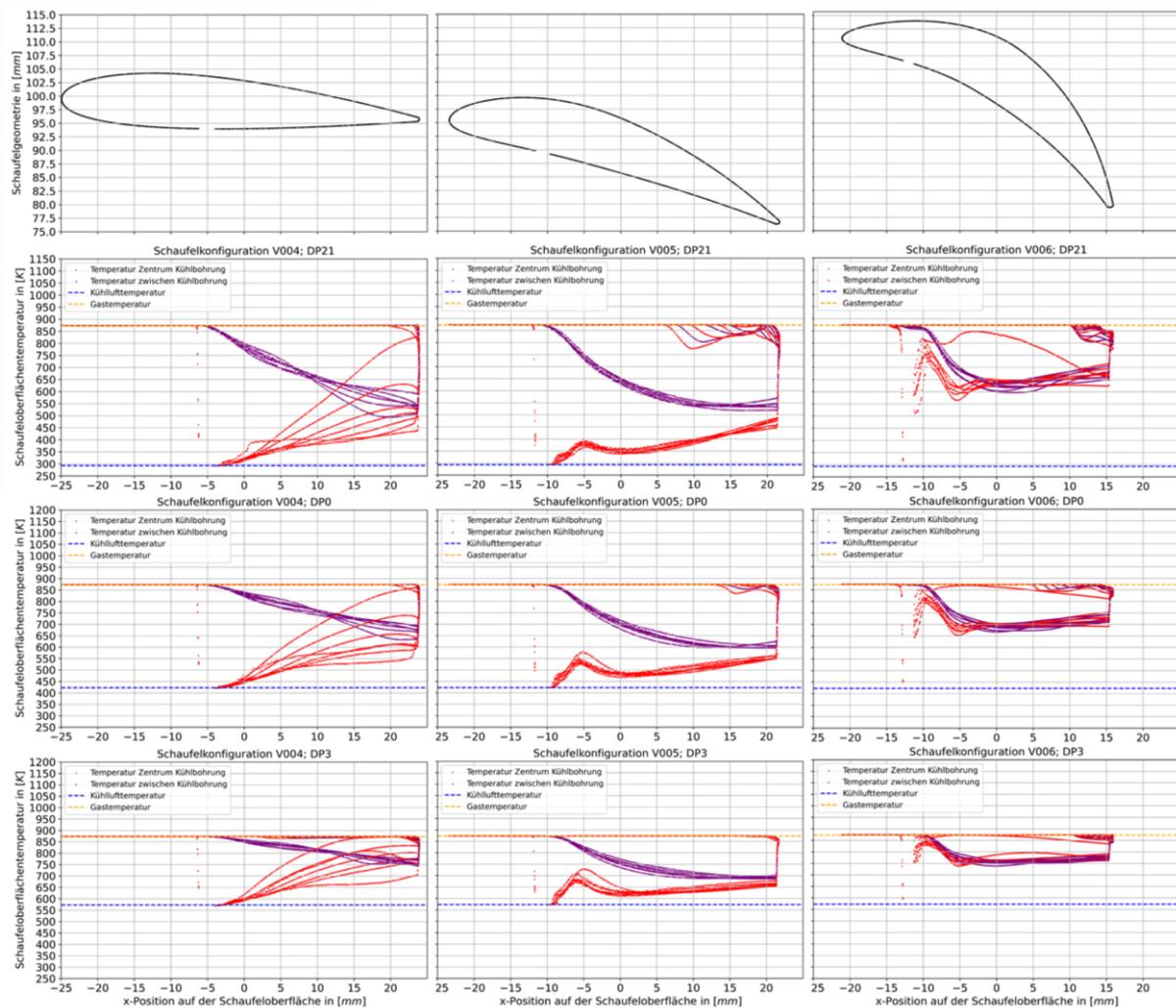


Abbildung 19 Visualisierung des Kühllufttemperatureinflusses bei der Durchführung der Simulationen bei konstanten Parametern  $v_{Gas} = 50 \text{ m/s}$ ;  $T_{Gas} = 873\text{K}$  und variablen Parametern in Zeile 1,2,3 mit  $T_{KL} = 293 \text{ K}$ ,  $423 \text{ K}$  und  $573 \text{ K}$

Mit Abbildung 20 werden zuletzt die Einflüsse der verschiedenen Geometrieparameter aus Abbildung 8 aufgeführt. In Spalte 1 von Abbildung 20 befinden sich die Konfigurationen mit einem Umlenkwinkel  $\Delta\beta = 7,8^\circ$ , Spalte 2 beinhaltet Variationen mit  $\Delta\beta = 40,6^\circ$  und Spalte 3 mit  $\Delta\beta = 73,9^\circ$ . Zeile 1 von Abbildung 20 zeigt Konfigurationen mit gerader Kühlfilmbohrung, Zeile 2 mit gefächerter Bohrung und Zeile 3 mit gefächerter Bohrung zusammen mit frontalen Kühlfilmbohrungen. Die konkrete Gestaltung der Schaufeln ist in Kapitel 3.1 zu finden. Nachdem bereits die Einflüsse verschiedener Gasparameter wie Gasgeschwindigkeit, Gasttemperatur und Kühllufttemperatur evaluiert wurden, beschränkt sich diese Betrachtung auf einen Untersuchungspunkt der Simulationen. Als Parameter für die Simulationen wurde der Punkt mit den Gasparametern  $v_{Gas} = 50 \text{ m/s}$ ,  $T_{Gas} = 873 \text{ K}$  und mit  $T_{KL} = 293 \text{ K}$  gewählt. Beim Vergleich der ersten Reihe fällt sofort auf, dass die Verläufe von V001 und V002 fast identisch sind. Im Zentrum der Kühlbohrungen werden hier Kühlwirkungsgrade von  $\eta_{KW} = 0,609 - 0,643$  erreicht. Im Vergleich dazu ist die Ausbildung des Kühlfilms zwischen den Bohrungen nur sehr gering. Hier werden nur Kühlwirkungsgrade von etwa  $\eta_{KW} = 0,160$  erreicht. Insgesamt weisen beide Konfigurationen auch eine geringe Streuung der Temperaturverteilung auf. Bei der Ausführung V003 mit einem Umlenkwinkel von  $\Delta\beta = 73,9$  und geraden Bohrungen hingegen ist nur eine schlechte Ausbildung des Kühlfilms zu beobachten. Bei dieser Ausführung wurde ein maximaler Kühlwirkungsgrad von  $\eta_{KW} = 0,264$  erreicht, dafür ist der Wirkungsgrad über die Druckseite sehr identisch. Rückführen lässt sich dieser schlechte Kühlwirkungsgrad auf die relativ steile Bohrungsachse in Bezug auf die Schaufeloberfläche und der damit schlecht anliegende Schutzfilm. Zeile 2 von

Abbildung 20 zeigt Konfigurationen mit gefächerten Kühlbohrungen. Durch die gefächerten Bohrungen wurde eine Verbesserung der Ausbreitung des Kühlfilms erreicht, weswegen bei diesen Konfigurationen auch eine signifikant niedrigere Temperatur im Bereich zwischen zwei Kühlbohrungen zu verzeichnen ist. Zusätzlich ist auch eine Verbesserung des Kühlwirkungsgrades insgesamt zu vermerken. Bei Konfiguration V004 liegt der Filmkühlungswirkungsgrad im Zentrum der Bohrungen bei  $\eta_{KW} = 0,695$  und zwischen den Bohrungen bei ungefähr  $\eta_{KW} = 0,557$ . Mit Konfiguration V005 ist sogar noch eine größere Steigerung zu bemerken. Hier stiegen die Wirkungsgrade im Zentrum der Bohrung auf  $\eta_{KW} = 0,725$  und zwischen zwei Bohrungen auf  $\eta_{KW} = 0,557$  an. Negativ zu bemerken ist allerdings, dass mit der Integration der gefächerten Bohrung auch die Steuerung beim flachen Profil von V004 gestiegen ist. Auch bei der Ausführung V006 mit einer gefächerten Bohrung ist eine Steigerung des Filmkühlungswirkungsgrades auf  $\eta_{KW} = 0,384$  zu verzeichnen. Trotzdem ist der Filmkühlungswirkungsgrad im Vergleich zu den Konfigurationen von V004 und V005 noch gering. In der letzten Zeile von Abbildung 20 sind die Konfigurationen mit gefächerten Kühlbohrungen auf der Druckseite der Schaufel mit zusätzlichen Frontalbohrungen dargestellt. Für alle Konfigurationen (V007, V008 und V009) ist mit der Integration der Frontalbohrungen eine Reduktion der Oberflächentemperatur in diesen Bereich zu vermerken. Bei V007 stellt sich im vorderen Bereich ein Filmkühlungswirkungsgrad von bis zu  $\eta_{KW} = 0,384$ , bei V008  $\eta_{KW} = 0,471$  und bei V009  $\eta_{KW} = 0,298$  ein.

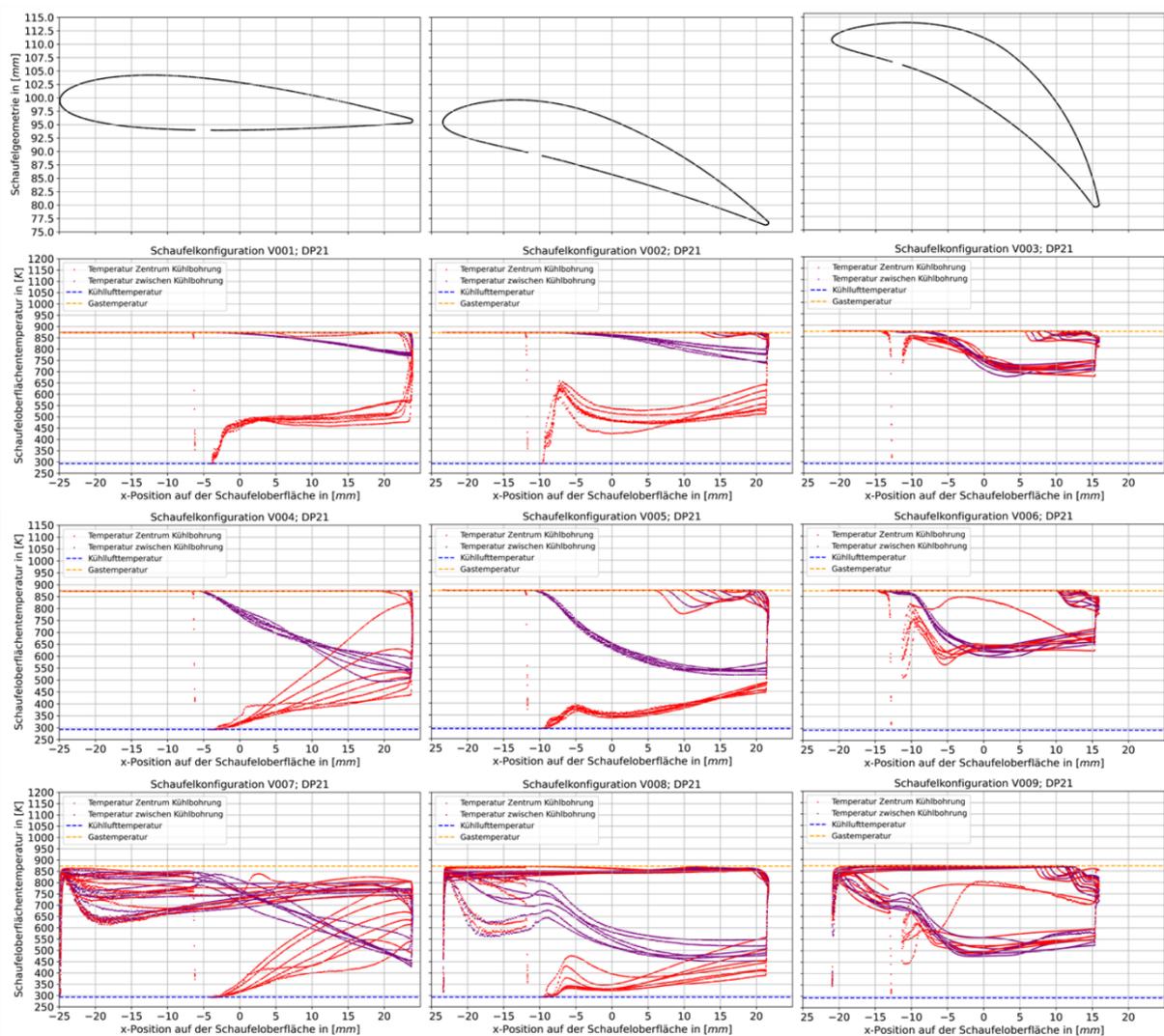


Abbildung 20 Visualisierung des Geometrieinflusses aus Abbildung 8 bei der Durchführung der Simulationen bei konstanten Parametern  $v_{Gas} = 50 \text{ m/s}$ ;  $T_{Gas} = 873 \text{ K}$  und mit  $T_{KL} = 293 \text{ K}$

Insgesamt ist aber der Schwankungsbereich bei den Konfigurationen V007, V008 und V009 sehr hoch. Auch beim Vergleich des Bereiches nach den Kühlbohrungen auf der Druckseite ist mit den zusätzlichen Frontalbohrungen eine verstärkte Varianz der Oberflächentemperatur zu beobachten. Diese Varianz ist auf eine verstärkte Durchmischung von Kühlfilmströmung und Gasströmung zurückzuführen und folglich wird vermutlich der Partikeltransport zur Oberfläche begünstigt. Auch wenn die Konfigurationen V007, V008 und V009 im Vergleich zu V004, V005 und V006 ähnliche Kühlwirkungsgrade aufweisen, ist durch die verstärkte Durchmischung voraussichtlich ein schlechterer Schutz vor Partikelablagerung gegeben.

