POTENZIALE DURCH DEN EINSATZ VON RAPID PROTOTYPING IN DER BRENNKAMMERENTWICKLUNG

A.-S. Söhngen, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Antriebstechnik, Linder Höhe, 51147 Köln, DE

Zusammenfassung

Der Einsatz von Magerbrennkammern in der Flugzeugantriebstechnik der aktuell in der Forschung verfolgt wird erfordert eine effektivere Kühlung der Brennkammerwände. Die bisherige Lösung durch Effusionsbohrungen soll optimiert werden indem die Film- und Konvektive Kühlung der Brennkammerwand durch komplexe Innenstrukturen erhöht werden. Diese Innenstrukturen sind mit herkömmlichen Fertigungsmethoden nicht herstellbar, weshalb hierbei das Laserschmelzverfahren verwendet wird. Es wird im Folgenden untersucht wie sich die Bauteile in Geometriegenauigkeit und Kühleffektivität im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren und Konstruktionen verhalten.

1 EINLEITUNG

Aus Anforderungen an zukünftige Triebwerke, der Steigerung des Wirkungsgrades und gleichzeitiger Schadstoffminimierung, resultieren starke Änderungen in der Brennkammerbauweise. Es wird in Magerbrennkammern mehr Luft durch den Brenner geleitet, sodass weniger Luft für die Kühlung der Brennkammer zu Verfügung steht. Als Folge muss die Kühleffektivität der Flammrohrwände steigen. Erreicht werden kann dies durch den Einsatz innovativer Wandschindelgeometrien, welche mit dem Laserschmelzverfahren schnell und kostengünstig hergestellt werden können. Ziel ist es die Potenziale dieses Rapid Prototyping Verfahrens aufzuzeigen.

2 FERTIGUNGSVERFAHREN

Das Laserschmelzen ist ein generatives Fertigungsverfahren. Die Werkstücke werden durch das Hinzufügen von Material aufgebaut. Die Formgebung erfolgt flächig auf der x, y- Ebene und wird dann schichtweise nach oben in die dritte Dimension (z-Richtung) aufgebaut. Metallpulver wird schichtweise durch eine Förderlippe auf einer Hubplatte aufgetragen, welche sich je nach Bedarf nach oben oder unten verschiebt. Das über STL eingespeiste Bauteil wird in mathematische Schichten aufgeteilt, die von unten her Schicht für Schicht durch einen Laser punktuell aufgeschmolzen werden und sich im Anschluss zu dem kompletten Bauteil verfestigen.

Die Vorteile des Verfahrens sind zum einen die direkt aus den Computerdaten herzustellenden Bauteile, für die keine weiteren Werkzeuge nötig sind. Zum anderen kann das Pulver, welches nicht eingeschmolzen worden ist, wieder zurückgewonnen und weiterverarbeitet werden. Es entsteht somit kein Materialverlust wie bei herkömmlichen Fertigungsverfahren. Die Modelle sind danach meist sofort einsetzbar, wobei sie auch noch nachbearbeitet werden können. Die Porosität der Bauteile beträgt etwa 0,02%, was vernachlässigbar gering ist.

Nachteile entstehen aus den verfahrenstechnischen Gegebenheiten. Die Genauigkeit ist von der Laserdicke, der Pulvergröße und der Schichtdicke abhängig. Die Größe der Bauteile ist auf den Bauraum der Maschine beschränkt. Zudem neigen die Produkte zum Wachsen, da angrenzende Partikel mit aufgeschmolzen werden und an der eigentlichen Form haften bleiben. Das Reinigen von internen Räumen von überschüssigem Metallpulver muss konstruktiv bedacht werden.