### 3.2.5 Auswahl der Testschaufel für die Durchführung von Ablagerungsversuchen

Nach der Betrachtung der Kühlfilmbildung und der Bewertung der generellen Wirkung aus den CFD-Simulationen wird im nächsten Schritt die Auswahl der Testschaufel und der Versuchspunkte für die Versuche vorgenommen. Aus der Betrachtung in 3.2.4 geht hervor, dass Gastemperatur und Gasgeschwindigkeit nur einen geringen Einfluss auf die Ausbildung des Schutzfilms besitzen. Gleichzeitig spielt auch die Temperatur der Kühlluft einen geringen Einfluss auf die Ausbildung des Schutzfilms. Zwar zeigen die Gastemperatur und Kühllufttemperatur einen hohen Einfluss auf die Oberflächentemperatur, diese ist allerdings nur relevant für das isolierte Phänomen der Partikelhaftung und im Kontext der Bewertung des Schutzfilms nicht relevant. Um die Versuche möglichst einfach und reproduzierbar zu halten, wird deswegen für die Versuche die Gastemperatur auf  $T_{Gas} = 873\text{ K}$ , die Gasgeschwindigkeit auf  $v_{Gas} = 10\text{ m/s}$  und die Kühllufttemperatur auf  $T_{KL} = 293\text{ K}$  festgelegt. Bei der Analyse der verschiedenen Schaufelkonfigurationen zeigte sich vor allem die Variante V005 als vielversprechend. Durch die gefächerten Bohrungen auf der Druckseite wird der Schutzfilm gleichmäßig und in beruhigten Zustand auf die Oberfläche der Schaufel geführt. In diesem Zustand wird die bestmögliche Trennung zwischen partikelbeladener Gastströmung und schützender Filmkühlungsschicht vorgenommen. Als Kernpunkt für die Untersuchungen am Einzelschaufelversuchsstand wird deswegen die Schaufelkonfiguration von V005 herangezogen. Um die Einflüsse der verschiedenen Bohrungsausführungen ebenfalls untersuchen zu können, werden zusätzlich noch V002 und V008 mit in den Versuchsplan aufgenommen. Die Wahl der vorgesehenen Konfigurationen ist noch einmal in Abbildung 21 dargestellt.

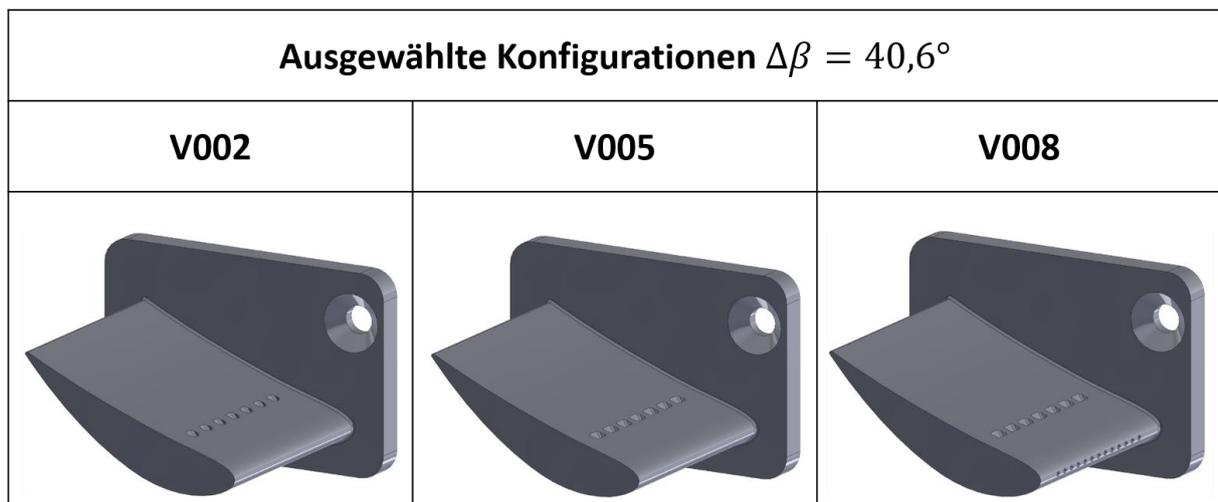


Abbildung 21 Schaufelkonfigurationen die für die Durchführung der Versuche gefertigt wurden

### 3.3 Entwicklung eines Versuchstandes und Fertigung von Testschaufeln (AP3)

Im vorherigen Kapitel wurde eine Bewertung des Kühlfilms für verschiedene Schaufelkonfigurationen anhand von Oberflächentemperaturen aus einer Reihe von CFD-Simulationen vorgenommen. Um den Versuchsplan zu reduzieren, wurde eine Eingrenzung des Versuchsplans für die Versuche an realen Schaufeln durchgeführt. Das Bewertungskriterium der Schaufeloberflächentemperatur entsprach dabei einer ersten Annahme für die Bewertung der Ausbildung des Kühlfilms. Um diese Annahme unter realen Partikelbedingungen zu überprüfen wird in diesem Kapitel ein Versuchsstand für die Einzelschaufel konzipiert. Zusätzlich werden in diesem Kapitel die Fertigungsbedingungen der Testschaufeln aufgeführt.

#### 3.3.1 Konzipierung des Versuchsstandes zur Untersuchung an einer Einzelschaufel

Erster Schritt für die Errichtung des Versuchsstandes ist die Erstellung eines Konzeptes, um die Bedingungen in der späteren Anwendung des TCS nachzustellen. Die Anforderung an den Versuchsstand waren die in Kapitel 3.2.5 aufgeführte Gasgeschwindigkeit, Gastemperatur und Kühlluftbedingungen im Testbereich der Schaufel. Zusätzlich sollte der Gasstrom einen Partikelgehalt beinhalten, welcher die späteren Bedingungen in der realen Anwendung nachempfendet. Um den Anforderungen im Testbereich gerecht zu werden, wurde das Konzept in Abbildung 22 erarbeitet.

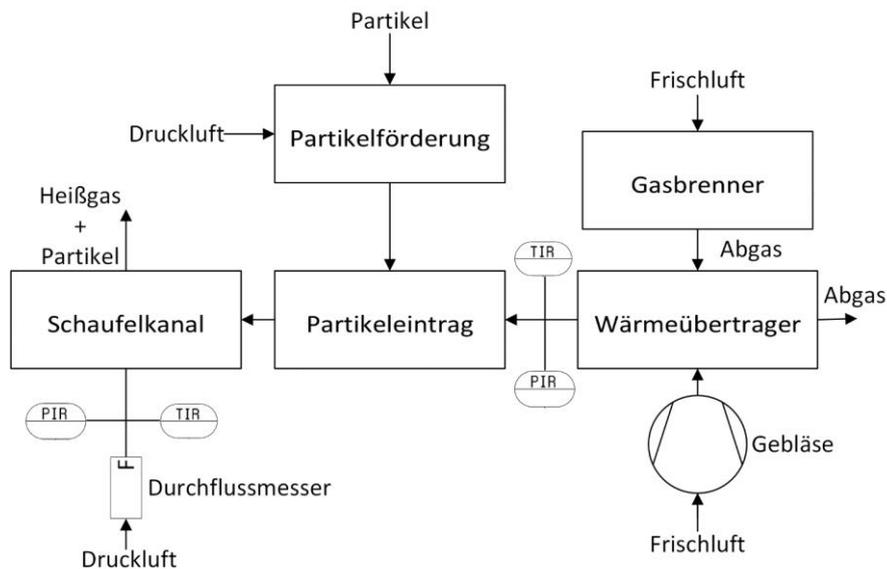


Abbildung 22 Konzept des Versuchsstandes zur Durchführung der Versuche an der Einzelschaufel

In diesem Konzept wird zuerst Frischluft mit einem definierten Massenstrom durch ein Gebläse gefördert. Die Einstellung des Massenstroms erfolgt über die Vorgabe der Drehzahl des Gebläses. Die Frischluft wird anschließend in einen Wärmeübertrager geleitet, in dem sie erhitzt wird. Der Wärmeübertrager ist ein Doppelrohrwärmeübertrager mit thermischem Speicher. Beheizt wird der Wärmeübertrager durch einen extern zugeführten Gasbrenner. Am Auslass des Wärmeübertragers wird eine Temperatur- und Druckmessung der erwärmten Frischluft vorgenommen. Daraufhin wird die Frischluft in den Bereich für den Partikeleintrag geführt. Mit der Partikelförderung wird in diesem Bereich der Partikelgehalt der Gasströmung eingestellt und vergleichmäßigt. Anschließend wird das partikelbeladene Gas in den Schaufelkanal geführt. Im Schaufelkanal wird die zu untersuchende Schaufel im Gasstrom platziert und bezüglich der Partikelablagerung untersucht. Gleichzeitig ist im Schaufelkanal eine Zuführung von Druckluft mit Durchfluss-, Temperatur- und Druckmessung, um die Filmkühlung mit einem definierten Massenstrom zu versorgen. Das Abgas wird anschließend in einen Kamin geleitet. Die Bestimmung der Geschwindigkeit im Schaufelkanal erfolgt über den Massenstrom der Frischluft, der Gastemperatur und den Querschnitt des Kanals. Gasbrenner, Wärmeübertrager,

Gebläse und Partikelinjektor sind bereits bestehende Komponenten und wurden entsprechend in den Versuchsaufbau integriert. Konkret wurde für den Partikeleintrag ein Topas SAG 410 verwendet. Der Wärmeübertrager war eine bereits bestehende Anlagenkomponente. Nächster Schritt für die Errichtung des Versuchsstandes war es den Partikeleintrag und den Schaufelabschnitt zu gestalten. Ziel dieses Bereiches ist es, die Testpartikel in den Gasstrom zu injizieren, zu homogenisieren und über den Bereich der Schaufel zu führen. Für diesen Zwecke wurde die Konstruktion in Abbildung 14 erstellt.

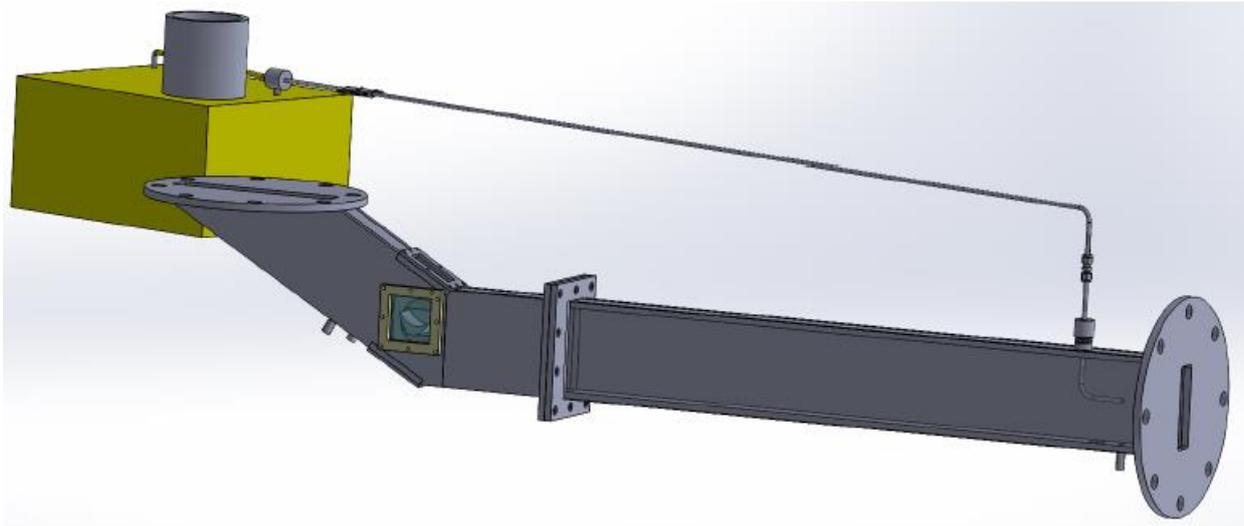


Abbildung 23 Partikeleintrag mit darauf folgenden Schaufelkanal für die Untersuchung der Testschaufel in partikelbeladenem Gas

Auf der rechten Seite von Abbildung 23 befindet sich der Partikeleintrag für den Versuchsstand der Einzelschaufel. Dort werden die Partikel aus einem Zuleitungsrohr aus Richtung des Topas in den Kanal injiziert. Die Partikel haben anschließend eine Strecke von 1,2 m um sich in der Strömung zu vergleichmäßigen und zu erwärmen. Im Bereich, in dem die Testschaufel positioniert wurde, wurde eine Beugung in den Kanal integriert. Diese Beugung entspricht dem Umlenkwinkel  $\Delta\beta = 40,6$  der untersuchten Schaufeln. Zusätzlich wurden Bereiche mit Quarzgläsern vorgesehen, um die Schaufeln während der Versuchsdurchführung zu beobachten. Die Schaufel selbst sitzt in einem Einsatz, welcher zum einen eine Versorgung durch Druckluft für die Filmkühlung zulässt. Weiter lässt sich der Anstellwinkel der Schaufel für potentielle erweiterte Untersuchungen einstellen. Nach der Erstellung des Konzeptes und dem Konstruieren der Kernelemente wurden im nächsten Schritt die Teile gefertigt und der Versuchsstand errichtet. Der errichtete Versuchsstand ist in Abbildung 24 zu sehen. Im vorderen Bereich der oberen Abbildung ist der Wärmeübertrager des Versuchsstandes zu sehen. Um Wärmeverluste zu reduzieren, wurde der Wärmeübertrager zusätzlich mit Steinwolle isoliert. Auf der linken Seite befindet sich der Gasbrenner um den Wärmeübertrager zu beheizen. Das Abgas des Brenners wird aus dem Rohr an der rechten Seite des Versuchsstandes geleitet. Nach hinten fluchtend befinden sich der Partikeleintrag und Schaufelkanal. Bis auf den optischen Zugang mit den Quarzglasfenstern ist auch dieser Bereich mit Steinwolle isoliert. Über den Versuchsstand ist mit dem dünnen Edelstahlrohr das Zuleitungsrohr für die Partikel zu erkennen. An dieses wurde während der Versuchsdurchführung der Topas als Partikelförderung angeschlossen. Auf der linken unteren Seite von Abbildung 24 ist der Bereich zum Einsetzen der Schaufel gezeigt. Zusätzlich ist auf der rechten unteren Seite die eingesetzte Schaufel während einer Versuchsdurchführung dargestellt. Nach der Errichtung des Versuchsstandes wurde zuerst ein Funktionstest über mögliche Parameter vorgenommen. Das Ergebnis dieses Tests ist in Tabelle 9 dargestellt. Mit den erreichten Parametern sind die Anforderungen aus Kapitel 3.2.5 erfüllt.



Abbildung 24 Erichteter Versuchsstand mit Darstellung des Schaufeleinsatzes

Tabelle 9 Mögliches Parameterfeld zur Durchführung der Versuche an der Einzelschaufel

| Parameter            | Min. | Max. | Einheit       |
|----------------------|------|------|---------------|
| Gasgeschwindigkeit   | 10   | 50   | $m/s$         |
| Gastemperatur        | 450  | 650  | $^{\circ}C$   |
| Partikelmassenstrom  | 0,0  | 3,0  | $g/min$       |
| Massenstrom Kühlluft | 0,5  | 4,0  | $m^3 i. N./h$ |

### 3.3.2 Fertigung der Testschaufel für die Durchführung der Ablagerungsversuche

Während der Errichtung des Versuchsstandes wurde parallel die Fertigung der ausgewählten Testschaufeln vorgenommen. Die Auswahl der Schaufeln wurde in Kapitel 3.2.5 vorgenommen. Bei der Fertigung wurde sich für die Schaufeln V002, V005 und V008 entschieden. Die gefertigten Schaufeln sind in Abbildung 25 dargestellt. V002 ist die Konfiguration mit geraden Bohrungen, V005 mit gefächerten Bohrungen und V008 mit gefächerten und frontalen Bohrungen. Als Material für die Fertigung der Schaufeln wurde der hochlegierte Stahl 1.2343 verwendet. Typische Bestandteile dieser Legierung sind 1% Silizium, 5% Chrom, 0,4% Vanadium und 1,3% Molybdän. Als Fertigungsmethode wurde die spanende Bearbeitung gewählt. Zusätzlich wurde die Oberfläche der Schaufel nitriert.

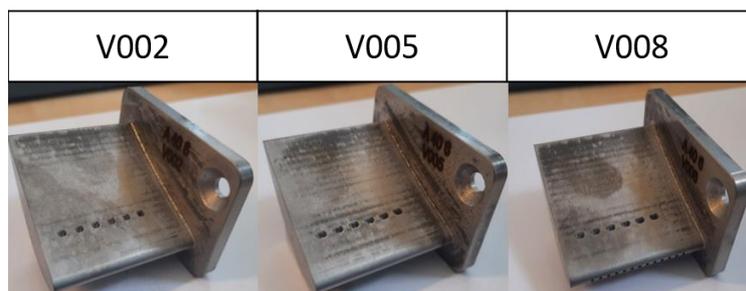


Abbildung 25 Fotografien der gefrästen und nitrierten Schaufeln für die Versuchsdurchführung

### 3.4 Herstellung von Testaschen und Versuchsdurchführung (AP2)

Nach der Errichtung des Versuchsstandes und Fertigung der Testschaufeln wurde im nächsten Schritt eine Testtasche für die Durchführung der Versuche vorbereitet. Zusätzlich wurde ein Plan zur Versuchsdurchführung erstellt. In dem folgenden Kapitel wird zuerst auf die Erstellung der Testtasche eingegangen. Darauf folgend wird die Durchführung der Ablagerungsversuche mit Aufzeigen des Ablaufes beschrieben und die erreichten Versuchspunkte aufgeführt. Ziel dieses Kapitels ist dem Leser die Bedingungen während der Versuchsdurchführung möglichst nachvollziehbar darzustellen.

#### 3.4.1 Komponentenauswahl und Herstellung der Testaschen zur Erzeugung der Ablagerungen

Um die Filmkühlung unter praxisnahen Bedingungen zu testen mussten Testaschen ausgewählt werden, die die zu erwartende chemische Zusammensetzung der abgasgetragenen Partikel repräsentiert. Diese Eigenschaften werden sowohl von den mineralischen Bestandteilen der einzusetzenden biogenen Rest- und Abfallstoffen als auch den verfahrensbedingten Prozessbedingungen, v.a. Luftzahl und Gastemperaturen entlang des Gasweges, bestimmt. Daraus ergibt sich ein umfangreiches Spektrum an möglichen chemischen Verbindungen und deren Konzentrationen in der Mischung. Im Rahmen von thermochemischen Gleichgewichtsberechnungen wurden die Komponenten Kalk, Gips,  $K_2SO_4$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $NaCl$  und  $KCl$  ermittelt, die unter den Eintrittsbedingungen des TCS partikelförmig (fest, flüssig) vorliegen. Details zu den Berechnungen können [6] entnommen werden.

In dieser Arbeit wurde durch thermodynamische Berechnungen Kalk, Gips,  $K_2SO_4$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $NaCl$  und  $KCl$  als potentielle Bestandteile einer Asche aus biogenen Ursprung festgestellt. Mit dieser Grundlage wurde die Mischung der Testtasche in Tabelle 10 erstellt. Zusätzlich sollte ursprünglich noch in dieser Arbeit Phosphoroxid  $P_2O_5$  als relevanter Bestandteil in der Asche enthalten sein. Aufgrund der starken hygroskopischen Eigenschaft des Phosphoroxids gestaltete sich dieses Vorhaben aber als schwierig, da diese Substanz an der Luft ein Verklumpen der Testtasche hervorrief. Zusätzlich wurde der Umgang mit dem Stoff erschwert, da sich durch die Luftfeuchtigkeit eine Säure bildete, welche besondere Vorsicht erforderte. In Zukunft ist es vorstellbar, dass ein Einbringen des Phosphors durch ein anderes metallgebundenes Salz möglich ist. Bei der Mischung der Asche wurde Kalk als Grundmaterial verwendet, da dieser bereits aus dem Herstellungsverfahren eine feine Partikelgröße besitzt und damit die geringste Aufbereitung erforderte. Alle anderen Stoffe wurden für die Vorbereitung der Versuche gemahlen und gesiebt, um eine definierte Korngröße vorweisen zu können. Als kleinste Trennstufe der Siebe wurde eine Maschenweite von  $<63\mu m$  gewählt.

Tabelle 10 Zusammensetzung der Testtasche für die Durchführung der Versuche

| Nr. | Bezeichnung                        | Menge        | Rohdichte              |
|-----|------------------------------------|--------------|------------------------|
| 1   | <i>Kalk</i>                        | 78,58 Ma – % | 2,71 g/cm <sup>3</sup> |
| 2   | <i>Gips</i>                        | 7,14 Ma – %  | 2,3 g/cm <sup>3</sup>  |
| 3   | <i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | 3,57 Ma – %  | 5,24 g/cm <sup>3</sup> |
| 4   | <i>K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i> | 3,57 Ma – %  | 2,66 g/cm <sup>3</sup> |
| 5   | <i>KCl</i>                         | 3,57 Ma – %  | 1,98 g/cm <sup>3</sup> |
| 6   | <i>NaCl</i>                        | 3,57 Ma – %  | 2,16 g/cm <sup>3</sup> |

Nachdem die Einzelbestandteile der Asche vorbereitet wurden, wurde im nächsten Schritt eine REM-EDX-Analyse der Einzelkomponenten durchgeführt. Das Ergebnis der Einzelkomponenten ist in Abbildung 26 dargestellt. Gips ist in Abbildung 26 oben links dargestellt. Gips weist eine Mischung aus feinen und groben Partikeln auf. Die Partikel selbst haben ein scharfkantiges Aussehen und sind überwiegend unregelmäßig geformt. Die obere rechte Hälfte enthält Kalk. Im Gegensatz zu Gips hat

Kalk ein sehr fluffiges und weiches Aussehen. Die Partikel selbst sehen aus, als wären sie mit einem weichen Flaum bedeckt. Auf der linken Seite in der Mitte von Abbildung 26 ist Eisenoxid dargestellt. Das Eisenoxid in der Abbildung hat ein körniges Aussehen. Die Teilchen erscheinen sehr regelmäßig und haben ein relativ identisches Aussehen. In der Mitte rechts ist Kaliumsulfat dargestellt. In der Abbildung hat Kaliumsulfat eine Mischung aus feinen und groben Teilchen. Die beiden unteren Darstellungen in Abbildung 26 zeigen die Salze Natriumchlorid und Kaliumchlorid. Beide Salze sehen wie Agglomerate aus kleineren Teilchen aus. Vermutlich haben sich die Partikel nach dem Mahlvorgang zu größeren Partikelclustern zusammengefunden. Diese Beobachtung würde die größere Partikelgrößenverteilung der Salze erklären.

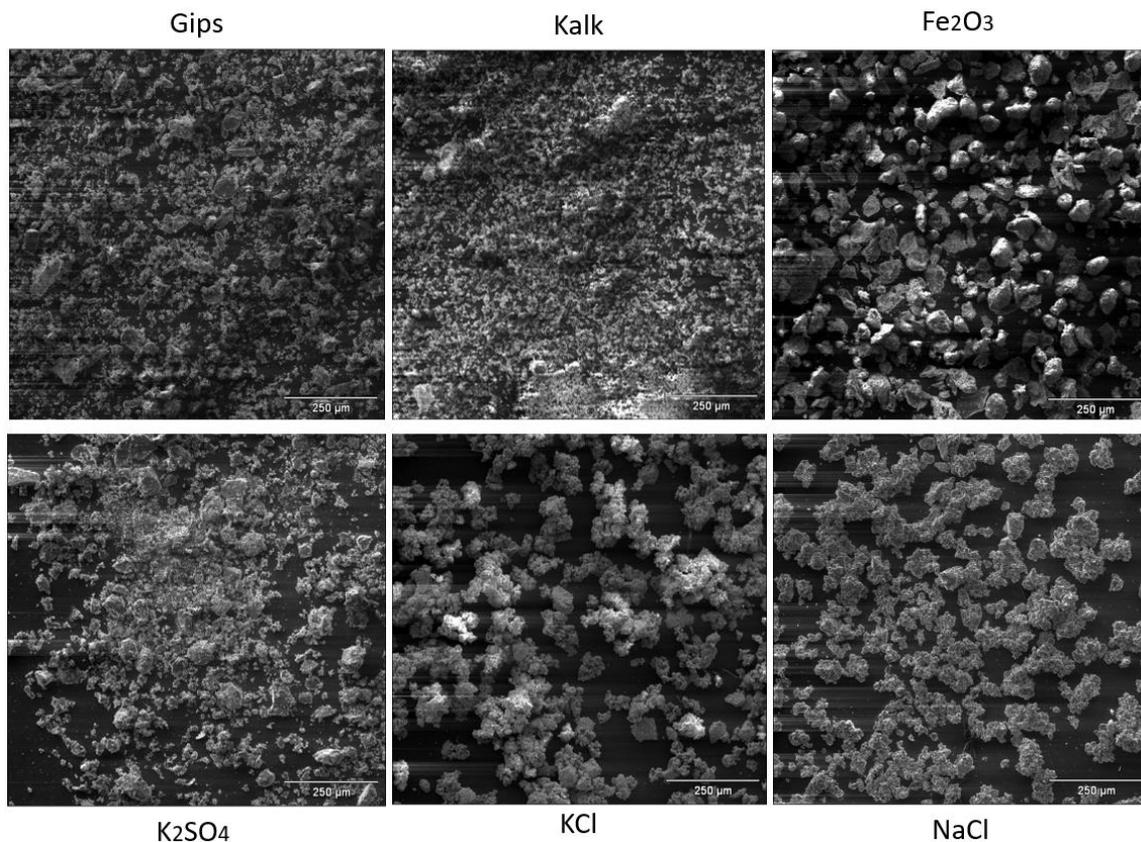


Abbildung 26 REM-EDX-Aufnahmen der Einzelkomponenten der Asche vor der Mischung

Während der Durchführung der REM-Aufnahmen wurden die Stoffe zusätzlich mit der EDX-Methode auf Reinheit untersucht. Die Stoffe  $K_2SO_4$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $NaCl$  und  $KCl$  stammen ursprünglich aus der Beschaffung von Laborbedarf und besaßen entsprechend keine Unreinheiten. Gips und Kalk wurden aus dem Baubedarf besorgt und besaßen entsprechend Unreinheiten in der Zusammensetzung. Die gemessenen Unreinheiten sind in Tabelle 11 aufgeführt. Trotz der Unreinheiten sind die Hauptbestandteile von Kalk, Kalzium, Sauerstoff und Kohlenstoff. Entsprechend besteht die Zusammensetzung von Gips hauptsächlich aus Kalzium, Schwefel und Sauerstoff. Zusätzlich haben beide Stoffe Spuren von Aluminium und Silizium, welche durch Sand eingebracht worden sein könnten. Auch sind Spuren von Natrium und Magnesium enthalten. Der Gips besitzt zusätzlich noch Spuren von Kalium, welcher durch Tonerde in den Stoff eingebracht worden sein könnte.

Tabelle 11 Aufführung der Zusammensetzung der Komponenten Kalk und Gips durch deren Elementarzusammensetzung

| Bezeichnung |           | Kalk  | Gips  | Einheit       |
|-------------|-----------|-------|-------|---------------|
| Kohlenstoff | <i>C</i>  | 21,39 | 0,00  | <i>Ma</i> – % |
| Sauerstoff  | <i>O</i>  | 40,20 | 50,79 | <i>Ma</i> – % |
| Natrium     | <i>Na</i> | 0,26  | 0,52  | <i>Ma</i> – % |
| Magnesium   | <i>Mg</i> | 0,20  | 0,66  | <i>Ma</i> – % |
| Aluminium   | <i>Al</i> | 0,10  | 0,56  | <i>Ma</i> – % |
| Silizium    | <i>Si</i> | 0,33  | 1,52  | <i>Ma</i> – % |
| Schwefel    | <i>S</i>  | 0,36  | 19,92 | <i>Ma</i> – % |
| Kalium      | <i>K</i>  | 0,00  | 0,26  | <i>Ma</i> – % |
| Kalzium     | <i>Ca</i> | 37,16 | 25,77 | <i>Ma</i> – % |
| Summe       | $\Sigma$  | 100   | 100   | <i>Ma</i> – % |

Neben der REM-EDX wurde auch noch eine Bestimmung der Partikelgrößen der Einzelstoffe durchgeführt. Als Messmethode zur Bestimmung der Korngrößen wurde Laserdiffraktometrie verwendet. Zur Messung der Partikelgröße wurde das System HELOS H2487 verwendet. Die Darstellung der kumulativen Partikelgrößenverteilung der Einzelstoffe ist auf der linken Seite von Abbildung 27 zusammen mit der Standardabweichung der Messung. Auffällig an dieser Korngrößenverteilung ist, dass Kalk von allen verwendeten Materialien die kleinste Korngröße aufweist. Außerdem gibt es kaum einen Unterschied in der Verteilung zwischen gemahlenem und ungemahlenem Kalk, wobei der Rohkalk sogar etwas feiner ist. Die Salze weisen dagegen eine Korngrößenverteilung mit dem höchsten Anteil an großen Partikeln auf. Diese gröbere Verteilung lässt sich auf die entdeckten Agglomerate aus Abbildung 26 zurückführen. Die Einsatzstoffe Gips und Eisenoxid liegen als Mittelwert zwischen den Kurven von Kalk und den verwendeten Salzen. Anhand der Massenanteile wurde die Partikelgrößenverteilung und Abweichung der Testasche aus Tabelle 10 berechnet. Der Verlauf der kumulativen Verteilung ist auf der rechten Seite von Abbildung 27 gezeigt.