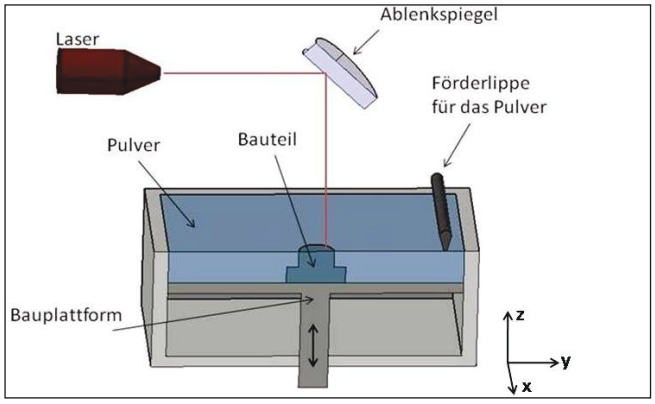

BILD 1. Schematische Darstellung des Bauprozesses

2.1 Konstruktive Anforderungen

Bei der Konstruktion von Bauteilen, die mittels Laserschmelz-Verfahren gefertigt werden sollen, muss einiges beachtet werden. Allgemein gilt: Je komplexer die Form, desto besser. Es sollte, soweit möglich, so wenig Masse wie nötig verwendet werden. Es ist nicht rentabel ein Bauteil aus Vollmaterial zu konstruieren, da dies Verschwendung sowohl von Material als auch von Produktionszeit wäre. Einzelteile sollten, wenn möglich, immer horizontal aufgebaut werden. Das vermindert die Produktionszeit. Auch sollte bei der Wahl der Position beachtet werden, dass die größte Stabilität auf der z-Achse

liegt. Bei größeren Strukturen ist es sinnvoll Rundungen zu vermeiden, da diese zu einer Verlängerung der Rechenzeit beim Einlesen der Konstruktion führen. Es ist wichtig, bei innenliegenden Hohlräumen eine Öffnung für die Entfernung des nicht verarbeiteten Pulvers vorzusehen. Auch muss bedacht werden, ob etwaige Stützkonstruktionen in der Nachbereitung entfernt werden müssen, um dementsprechend den dafür notwendigen Bearbeitungsraum vorzusehen. Die möglichen Wanddicken sind abhängig vom Material, aber allgemein sollten Wände mit einer geringeren Wanddicke als 0,3mm nicht ohne Stützkonstruktion gebaut werden. Auch bei Bohrungen ist es materialabhängig, wie eng sie gefertigt werden können. Man sollte aber grundsätzlich versuchen, sie immer in z-Richtung laufen zu lassen, da es sonst zum Stufeneffekt kommt. Dieser Effekt basiert auf den Fertigungsbedingungen. Die Bauteile werden Schicht für Schicht aufgebaut. Liegt eine Bohrung horizontal zur Schichtebene, zeichnet sich die Rundung der Bohrung durch Stufen in Größe der Schichtdicke aus. Die Schichtdicke liegt zwischen 20µm und 50µm. Wenn aufgrund der Ungenauigkeit eine Nachbearbeitung nötig ist, sollten die Löcher etwas kleiner gefertigt werden, um diese zu ermöglichen. Bei vertikalen Löchern mit einem Durchmesser größer als 8mm sollten Stützkonstruktionen vorgesehen werden. Überhänge müssen bei einem Winkel kleiner als 35° ebenfalls mit Stützkonstruktionen aufgebaut werden.

3 KONSTRUKTIONEN

Der Schwerpunkt dieses Papers liegt auf der Tauglichkeit des Laserschmelzverfahrens für Brennkammereinsätze. Ziel ist es, einen Weg zu finden, die Wände optimal zu kühlen. Grundsätzlich kann dies durch die bessere Verteilung der Luft auf der Brennkammerinnenwand als Kühlfilm erreicht werden. Dabei dürfen keine heißen Stellen oder Stellen, an denen die Wand großen Temperaturschwankungen ausgesetzt ist, entstehen. Bei dem Einsatz von Kühlbohrungen kann der Film annähernd gleichmäßig erzeugt werden, indem die Anordnung sinnvoll vorgenommen wird. Die Konstruktion der Bohrungsgeometrie muss ebenfalls sinnvoll gewählt werden. Die Kühlung durch den Kühlungsfilm kann von konvektiver Kühlung unterstützt werden. Die Kühlung innerhalb der Wand wird verbessert, wenn die gekühlte Fläche des Kanals größer ist.

Es werden verschiedene Kühlsysteme entwickelt, welche diese Ideen aufnehmen und für das Fertigungsverfahren entsprechend konstruiert werden. Diese werden, wie im Folgenden beschrieben, getestet.

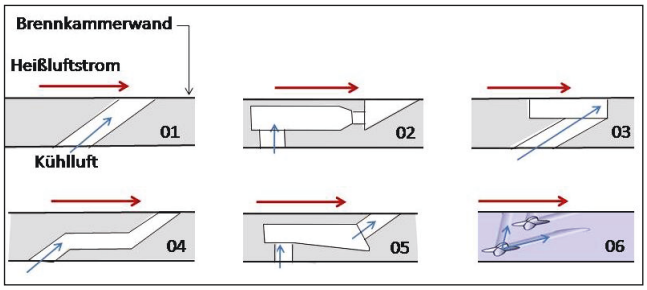

BILD 2. Skizze der verschiedenen Konzepte

Konzepte:

1) Effusionsbohrung
2) Luftverteilerspalt
3) Grabenkonstruktion
4) Langlochbohrung
5) Kammerwand
6) V-Bohrung

Die Effusionsbohrungen dienen als Referenz zu den anderen Konstruktionen, um die Verbesserung der Kühleffektivität durch die verschiedenen Konstruktionen zu testen. Es werden zwei Platten mit dieser Bohrungsgeometrie gefertigt. Bei der zweiten Platte werden die Bohrungen allerdings mit einem herkömmlichen Fertigungsverfahren hergestellt. Somit ist ein direkter Vergleich von herkömmlichen Fertigungsverfahren zum Laserschmelzen möglich. Als Vergleichsverfahren wird das Laserbohren gewählt.

Die Prüfschindeln, die bei den Versuchen eingesetzt werden, werden aus Edelstahl (1.4404) gefertigt. In der Teststrecke werden die Versuche bei max. 400°C durchgeführt. Es werden fünf verschiedene Lochgeometrien getestet, welche mit anderen Fertigungsverfahren nur schwer herzustellen sind. Diese sollen mithilfe der Versuche auf ihre Kühleffektivität getestet werden. Die Bohrungsaustritte sind, soweit möglich, identisch angeordnet. Die Bohrungsanzahl ist ebenfalls identisch.

4 PRÜFSTAND

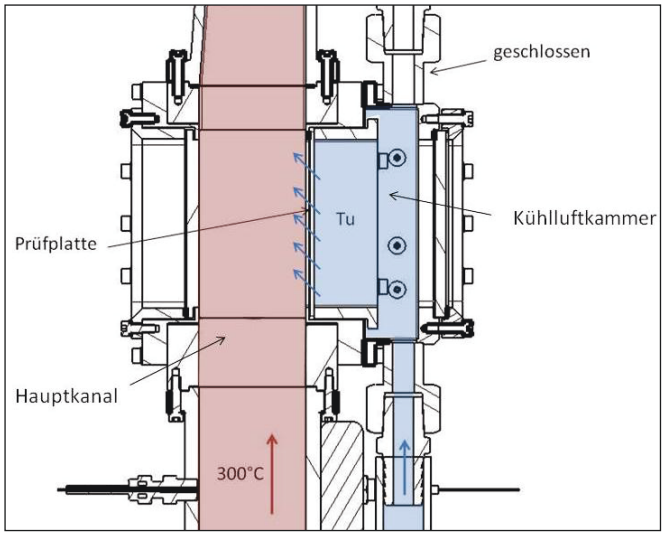

BILD 3. Darstellung des Versuchssaufbaus

Die Prüfstrecke wird mit Heißluft bei 300°C- 400°C betrieben. Es findet keine Verbrennung statt. Dies hat den Vorteil, dass weniger Variablen die Messergebnisse beeinflussen. Durch den Hauptkanal strömt die von Lufterhitzern erwärmte Luft und in eine angebaute Kammer wird die Kühlungsluft eingebracht. Der Austritt aus der Kühlluftammer wird verschlossen und zwischen Kühlluftkammer und Heißluftkanal werden die zu prüfenden Schindeln mit verschiedenen Kühlluftbohrungen eingebaut.

Durch diese Bohrungen gelangt die Kühlungsluft in den Hauptkanal und soll dort einen Kühlungsfilm ausbilden sowie die Schindel von innen her kühlen. In der Kühlluftkammer sind Anschlüsse vorgesehen, die es ermöglichen, Temperatur und Druck zu messen. Des Weiteren wird die Kühlluftzufuhr durch ein Massenstromkontrollgerät geregelt und gemessen. Die Kühleffektivität der verschiedenen Bohrungen wird mittels einer Infrarotkamera erfasst.

5 ERGEBNISSE

Um die Geometriegenauigkeit der mittels Laserschmelzen hergestellten Prüflinge zu testen, werden zwei Versuche durchgeführt. Dabei handelt es sich um den Wasserstrahltest, welcher den Durchlass der Bohrungen sichtbar macht. Des Weiteren werden die Platten aufgeschnitten, um die tatsächliche Innengeometrie zu vermessen. Die Versuche sollen zeigen, ob die gewünschte Geometrie mittels Laserschmelzen tatsächlich fehlerfrei zu fertigen ist.

Um die Kühleffektivität der verschiedenen Konzepte beurteilen zu können werden die durch die Infrarotkamera aufgenommenen Wärmebilder ausgewertet.