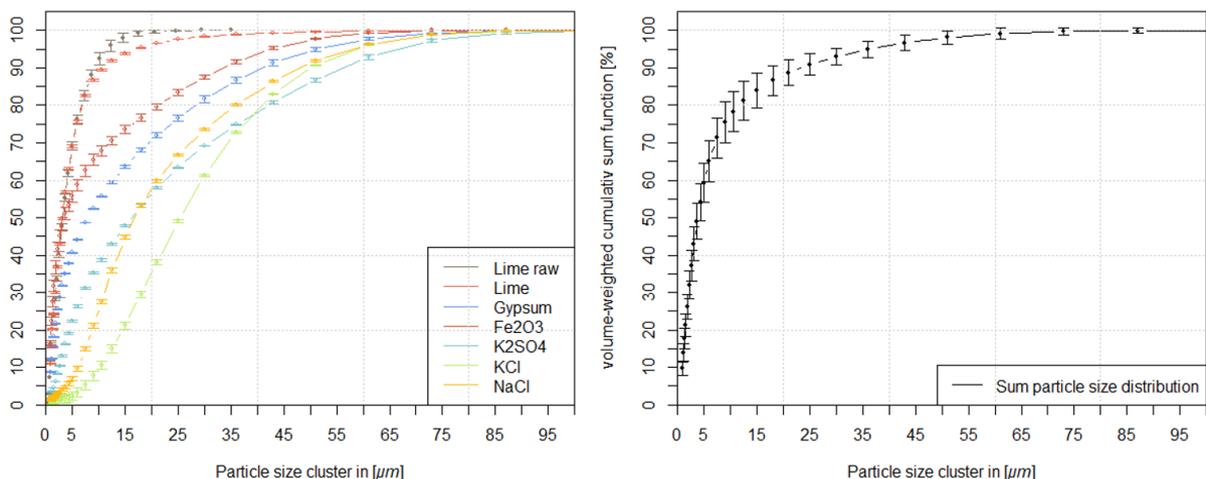


Abbildung 27 Kumulative Partikelgrößenverteilung der Einzelstoffe und der gemischten Testasche mit Standardabweichung

Zuletzt wurde noch eine visuelle Begutachtung der Einzelkomponenten und der Mischung der Aschen vorgenommen. Eine Darstellung von den Einzelkomponenten und der Mischung ist in Abbildung 28 gezeigt. Bei der Asche ist vor allem das Eisenoxid (3) als dominanter Farbgeber zu erkennen. Da auch Kalk (2) der größte Bestandteil der Mischung ist, scheint dieser der hauptsächliche Faktor für die grundsätzliche Beschaffenheit der Mischung zu sein. Auch ist bei den Salzen *KCl* (5) und *NaCl* (6) eine deutlich gröbere Struktur wahrzunehmen.



Abbildung 28 Fotografie der in Tabelle 10 (1-6) aufgeführten Einzelstoffe und die Asche im gemischten Zustand (7)

### 3.4.2 Versuchsablauf und eingestellte Versuchspunkte

Nach der Errichtung des Versuchsstandes, der Fertigung der Testschaufeln und Vorbereitung der Testasche wurden im nächsten Schritt die Ablagerungsversuche durchgeführt. Mit jedem der drei ausgewählten Testschaufeln wurde ein Test durchgeführt. Die Abläufe der Versuchsdurchführung sind in Abbildung 29 dargestellt. Die Diagramme in Abbildung 29 zeigen den Temperaturverlauf der Gasströmung während der Versuchsdurchführung.

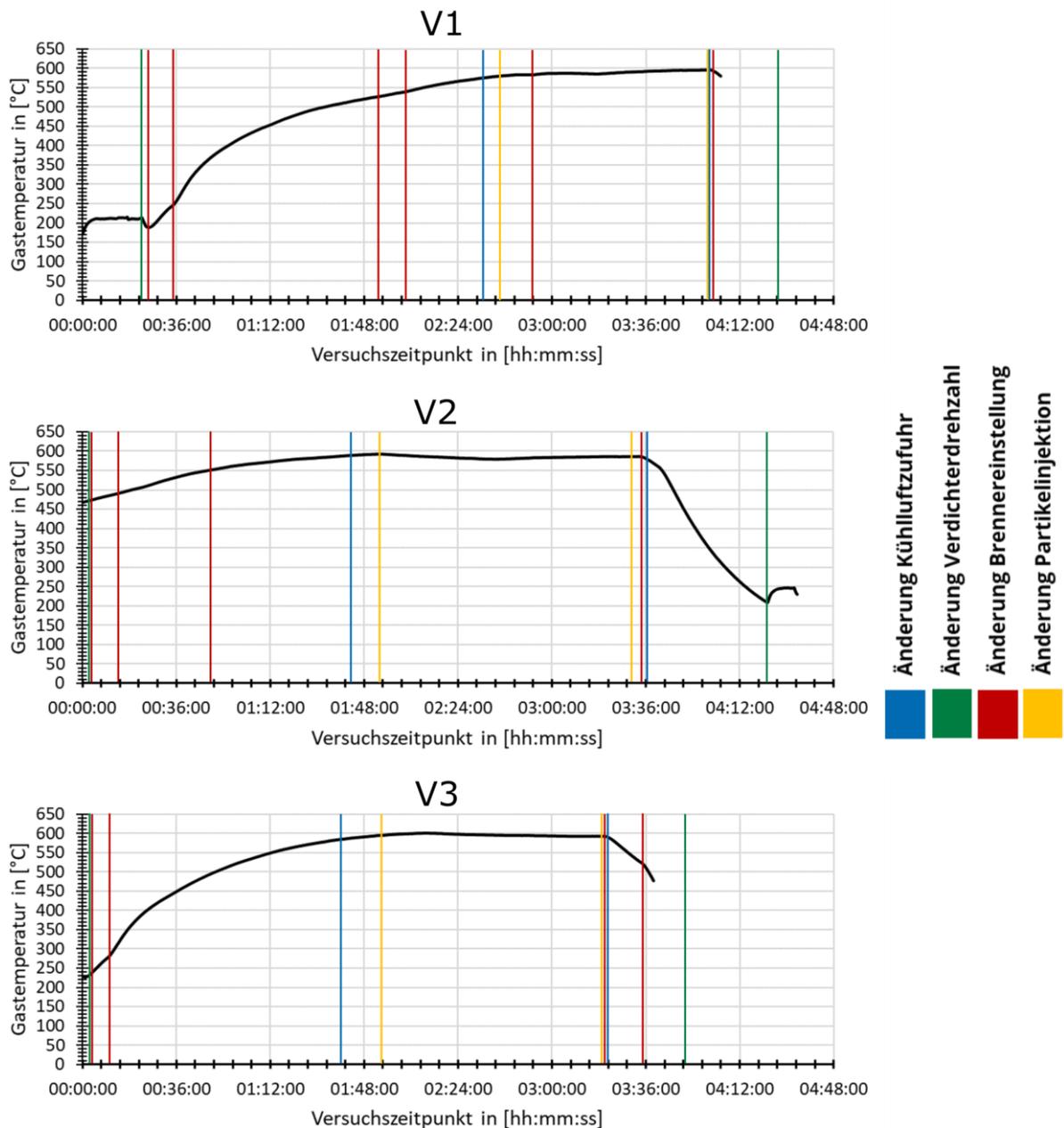


Abbildung 29 Aufzeigen der verschiedenen Versuchsabläufe für die vier Ablagerungsversuche mit den ausgewählten Testschaufeln.

Eine Änderung der Kühlluftzufuhr ist mit einer blauen Linie, die Änderung der Verdichterdrehzahl mit einer grünen Linie, eine Veränderung der Brenneinstellung mit einer roten Linie und eine Veränderung der Partikelinjektion mit einer gelben Linie gekennzeichnet. Zuerst wurde bei jedem Versuchslauf der Verdichter auf Nenndrehzahl eingestellt (erste grüne Linie). Danach wurde schrittweise die Brenneinstellung (folgende rote Linien) erhöht, um die gewünschte Gastemperatur zu erreichen und

die thermische Belastung des Versuchsstandes zu minimieren. Für die Versuche wurde anschließend die Kühlluft (blaue Linien) eingestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass keine Durchflussschwankungen durch Druckschwankungen aus der Zuleitung entstanden. Schließlich wurde die Partikelzufuhr gestartet. Während der Durchführung wurde die ungefähre Injektionszeit für die Partikel durch Beobachtung des Füllstands und Abschätzung der Zeit aus früheren Versuchen ermittelt. Sobald der Behälter des Partikelinjektors einen bestimmten Füllstand erreicht hatte, wurde der Injektor abgeschaltet (zweite gelbe Linie). Kurze Zeit später wurde auch die Kühlluftzufuhr (zweite blaue Linie) abgestellt. Anschließend wurde der Brenner abgeschaltet und der Versuchsstand auf ungefähr 200 °C – 300 °C abgekühlt. Danach wurde auch der Verdichter ausgeschaltet und die Schaufel aus dem Versuchsstand entnommen. Eine Auflistung der erreichten Versuchszustände ist in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12 Aufführung relevanter Parameter aus der Durchführung der Ablagerungstests an der Einzelschaufel für die Einordnung der erzeugten Ablagerungen

| Beschreibung                             | FZ        | V2    | V3    | V4    |                 |
|--|-----------|-------|-------|-------|-----------------|
| Schaufelkonfiguration                    | -         | V002  | V005  | V008  |                 |
| Gemittelte Gastemperatur                 | $T_{Gas}$ | 588,4 | 584,4 | 595,8 | °C              |
| Gemittelte Gasgeschwindigkeit            | $v_{Gas}$ | 11,58 | 11,53 | 11,68 | $\frac{m}{s}$   |
| Kühllufttemperatur                       | $T_{KL}$  | 8     | 5     | 5     | °C              |
| Impulsverhältnis                         | $I$       | 3,7   | 2,0   | 1,1   | 1               |
| Injizierte Partikelmasse                 | $m_p$     | 103,2 | 105,4 | 96,2  | $g$             |
| Injektionsdauer                          | $t_p$     | 79    | 97    | 89    | $min$           |
| Gasmassenbasierte Partikelkonzentration  | $c_{p,m}$ | 0,640 | 0,533 | 0,530 | $\frac{g}{kg}$  |
| Gasvolumenbasierte Partikelkonzentration | $c_{p,v}$ | 0,260 | 0,216 | 0,215 | $\frac{g}{m^3}$ |

Während des Tests konnte eine minimale und maximale Schwankungsbreite der Gastemperatur von  $T_{Gas} - 8,5\text{ °C}$  und  $+7,9\text{ °C}$  gewährleistet werden. Dies ergibt eine maximale Geschwindigkeitsänderung von  $v_{Gas} - 0,11\text{ m/s}$  und  $+0,10\text{ m/s}$ . Der erwartete Partikelmassenstrom für die Injektion in den Gasstrom sollte bei den Einstellungen des Partikelinjektors  $2.250\text{ g/min}$  betragen. Beim Wiegen der Restpartikel nach dem Test wurde jedoch nur ein Partikelmassenstrom von  $\dot{m}_p = 1,07 - 1,31\text{ g/min}$  ermittelt. Auch waren die Versuchsdauern länger als geplant. Insgesamt dauerte die Partikelbelastung auf einer Testschaufel zwischen  $t_p = 79\text{ min}$  und  $t_p = 97\text{ min}$ . Es wurden Partikelkonzentrationen von  $c_{p,v} = 0,215\text{ g/m}^3$  bis  $c_{p,v} = 0,260\text{ g/m}^3$  erreicht. Bei den Versuchen wurden auch unterschiedliche Impulsverhältnisse  $I$  für die Schaufeln mit Kühlbohrungen eingestellt. Ziel dieser Variation war es, den Einfluss auf die Ablagerung der Partikel an der Schaufel zu ermitteln.

### 3.5 Auswertung der Versuche und Rückskalierung der Bohrungskonturen (AP2)

Ziel dieses Kapitels ist es die erzeugten Ablagerungen in Bezug auf die Filmkühlung zu bewerten. Dafür werden die erzeugten Ablagerungen begutachtet und mit CFD-Simulationen verglichen, um Rückschlüsse auf die Schutzwirkung zu nehmen. Zusätzlich wurde eine REM-EDX-Analyse von ausgewählten Ablagerungsorten auf den Schaufeln durchgeführt, um eine Einschätzung der Partikelablagerungstendenz vorzunehmen. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden anschließend Kühlbohrungen auf den Schaufeln des TCS integriert.

#### 3.5.1 Vergleich der Ablagerungserscheinungen mit Strömungssimulationen

Die Ergebnisse der Ablagerungsversuche sind auf der linken Seite von Abbildung 30 dargestellt. Für alle Tests wurde ein Schaufelwinkel von  $\Delta\beta = 40,6^\circ$  verwendet.

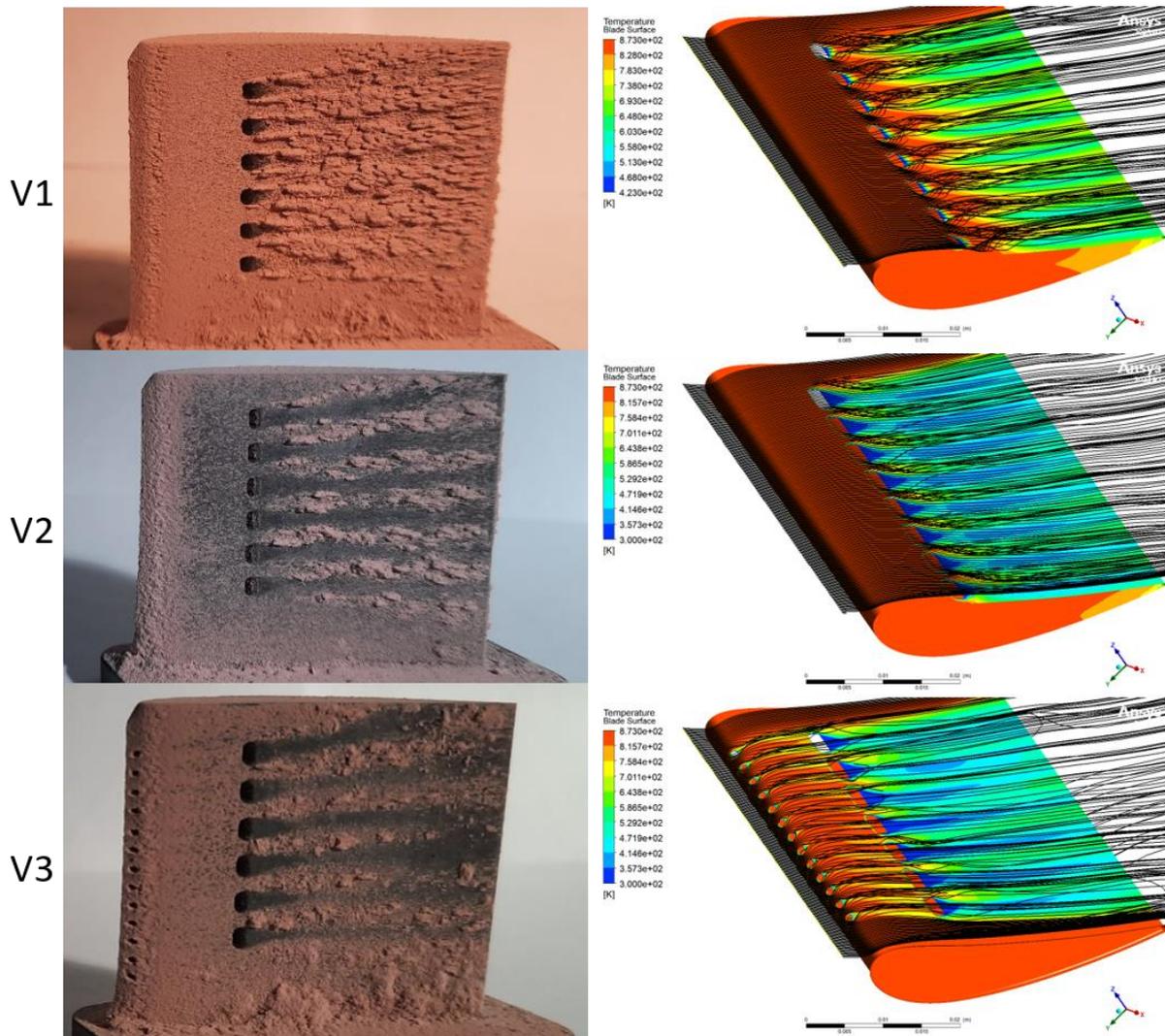


Abbildung 30 Ergebnisse der Ablagerungsversuche im Vergleich zu Strömungssimulationen mit identischen Versuchspunkten

Der Testlauf von V1 wurde mit einer Testschaufel mit geraden Bohrungen und einem Impulsverhältnis von  $I = 3,8$  durchgeführt. Bei diesem Test wurden die deutlichsten Ablagerungen auf der Druckseite der Schaufel festgestellt. Gleichzeitig wurde die größte Menge an Partikeln mit  $m_p = 103,2 g$  in den Kanal injiziert. Die Ablagerungen sind besonders unregelmäßig im Bereich hinter den Kühlöffnungen. Hier bilden die Partikel eine raue Oberfläche auf der Schaufel. Aber auch die Vorderkante der Schaufel weist einen erheblichen Anteil an Ablagerungen auf. Im Versuch V2 wurde eine Schaufel mit aufgefächerten Kühlbohrungen betrachtet. Obwohl diese Schaufel mit  $m_p = 105,4 g$  einer ähnlichen

Menge an Partikeln ausgesetzt war, zeigt diese Konfiguration ein deutlich geringeres Ablagerungsverhalten. Im Gegensatz zu V1 wurde das Impulsverhältnis bei V2 auf  $I = 2,0$  reduziert. Wie bei V1 zeigt auch bei V2 die Vorderkante das deutlichste Abscheideverhalten. Außerdem wurden in den Zwischenbereichen der Filmabkühlung stromabwärts des Gasweges Partikelklumpen festgestellt. In den Bereichen der Filmkühlung selbst sind jedoch fast keine Ablagerungen zu finden. Bei der Ausführung von V3 wurden in die Schaufelkonfiguration zusätzliche frontale Kühlbohrungen in die Testschaufel gebohrt. Der übrige Aufbau ist identisch mit dem von V2. Das Impulsverhältnis wurde bei dieser Version weiter auf  $I = 1,1$  reduziert. Die injizierte Partikelmenge ist mit  $m_p = 96,2 \text{ g}$  geringer als bei V1 und V2. Dennoch ist bei diesem Versuch eine deutlich erhöhte Partikelbeschichtung auf der Druckseite der Prüfschaufel zu erkennen. Ähnlich wie bei V2 sind nach den Kühlbohrungen kaum noch Partikel auf der Oberfläche zu finden. Wie bei V1 und V2 ist auch hier zwischen den Kühlbohrungen ein körniger Belag aus Aschepartikeln vorhanden. Wie bei allen anderen Tests gibt es eine beträchtliche Menge an Partikelablagerungen an der Vorderkante der Schaufel. Zusätzlich scheinen die stirnseitigen Löcher keine schützende Wirkung auf die Vorderkante der Schaufel zu haben. Im Vergleich zum Test V2 sind bei V3 auch deutlich mehr Partikelablagerungen vor der Filmkühlung auf der Druckseite der Turbinenschaufel vorhanden. Darüber hinaus zeigt dieser Ablagerungsbereich leichte Schlieren an den Positionen der frontalen Kühlbohrungen.

Um die Ablagerungsmuster besser zu verstehen, wurden Strömungssimulationen mit den genauen Versuchsparametern aus Tabelle 12 durchgeführt. Die Ergebnisse der Strömungssimulationen sind auf der rechten Seite von Abbildung 30 dargestellt. Für die Visualisierung des Strömungsmusters aufgrund der Filmkühlung wurde der Ansatz von Stromlinien gewählt. Die Position der Keimpunkte für die Stromlinien befinden sich im Bereich der Vorderkante vor den Schaufeln. Wie aus den Stromlinien der Simulation für V1 in Abbildung 30 ersichtlich wird, führt die Parametereinstellung zu einer starken Bündelung der Strömung zwischen den Bereichen der Kühlbohrungen. Außerdem kommt es in diesem Bereich zu einer starken Durchmischung der Strömung, was den Partikeltransport zur Oberfläche der Turbinenschaufel begünstigt. Dies erklärt auch die Partikelablagerung im Bereich hinter der Filmkühlung. Vergleicht man die Stromlinien von V1 mit V2, so ist ein deutlich glatterer Gasstrom zu erkennen. Auch kreuzen sich die Stromlinien weniger, was auf eine geringere Durchmischung der Strömung hinweist. Allerdings gibt es immer noch ein gewisses Maß an Strömungsbündelung zwischen den Kanälen, was die Ablagerungen zwischen den Kühlöffnungen erklärt. Die Simulation von V3 ist rechts unten in Abbildung 30 zu sehen. Trotz der verbesserten Strömungsführung wie in V2 ist auch in V3 eine starke Bündelung und Vermischung der Strömung aufgrund der frontalen Löcher zu beobachten. Dies ist auch im vorderen Bereich der eigentlichen Kühlöffnungen zu beobachten, was die Ablagerungen an dieser Stelle von V3 erklärt.

Eine Visualisierung der Ablagerungen mit und ohne stirnseitige Löcher ist in Abbildung 31 links zu sehen. Aufgrund des Stagnationspunktes an der Vorderkante der Schaufel besteht hier eine besonders starke Tendenz zur Ablagerung von Partikeln. Diese Tendenz scheint sich durch die Integration von Frontlöchern nicht zu verringern. Es ist unsicher, ob hier überhaupt ein Schutzmechanismus integriert werden muss, da Ablagerungen vor allem im engsten Querschnitt zwischen Druck- und Saugseite die Leistung einschränken werden.

Abbildung 31 rechts zeigt darüber hinaus ein typisches Ablagerungsmuster auf der Saugseite während der Tests. Hier gibt es grobe Ablagerungen auf der Oberfläche des Metalls, insbesondere im Bereich der Schaufelhinterkante. Außerdem ist im Bereich der dicksten Profildicke ein Muster zu erkennen, das auf eine Strömungsablösung hinweist. Diese Strömungsablösung könnte zu einem Bereich mit Rückströmung führen, was die Ablagerung dieser groben Partikelstruktur erklären würde. Ideale Strömungsverhältnisse um die Schaufel herum scheinen also auch die Ablagerung von Partikeln zu verhindern.



Abbildung 31 Vorderkante der Testschaufeln mit und ohne Frontalbohrungen sowie repräsentative Saugseite der Testschaufeln

### 3.5.2 Durchführung einer REM-EDX zur Charakterisierung der Ablagerungen

Nach der visuellen Analyse der Turbinenschaufeln wurden in einem nächsten Schritt Proben an bestimmten Stellen der Turbinenschaufeln entnommen und eine REM-EDX-Analyse durchgeführt. Die erste Probenahmestelle (1, 5, 9) befand sich auf der Druckseite der Schaufel vor der Filmkühlung. Die zweite Probenahmestelle (2, 6, 10) befand sich auf der Druckseite der Schaufel nach der neu integrierten Folienkühlung. Für die dritte Entnahmestelle (3, 7, 11) wurde die Vorderkante der Schaufeln gewählt. Da sich auch an der Hinterkante der Turbinenschaufeln interessante Ablagerungen gebildet haben, wurde hier der vierte Untersuchungspunkt (4, 8, 12) gesetzt. Eine Auflistung und Zuordnung der Untersuchungspunkte für die nachfolgenden Analysen ist in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13 Zuordnung der Probeentnahmestellen zu Abbildung 32

|                                 | V1 | V2 | V3 |
|---------------------------------|----|----|----|
| Druckseite vor der Filmkühlung  | 1  | 5  | 9  |
| Druckseite nach der Filmkühlung | 2  | 6  | 10 |
| Schaufelvorderkante             | 3  | 7  | 11 |
| Saugseite nach Ablösungen       | 4  | 8  | 12 |

Nachdem die Proben entnommen worden waren, wurden sie für die REM-EDX-Analyse auf Trägern ausgebreitet. Die Proben wurden dann mit zwei Schichten Kohlenstoff überzogen, um die Partikel auf dem Träger zu fixieren und Leitfähigkeit für das Rasterelektronenmikroskop zu schaffen. Die Aschepartikel waren fest, wenn sie von der Schaufel entnommen wurden, aber leicht spröde, wenn eine Kraft ausgeübt wurde. Das verwendete Rasterelektronenmikroskop (REM) war das DSM950 von Zeiss. Für die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) wurde das Noran System 7 mit SDD-Detektor von „Thermo Scientific“ verwendet. Das Ergebnis der REM-Aufnahmen ist in Abbildung 32 gezeigt.

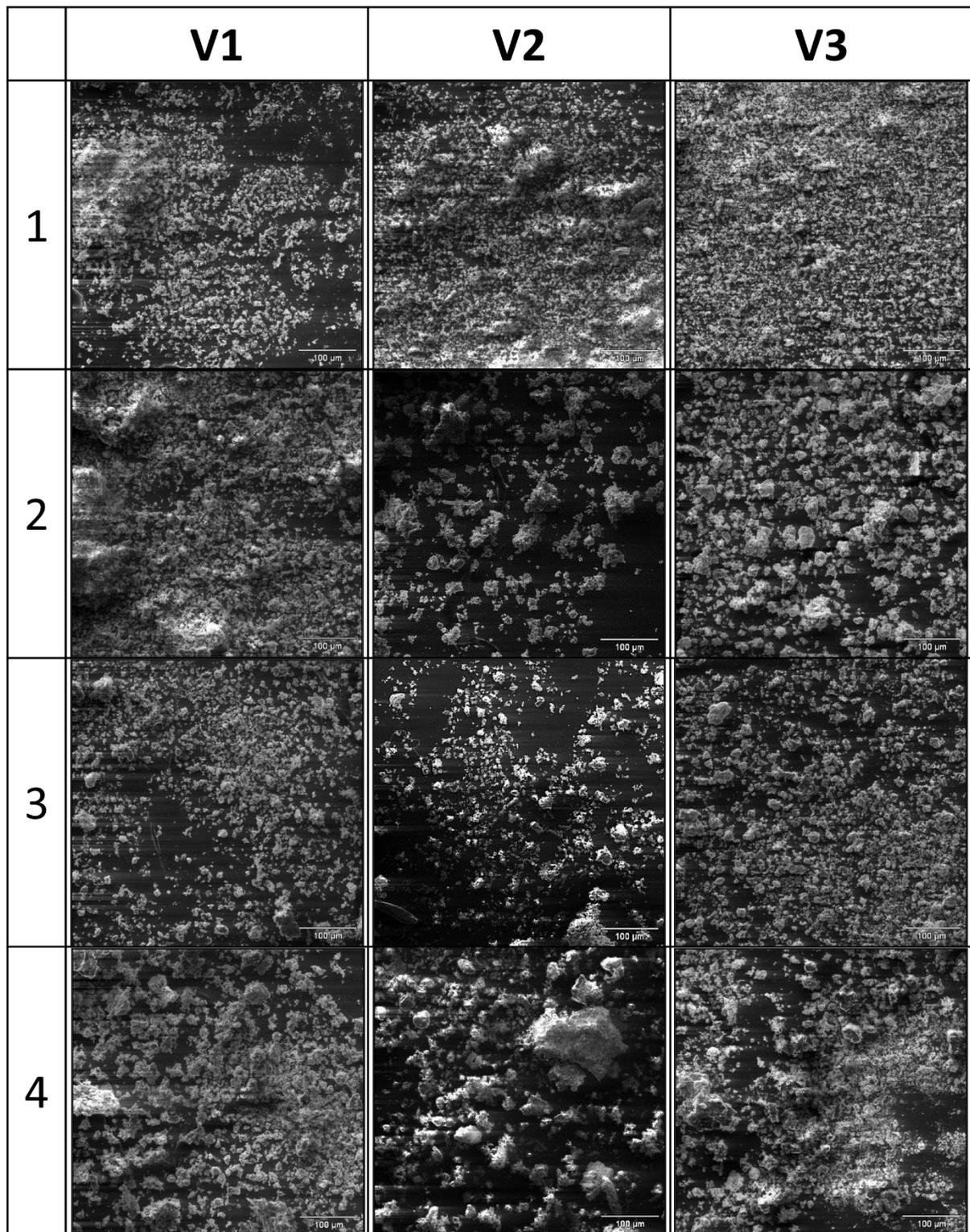


Abbildung 32 REM-Aufnahmen entsprechend der Entnahmestellen von Tabelle 13

Die erste Zeile von Abbildung 32 zeigt die Ablagerungen in dem Bereich vor der Filmkühlung. Wie auf den REM-Bildern zu sehen ist, ist die Partikelzusammensetzung an dieser Stelle besonders fein. Der Auftreffwinkel der Partikel auf der Turbinenschaufel ist in diesem Bereich gering. Folglich werden die feinen Partikel durch Mischungsprozesse oder Kräfte wie Thermophorese oder Turbophorese an die Oberfläche der Turbinenschaufel transportiert. Diese Phänomene sind besonders für feine Partikel relevant. Die Proben aus dem Bereich hinter dem Filmkühlssystem sind in der zweiten Reihe von Abbildung 32 dargestellt. Die Ablagerungen in diesem Bereich sind bei Versuch V1 sehr fein, während

die Proben aus V2 und V3 sehr grob sind. Wie in Abbildung 30 zu sehen ist, war die Bildung von Ablagerungen beim Test V1 am stärksten ausgeprägt. Dies ist wahrscheinlich auf das stark erhöhte Impulsverhältnis zurückzuführen. Der hohe Wert des Impulsverhältnisses erhöht auch die Durchmischung des Gasstroms an der Schaufeloberfläche. Dadurch werden auch feine Partikel unter die Schutzschicht der Filmkühlung transportiert, was die feinen Ablagerungen erklären kann. Bei den Versuchen V2 und V3 sind die Partikelgrößen hinter der Filmkühlung größer. Diese Partikel haben sich wahrscheinlich stromabwärts im Bereich zwischen den Löchern aufgrund der Sogwirkung des Filmkühlauslasses vom Gasstrom abgelagert. Auch wenn diese Partikel sehr grob erscheinen, ist die Partikelgröße dieser Ablagerung immer noch  $<100 \mu m$ . Ob Partikel dieser Größe auf der Oberfläche abgelagert wurden oder sich nur auf der Schaufeloberfläche gebildet haben, ist noch unklar. Die dritte Reihe in Abbildung 20 enthält Proben der Ablagerungen von der Vorderkante der Schaufeln. Alle drei Proben enthalten sowohl kleine als auch große Partikel. Aufgrund der großen Umlenkung an der Vorderkante der Schaufel wirkt an dieser Stelle die größte Trägheit der Partikel. Folglich wird an dieser Stelle die größte Bandbreite an Partikelgrößen abgelagert. An dieser Stelle der Schaufel ist kein Unterschied zwischen der Konfiguration mit frontalen Kühlöffnungen (V3) und ohne (V1, V2) zu erkennen. Die letzte Zeile von Abbildung 32 zeigt die Ablagerungen auf der Saugseite der Schaufel. An dieser Stelle sind besonders große Partikel zu finden. Es ist nicht klar, ob sich diese großen Partikel an dieser Stelle bilden oder bereits im Gasstrom agglomeriert sind. Berücksichtigt man die in Abbildung 31 rechts gezeigten Ablagerungen auf der Saugseite der Schaufel, so scheint auch diese Stelle für die Aufrechterhaltung des Betriebs einer Gasturbine unter Feststoffnutzung relevant zu sein. Allerdings muss an dieser Stelle deutlich hervorgehoben werden, dass die Strömungsbildung an einer geraden Kanalwand stattgefunden hat, die nicht die exakten Bedingungen in den Abschnitten einer Gasturbine herstellt.

Mit den REM-Aufnahmen wurde zusätzlich eine EDX durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 14 dargestellt. Neben der Analyse der Punkte aus Tabelle 14 zeigt die unterste Zeile die erwartete Zusammensetzung der Asche bei einer homogenen Ablagerung der Aschebestandteile. Die erwartete Zusammensetzung in der letzten Zeile wurde aus Messungen des Gipses und des Kalks sowie der anderen Bestandteile berechnet.

*Tabelle 14 Vergleich der EDX-Analyse der ausgewählten Testpunkte mit der ursprünglichen Aschezusammensetzung*

|      | Element | Na   | Si   | S    | Cl   | K    | Ca    | Cr   | Fe    | Summe  | Einheit |
|------|---------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|--------|---------|
| V1   | 1       | 2,25 | 0,63 | 2,25 | 2,15 | 1,26 | 82,64 | 0,69 | 7,28  | 100,00 | Ma-%    |
|      | 2       | 2,52 | 0,88 | 3,78 | 2,71 | 2,08 | 81,05 | 0,00 | 6,08  | 100,00 | Ma-%    |
|      | 3       | 3,37 | 1,44 | 5,56 | 1,77 | 0,91 | 80,79 | 0,00 | 6,15  | 100,00 | Ma-%    |
|      | 4       | 2,87 | 0,97 | 3,12 | 3,73 | 1,40 | 56,09 | 0,00 | 31,18 | 100,00 | Ma-%    |
| V2   | 5       | 4,82 | 1,14 | 5,27 | 1,33 | 0,89 | 72,27 | 0,00 | 14,28 | 100,00 | Ma-%    |
|      | 6       | 3,73 | 1,08 | 4,61 | 4,11 | 2,37 | 73,82 | 1,24 | 8,13  | 100,00 | Ma-%    |
|      | 7       | 3,02 | 0,86 | 4,49 | 1,47 | 1,17 | 83,51 | 0,00 | 4,40  | 100,00 | Ma-%    |
|      | 8       | 3,01 | 0,77 | 2,95 | 3,38 | 1,67 | 64,23 | 0,00 | 23,38 | 100,00 | Ma-%    |
| V3   | 9       | 2,88 | 0,79 | 3,18 | 2,36 | 1,01 | 80,04 | 1,12 | 7,68  | 100,00 | Ma-%    |
|      | 10      | 3,96 | 0,98 | 4,75 | 5,49 | 2,79 | 74,84 | 0,00 | 6,36  | 100,00 | Ma-%    |
|      | 11      | 1,83 | 1,03 | 3,26 | 1,73 | 0,90 | 84,98 | 0,00 | 5,10  | 100,00 | Ma-%    |
|      | 12      | 3,02 | 0,92 | 3,09 | 4,63 | 2,04 | 66,60 | 0,00 | 18,98 | 100,00 | Ma-%    |
| Test | -       | 3,61 | 0,81 | 5,18 | 8,47 | 7,66 | 68,08 | 0,00 | 5,48  | 100,00 | Ma-%    |

Bei der Analyse der vorhandenen Elemente wurde eine zusätzliche Standardisierung ohne die Komponenten Kohlenstoff und Sauerstoff durchgeführt. Auch wenn diese Stoffe in den verwendeten Substanzen natürlich vorkommen, würden sie sonst zu einer Abweichung der Ergebnisse führen, da es als Trägermaterial für die REM-Aufnahmen verwendet wird. Außerdem sind Kohlenstoff und Sauerstoff aufgrund ihres kleineren Atomradius mit EDX-Methoden schwer zu messen. Darüber hinaus wurden Magnesium und Aluminium in Tabelle 8 nicht aufgeführt, da beide Elemente in allen Proben homogen verteilt waren. Der nächste Schritt war die Berechnung der prozentualen Veränderung der Zusammensetzung. Zur Veranschaulichung der Veränderung dieses Wertes wurde Gleichung (2) verwendet.

$$\Delta dev = \frac{\xi_{E,m} - \xi_{E,ex}}{\xi_{E,ex}} \quad (2)$$

Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 15 dargestellt. Besonders auffällig ist eine erhöhte Ablagerung der Elemente Si, Ca und Fe. Die Elemente Cl und K zeigen dagegen durchweg eine verminderte Ablagerungstendenz. Erwähnenswert ist auch die signifikant hohe Konzentration von Eisen auf der Saugseite der Schaufel. Um Rückstände aus dem Schaufelmaterial auszuschließen, wurde bei diesen Proben auch der Cr-Gehalt kontrolliert. Es wurde festgestellt, dass in diesen Proben kein Cr vorhanden war, sodass das Fe aus den Flugaschepartikeln stammen muss. Der Anstieg des Ca-Gehalts ist auf die starke Präsenz von Kalk zurückzuführen. Außerdem hat dieses Material eine sehr feine Textur, was ebenfalls die Ablagerung begünstigt. Der Anstieg des Siliziumgehalts ist wahrscheinlich auf die höhere Dichte von SiO<sub>2</sub> und die damit verbundene höhere Trägheit der Partikel zurückzuführen.

Tabelle 15 Prozentuale Änderung der Zusammensetzung der analysierten Ablagerungen in  $\Delta dev$

| Element | Na     | Si     | S      | Cl     | K      | Ca     | Fe     |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1       | -37,7% | -22,1% | -56,6% | -74,6% | -83,6% | 21,4%  | 32,8%  |
| 2       | -30,1% | 9,4%   | -27,0% | -68,0% | -72,8% | 19,1%  | 11,1%  |
| 3       | -6,6%  | 79,1%  | 7,4%   | -79,2% | -88,1% | 18,7%  | 12,3%  |
| 4       | -20,6% | 19,9%  | -39,8% | -56,0% | -81,8% | -17,6% | 469,4% |
| 5       | 33,6%  | 41,6%  | 1,7%   | -84,3% | -88,4% | 6,2%   | 160,7% |
| 6       | 3,4%   | 33,7%  | -11,1% | -51,5% | -69,1% | 8,4%   | 48,5%  |
| 7       | -16,3% | 7,0%   | -13,3% | -82,7% | -84,8% | 22,7%  | -19,6% |
| 8       | -16,5% | -4,5%  | -43,1% | -60,1% | -78,1% | -5,7%  | 326,8% |
| 9       | -20,1% | -2,5%  | -38,6% | -72,2% | -86,8% | 17,6%  | 40,2%  |
| 10      | 9,8%   | 21,6%  | -8,3%  | -35,2% | -63,6% | 9,9%   | 16,1%  |
| 11      | -49,2% | 28,0%  | -37,0% | -79,6% | -88,3% | 24,8%  | -6,9%  |
| 12      | -16,3% | 14,0%  | -40,4% | -45,4% | -73,4% | -2,2%  | 246,6% |

Insgesamt scheint der Einsatz der Filmkühlung zur Verringerung der Partikelablagerungen sinnvoll zu sein. Wie in Abbildung 16 dargestellt, gibt es im Bereich der eigentlichen Filmkühlung kaum Partikelanhaftungen. Problematisch sind bei dieser Konstruktion jedoch die Bereiche zwischen den Kühlbohrungen. Durch die Wechselwirkung von Gas- und Kühlströmung entstehen Strömungsformationen, die den Partikeltransport an die Schaufeloberfläche begünstigen. Insgesamt scheint eine möglichst gleichmäßige und ruhige Strömung für die Wirkung des Schutzmechanismus günstig zu sein. Ein reduziertes Impulsverhältnis  $I$  und eine aufgefächerte Kühlbohrung scheinen hierfür besonders geeignet zu sein. Auch an der Vorderkante der Schaufel haben sich starke Ablagerungen gebildet. Kühlbohrungen an dieser Stelle sorgen nicht für eine Verringerung der

Partikelablagerung. Generell scheint es aber wichtiger zu sein, den durchströmbaren Querschnitt möglichst groß zu halten, um den Betrieb der Gasturbine aufrechtzuerhalten, als die aerodynamischen Verluste an der Schaufelvorderkante zu minimieren. Die Modellierung der Ablagerung und Integration in das Auslegungswerkzeug ist in [6] zu finden.

### 3.5.3 Konstruktion der Turbinenstufe mit Filmkühlung

Letzter Schritt bei der Erzeugung der Filmkühlung im TCS ist die Schaffung der Filmkühlung auf den Schaufeln des Turbinenabschnittes selbst. Für die Erzeugung der Filmkühlung auf den Schaufeln wurden die Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln verwendet. Wie sich durch die Simulationen und Versuche gezeigt hat, waren besonders Schaufeln mit gefächerten Kühlbohrungen auf der Druckseite und ohne Frontalbohrungen erfolgreich bei der Vermeidung von Ablagerungen. Aus diesem Grund wurde sich für die Integration von reingefächerten Bohrungen auf den Schaufeln des TCS entschieden. Relevante Parameter für die Erzeugung einer Filmkühlung als Schutzmechanismus sind in Tabelle 16 aufgeführt. Da die Testschaufeln durch Ähnlichkeitszahlen geschaffen wurden, ist eine Anwendung der Ergebnisse direkt möglich.

Tabelle 16 Parameter zur Integration der Filmkühlung auf den Schaufeln des TCS

| Leitrad                  |               |       |         |
|--------------------------|---------------|-------|---------|
| Bezeichnung              | Formelzeichen | Wert  | Einheit |
| Bohrungshöhe             | $h/d$         | 1,25  | mm      |
| Bohrungsbreite           | $b$           | 1,50  | mm      |
| Bohrungszwischenabstand  | $a$           | 1,50  | mm      |
| Lateraler Öffnungswinkel | $\beta$       | 5,00  | °       |
| Radius Kante             | $r$           | 0,60  | mm      |
| Anzahl Bohrungen         | $N$           | 5     | 1       |
| Centerline distance      | $l_b$         | 3,00  | mm      |
| Centerline angle         | $\alpha$      | 10,0  | °       |
| Lauftrad                 |               |       |         |
| Bezeichnung              | Formelzeichen | Wert  | Einheit |
| Bohrungshöhe             | $h/d$         | 1,25  | mm      |
| Bohrungsbreite           | $b$           | 1,50  | mm      |
| Bohrungszwischenabstand  | $a$           | 2,00  | mm      |
| Lateraler Öffnungswinkel | $\beta$       | 7,00  | °       |
| Radius Kante             | $r$           | 0,6   | mm      |
| Anzahl Bohrungen         | $N$           | 4     | 1       |
| Centerline distance      | $l_b$         | 2,00  | mm      |
| Centerline angle         | $\alpha$      | 30,00 | °       |

Hervorzuheben ist bei diesen Parametersatz die Reduzierung des lateralen Öffnungswinkels  $\beta$  aufgrund der gegebenen Fertigungsmöglichkeiten. Zusätzlich wurde der „Centerline angle“  $\alpha$  aufgrund der Zuführung des Fräskopfes aus Richtung der Schaufelhinterkante auf 10° reduziert. Da ein möglichst flacher Bohrungswinkel zu bevorzugen ist, stellt diese Änderung kein Problem dar. Im nächsten Schritt wurde eine Konstruktion der Kühlbohrungen auf den Schaufeln des TCS durchgeführt. Die konstruierten Schutzbohrungen sind in Abbildung 33 dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung befindet sich das Lauftrad mit Schutzbohrungen und auf der rechten Seite das Leitrad. Nächster Schritt der Entwicklung ist das Einsetzen der Turbinenräder in die bestehende CAD und die Erzeugung von der Luftzufuhr für die Versorgung der Schutzbohrungen.

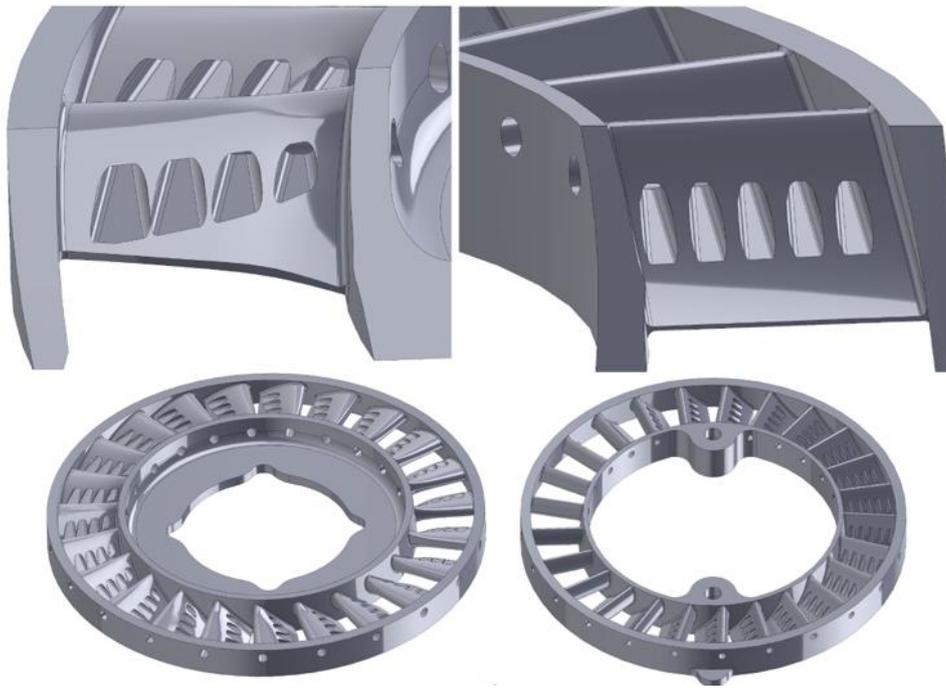


Abbildung 33 Konstruierte und integrierte Filmkühlung auf den Schaufeln des TCS (Lauftrad links, Leitrad rechts)

### 3.6 Konzeptionelle und konstruktive Anpassung des TCS (AP3)

Ziel dieses Kapitels ist es, das Konzept des TCS soweit anzupassen, dass die Filmkühlung integriert werden kann. Zusätzlich wurde die Konstruktion aus den Erkenntnissen des Vorgängerprojekts angepasst, damit ein verbesserter Betrieb des TCS vorliegt. Ausgangspunkt für die konzeptionelle Anpassung war das im Vorgängerprojekt entwickelte TCS. Das daraus resultierende angepasste TCS ist in Abbildung 34 dargestellt.

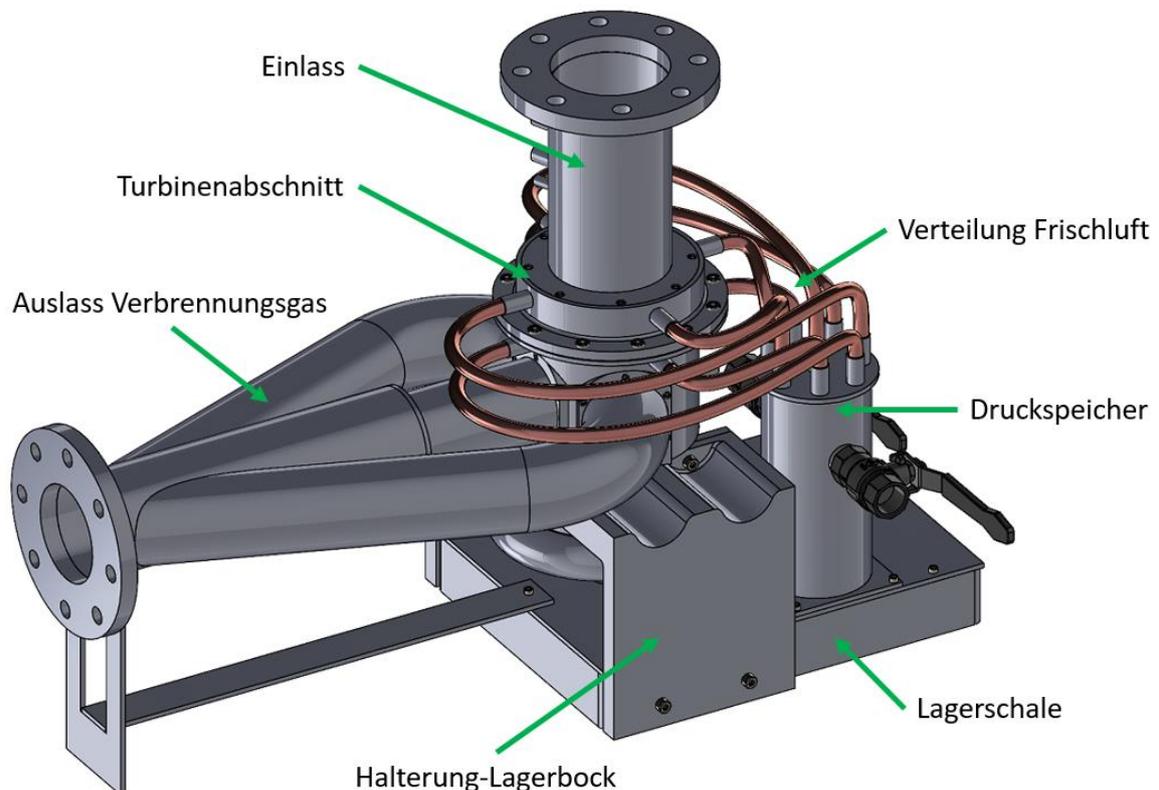


Abbildung 34 Konzeptangepasstes TCS mit integrierter Filmkühlung

Um die Filmkühlung zu integrieren, musste zuerst ein Speicher für die komprimierte Luft aus dem Verdichter geschaffen werden. Mit dem neu integrierten Speicher wurde zum einen eine ausreichende Versorgung mit Kühlluft der Filmkühlung sichergestellt. Zusätzlich stellt der Druckspeicher den Ausgangspunkt für die Verteilung der Druckluft dar. Im nächsten Schritt wurde das Gehäuse des Turbinenabschnitts soweit verändert, dass eine Versorgung der Leit- und Laufräder des TCS gegeben war. Dafür wurden in das Gehäuse des Turbinenabschnittes Nutkanäle integriert. In Abbildung 35 sind die Nutkanäle für die Verteilung der Frischluft für die Versorgung der Kühlbohrungen im TCS dargestellt. Die Nutkanäle verlaufen umfänglich im Gehäuse des Turbinenabschnittes. Innerhalb der Nutkanäle befinden sich die Absätze zur Positionierung der Laufräder der einzelnen Stufen. Zusätzlich sind Bohrungen von der Außenseite des Gehäuses zu den Nutkanälen eingebracht, um die Druckluft für die Filmkühlung zuzuführen. Die Bohrungen befinden sich im Winkelabstand von 90° um das Gehäuse des Turbinenabschnittes. Der Nutkanal von der ersten Turbinenstufe wird vom Anschlussflansch des Einlasses abgeschlossen. Bei der zweiten Turbinenstufe wird der Nutkanal vom Einlassstutzen der Turbine abgeschlossen. Als letzte Neuerung wurde noch ein Verteilungssystem aus Kupferrohren geschaffen, das eine gleichmäßige Verteilung der Frischluft zulässt. Die Zuleitungen sind ebenfalls in einem 90° Winkelversatz um das angepasste Gehäuse des Turbinenabschnittes angebracht. Die Verbindungen zwischen Zuleitung und Gehäuseanschluss wurden mit einem Anschweißnippel und Schneidringverschraubung realisiert. Dabei versorgen jeweils vier Zuleitungen jede Stufe des Turbinenabschnittes vom TCS.

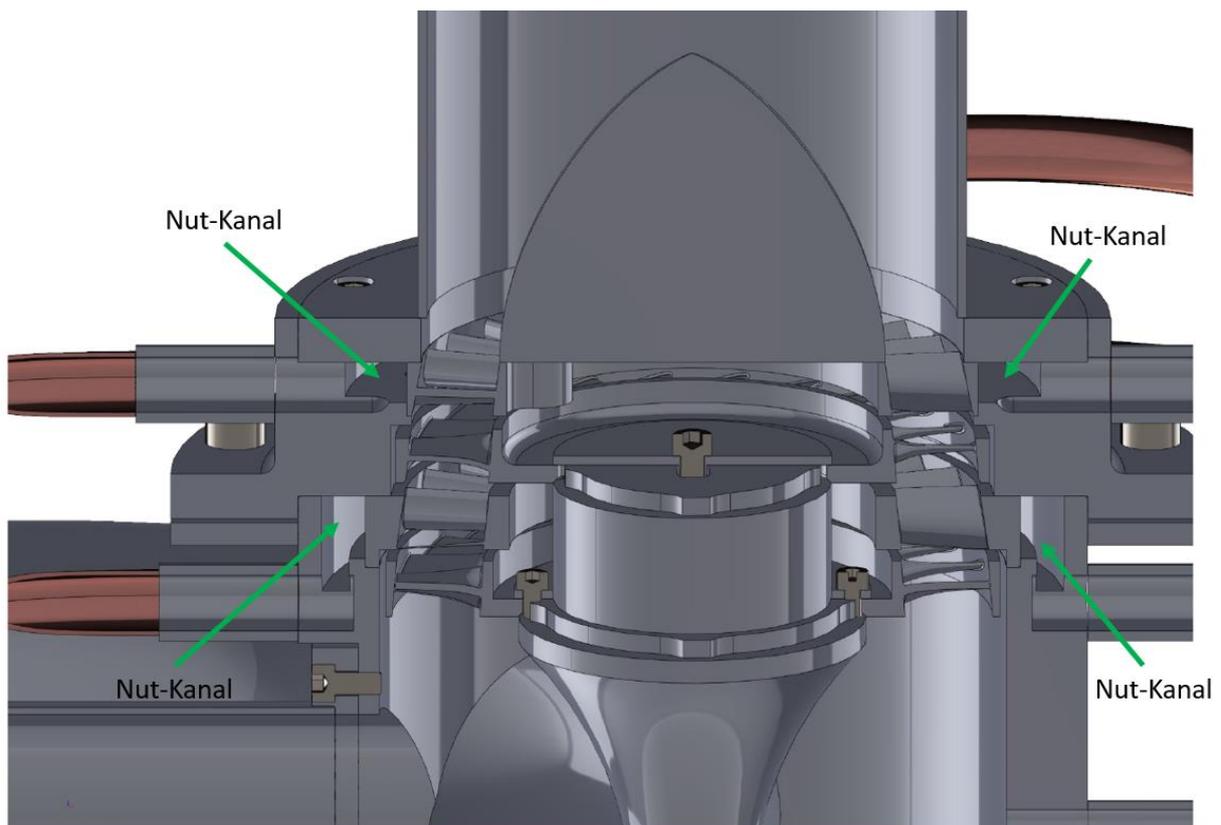


Abbildung 35 Darstellung der Nutkanäle zur Verteilung der Frischluft für die Kühlbohrungen der Filmkühlung auf den Leit- und Laufrädern der TCS-Turbinenstufen

Die Gestaltung innerhalb einer Turbinenstufe sorgt dafür, dass die Kühlluft in den Kanälen des Leitrades geleitet wird. Beim Durchströmen des Leitwerkes werden zum einen die Kühlbohrungen auf den Schaufeln der Leitrad-schaufeln versorgt. Der restliche Teil der Kühlluft wird in eine zentrale Versorgungskammer für die Versorgung der Laufräder geleitet. Diese Stelle ist besonders kritisch bei der Versorgung, da hier bewegte an ruhenden Teilen liegen. Durch die Wärmeausdehnung während

des Betriebs kann es hier zu kritischen Leckagen kommen. Beim Testbetrieb des TCS muss hier besonderes Augenmerk auf die Funktion gelegt werden. Zusätzlich sollten hier die Erkenntnisse von [4] berücksichtigt werden. Aus den Untersuchungen von [4] geht hervor, dass Ablagerungen besonders in den Leiträdern einer Turbine dominant sind. Infolgedessen könnte nur die Integration einer Filmkühlung auf den Leiträdern des TCS relevant werden. Durch das Wegfallen dieses zusätzlichen technischen Aufwandes könnten zum einen Kosten bei der Fertigung des TCS durch die Einbringung von Kühlbohrungen entfallen. Zusätzlich ist mit weniger Funktionen das technische Ausfallrisiko geringer.

Neben der Integration von nötigen Komponenten der Filmkühlung wurden zusätzlich noch Optimierungen an bestehenden Bauteilen durchgeführt. Insgesamt wurden drei Segmente des TCS optimiert. Die durchgeführten Optimierungen sind in Abbildung 36 dargestellt. Bei der Integration der Kühlkanäle der zweiten Turbinenstufe wurde zusätzlich eine Anpassung des Auslasses vom TCS vorgenommen. Eine Schnittansicht der Anpassung des Auslasses ist in Abbildung 36 auf der linken Seite dargestellt. Zum zentralen Auslass des Turbinenabschnittes wurden in einem  $60^\circ$  Winkel zusätzliche Auslassquerschnitte in das Gehäuse integriert. Ausgehend von den zusätzlichen Auslässen wurden Ableitungen gestaltet, die nach einem  $90^\circ$  Krümmer in einen gemeinsamen Auslass enden. Nach der Zusammenführung wurde noch ein DN 100 Flansch angebracht, um die Gesamtanlage modular in die bestehende Anlage zu integrieren.

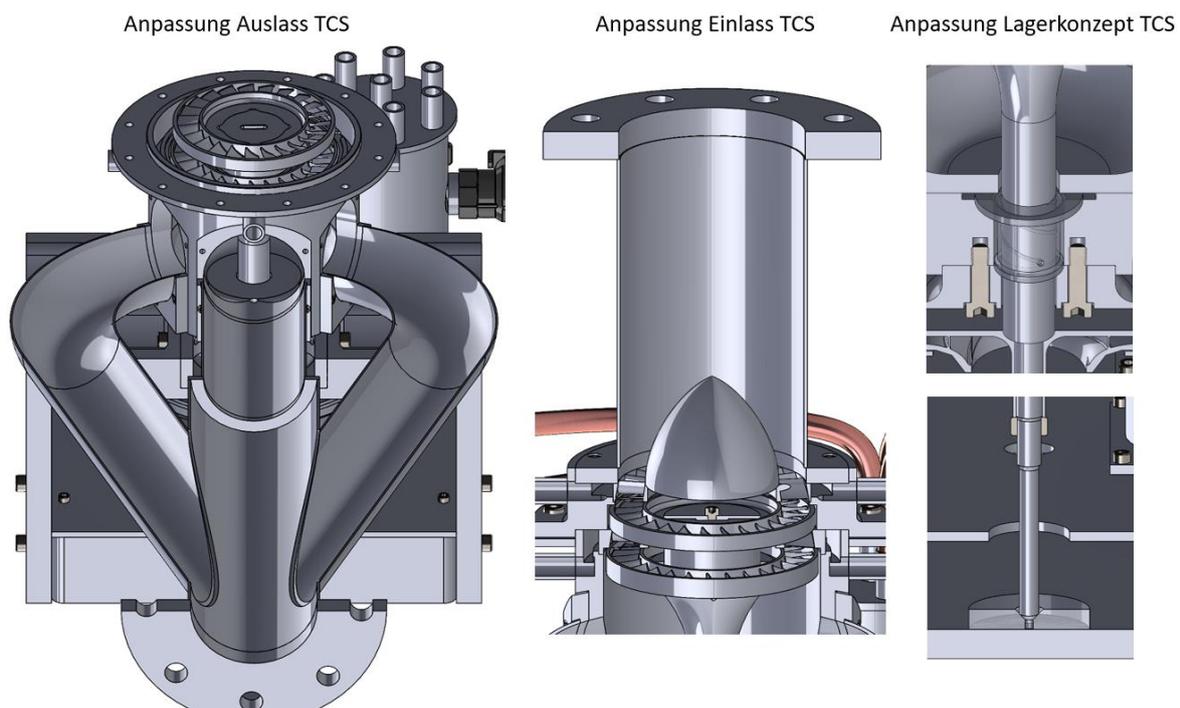


Abbildung 36 Darstellung der konstruktiven Überarbeitung des TCS

Die Überarbeitung des Einlasses wurde zusammen mit der Integration des Nutkanals für die erste Turbinenstufe des TCS vorgenommen. Bei der Integration des Nutkanals wurde die bereits vorhandene Kontaktfläche des Anschlussflansches zur oberen Schließung des Kanals verwendet. In diesem Zusammenhang wurde zusätzlich eine Verlängerung des Einlassrohres vorgenommen. Mit der Verlängerung des Einlassrohres wurde eine zusätzliche Beruhigung des Gasstromes am Einlass des TCS integriert. Weiter wurde am Einlass ein genormter Flansch mit DN100 angebracht, um auch hier eine modulare Integration des TCS zu ermöglichen.

Problem in der vorherigen Version des TCS war eine hohe Last kombiniert aus Radial- und Axialkräften im TCS. Zusätzlich war das Lager einer hohen thermischen Last durch die Nähe zum Turbinenabschnitt ausgesetzt. Ursprünglicher Plan war deswegen ein Luftlager in den zentralen Bereich des TCS zu integrieren, um eine Kühlung des Lagerbereichs und Erhöhung der Standzeit durch reduzierten Lagerkontakt herbeizuführen. Im Laufe des Projektes zeigte sich aber die Schwierigkeit eines unruhigen Lagerlaufs bei wechselnden Prozessparametern. Aus diesem Grund wurde eine Umgestaltung der Kraftaufnahme von Axial- und Radialkraft in zwei Lagerabschnitten vorgenommen. Die Anpassung des Lagerkonzeptes ist auf der linken Seite in Abbildung 36 zu sehen. In der oberen Hälfte von Abbildung 36 ist das Radiallager des TCS dargestellt. Das Lager besteht aus einer Lagerbuchse mit eingearbeiteten Schmierkanälen. Zwischen Lagerfläche und Lagersitz befindet sich zusätzlich ein Zwischenraum, in dem der Schmierstoff verteilt werden kann. Damit der Schmierstoff die Lagerfläche zwischen Buchse und Welle erreicht, sind zusätzlich Bohrungen zur Versorgung eingearbeitet. Die axiale Lagerkraft wird im neuen Konzept von einem Lagersitz unterhalb des Verdichters aufgenommen. Der Lagersitz ist auf der linken Seite in Abbildung 36 unten dargestellt. Damit während des Betriebs immer eine ausreichende Schmierung des Kontaktes vorliegt, befindet sich der Sitz in einer Wanne unter dem Aufbau des TCS. Während des Betriebs ist die Wanne mit Schmierstoff gefüllt, womit das Lager immer in einem geschmierten Zustand vorliegt. Zusätzlich sorgt der Schmierstoff für eine aktive Abfuhr der Wärme, was im vorherigen Konzept eine große Herausforderung darstellte. Zusätzliche Änderungen des TCS umfassen die Veränderung von Bauteilen konzipiert für den 3D-Druck zu Bauteilen für eine spanende Herstellung, um Kosten zu senken. Ursprünglich war auch die Fertigung des TCS im Rahmen dieses Vorprojektes angedacht. Da die tatsächlichen die erwarteten Kosten überstiegen, wird die Fertigung des TCS mit ins Hauptprojekt übertragen.

## 4 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Im aktuellen Vorprojekt wurde eine Filmkühlung als Schutzmaßnahme gegenüber Partikelablagerung erfolgreich in das bestehende Modell des TCS (Turbo-Compound-System) integriert. Für die Integration der Filmkühlung als Schutzmaßnahme gegenüber Partikelablagerungen wurde diese Anwendung zuerst an einer realen Einzelschaufel getestet, um den experimentellen Nachweis der Funktionalität zu liefern. Dafür wurden Schaufelschnitte aus der Anwendung des TCS entnommen und Testschaufeln geschaffen, auf denen typische Ausführungen einer Filmkühlung integriert wurden. Eine Vorauswahl und Analyse der Strömungsmuster der Schaufeln wurde durch eine CFD-Studie vorgenommen. Aus den Erkenntnissen der CFD-Studie wurden die Schaufelsätze mit einem Umlenkwinkel von  $\Delta\beta = 40,6^\circ$  ausgewählt. Für die Untersuchung der aus der CFD-Studie ausgewählten Testschaufeln wurde ein Versuchsstand kreiert, welcher die Bedingungen im späteren TCS nachstellt. Der Versuchsstand wurde so konzipiert, dass er relevante Parameter wie Gastemperatur, Gasgeschwindigkeit und Partikelgehalt im Gasstrom der späteren Anwendung nachempfendet. Gleichzeitig wurden die ausgewählten Testschaufeln mit einem spanenden Fertigungsverfahren aus 1.2343 hergestellt und nitriert. Für die Versuchsdurchführung wurde eine Testtasche erstellt, welche der Beschaffenheit der späteren Anwendung entspricht. Nach der Versuchsdurchführung wurden die Schaufeln entnommen und zuerst visuell begutachtet und mit den CFD-Simulationen verglichen. Anschließend wurden Proben entnommen und einer REM-EDX-Analyse unterzogen, um Ablagerungstendenzen festzustellen. Die Erkenntnisse wurden in den Auslegungsablauf der TCS-Auslegung integriert und sind in [6] zu finden.

Die CFD-Studien haben gezeigt, dass bei der Ausbildung des Kühlfilms vor allem eine Umlenkung von  $\Delta\beta = 40,6^\circ$  begünstigt wird. Bei dieser Gegebenheit ist deswegen die beste Schutzwirkung zu erwarten. Zusätzlich zeigte die Variation mit gefächelter Bohrung die beste Schutzwirkung sowohl in den CFD-Simulationen als auch in den Versuchen gegenüber Partikelablagerung. Frontalbohrungen schienen in diesem Kontext eher kontraproduktiv, da sie eine verstärkte Durchmischung der Strömung hervorriefen und damit den Partikeltransport zur Oberfläche der Schaufel begünstigten. Auch zeigten

in diesen Zusammenhang niedrige Impulsverhältnisse einen positiven Effekt auf die Reduzierung der Ablagerungstendenz auf der Druckseite der Turbinenschaufel. Eine starke Kühlströmung sorgt damit nicht für ein Freiblasen der Schaufel, sondern sorgt eher für einen verstärkten Partikeltransport zur Oberfläche der Schaufel. Insgesamt ist die Filmkühlung eine vielversprechende Anwendung um die Betriebszeit des TCS mit einem festen Brennstoff zu verlängern.

Nach der Untersuchung der Filmkühlung an der Einzelschaufel wurden die Erkenntnisse auf den Turbinenstufen des bestehenden TCS angewandt. Aus Fertigungsgründen wurden dafür Bohrungen mit einem lateralen Öffnungswinkel von  $\beta = 10^\circ$  auf den Schaufeln des TCS integriert. Nach der Integration wurden weiter im Gehäuse des TCS Luftzuführungen geschaffen, um die Filmkühlung als Schutzmechanismus zu versorgen. Zusätzlich wurde ein Druckspeicher mit Verteilersystem für die Zuführung der benötigten Luft konstruiert. Das Lagersystem des TCS wurde ebenfalls angepasst. Das hochbelastete Lager zwischen Verdichter und Turbine ist jetzt rein für eine radiale Kraftaufnahme ausgelegt, um die Standzeit zu erhöhen. Der axiale Schub wird jetzt von einer Lagerbuchse in der Grundplatte mit Ölfüllstand des TCS aufgenommen. Eine aktive Schmierung des Lagers ist damit nicht mehr nötig. Das Ergebnis der konstruktiven Änderungen des TCS ist in Abbildung 34 dargestellt. Insgesamt wurde damit erfolgreich das TCS für die Integration einer Filmkühlung angepasst. Zusätzlich wurden konstruktive Schwächen aus der Vorgängerversion behoben.

Konsequent, nach der Schaffung der Konstruktion, ist der nächste Schritt die Fertigung des TCS. Daraufaufgehend sollte das TCS in Zusammenspiel mit allen anderen Bestandteilen der Demonstrationsanlage (Verdichter, Wirbelschicht, Zyklon und Brennkammer) in Betrieb genommen und unter den realen Verfahrensbedingungen getestet werden. Aufbauend aus den Erkenntnissen sind Optimierungen an kritischen Bauteilen, wie z.B. dem Verdichter oder neuen Lager vorgesehen, um die Effizienz des gesamten TC<sup>2</sup>-Verfahrens zu optimieren.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] NAGEL, Torsten: *Verfahren zur Nutzung von Biomasse zur Erzeugung von elektrischer Energie und Wärmebereitstellung durch Pyrolyse; Vergasung und Verbrennung und zur Umwandlung von Wärmeenergie in elektrischer Energie*. Anmeldendr. 14758280.3. 25.05.2016. Veröffentlichungsnr. WO2015/007273
- [2] THIEL, Nina Maria: *Entwicklung eines Verfahrens zur dezentralen Nutzung biogener Reststoffe*. Technische Universität Dresden, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik. Dissertation. 2018
- [3] BUNKER, Ronald S.: *A Review of Shaped Hole Turbine Film-Cooling Technology*. In: *Journal of Heat Transfer* 127 (2005), Nr. 4, S. 441–453
- [4] RAGLAND, K. W. ; MISRA, M. K. ; AERTS, D. J. ; PALMER, C. A.: *Ash Deposition in a Wood-Fired Gas Turbine*. In: *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 117 (1995), Nr. 3, S. 509–512
- [5] SPIRO, Clifford L. ; CHEN, C. C. ; GENE KIMURA, S. ; LAVIGNE, Raymond G. ; SCHIELDS, Paul W.: *Deposit remediation in coal-fired gas turbines through the use of additives*. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 16 (1990), Nr. 4, S. 213–220
- [6] WUNDER, Luis ; BERNHARDT, Daniel ; BECKMANN, Michael: *Comparison of Ash Deposition Models in Gas Turbine Blade Rows for Alternative Solid Fuels With Low Ash Melting Temperatures*. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2024: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2024) : June 24-28, 2024, London, United Kingdom*. Little Falls, NJ, USA : The American Society of Mechanical Engineers, 2024