5.1 Geometriegenauigkeit

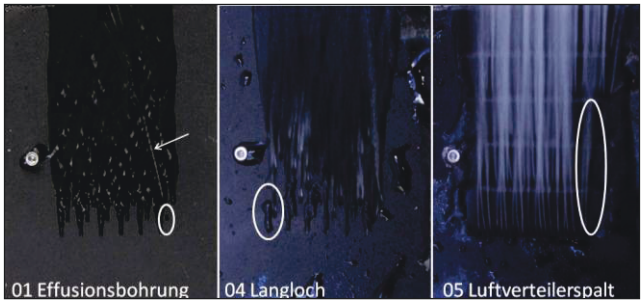

BILD 4. Wasserstrahltest

Beim Wasserstrahltest können zwei Aspekte beobachten werden. Zum einen werden dabei verstopfte Bohrungen sichtbar gemacht, zum anderen kann dabei ein erster Eindruck über das Ausströmungsverhalten gewonnen werden. In BILD 4 ist der Bereich gekennzeichnet, in dem kein Wasser aus den Bohrungen austritt. Die zugesetzten Bohrungen wirken sich auch auf die Kühlleistung aus. Bei den Effusionsbohrungen sind zwar alle Bohrungen durchlässig, allerdings ist bei einer Bohrung ein vom restlichen Bohrungsmuster abweichendes Strömungsverhalten zu sehen. Der Wasserstrahl aus diesem Loch legt sich nicht an die Platte an, sondern hebt deutlich ab. Dies könnte durch eine abweichende Bohrungsgeometrie, die zu einer Ablenkung des Wasserstrahls führt, hervorgerufen werden. Die zugesetzten Bohrungen können durch das Nachfräsen entstanden sein oder bei der Fertigung selbst. Beim Fräsen wird ein Schmiermittel verwendet. Dieses könnte sich mit Pulverrückständen verbunden haben, klebt in der Innengeometrie und verstopft diese. Wenn die Innengeometrie direkt nach dem Laserschmelzen freigeblasen würde, könnte dieses Verkleben ausgeschlossen werden.

Um die Geometriegenauigkeit zu prüfen und die Fertigungsgenauigkeit des Verfahrens zu evaluieren, werden die Prüfschindeln zusätzlich mittels eines berührungslosen Messmikroskops optisch vermessen. Die Schindeln werden in der Mitte der Bohrung getrennt, um dann die Schnittbilder unter dem Mikroskop zu vermessen. Dabei muss allerdings die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass die Schnittbilder nicht genau in der Ebene, in der der Mittelpunkt der Bohrung liegt, geschnitten werden. Daher kann es zu Ungenauigkeiten in den Messwerten kommen. Die gesamten Bohrungen der Schindeln werden zusätzlich mit dem Messschieber vermessen und der mittlere Bohrungsdurchmesser ermittelt, um einen Vergleichswert zu den optischen Messungen zu erhalten.

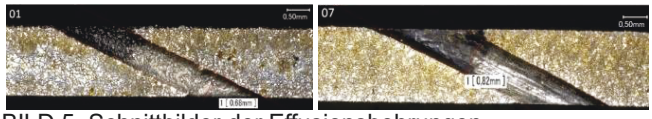

BILD 5. Schnittbilder der Effusionsbohrungen

Beim Vergleich der verschiedenen Fertigungsverfahren der Effusionsbohrungen fällt der unterschiedliche Bohrungsdurchmesser auf. Die lasergeschmolzenen Bohrungen (01) haben einen optisch gemessenen Durchmesser von etwa 0,7mm und einen direkt gemessenen mittleren Durchmesser von ebenfalls ca. 0,7mm. Bei den lasergebohrten Bohrungen (09) liegen der direkte sowie der optisch gemessene Durchmesser bei 0,8mm. Der Solldurchmesser beträgt 0,7mm. Die Werte der lasergeschweißten Bohrungen haben nur eine geringe Abweichung. Beim Laserbohren ist die Abweichung größer, was den späteren Vergleich der Verfahren hinsichtlich der Kühleffektivität erschwert. Beim Vergleich der beiden Abbildungen fällt zudem die unterschiedliche Rauigkeit in den Bohrungen auf. Die lasergebohrten Effusionsbohrungen haben, wie erwartet, eine sehr viel weniger raue Oberfläche.

In der folgenden Tabelle ist die Auflistung der gemessenen Bohrungsdurchmesser durch Messschieber(D_m), mittels Messmikroskops (Schnitt) und aus den CAD-Daten zu sehen. Auffällig sind die die V-Bohrung(07) und die Grabenkonstruktion(03). Die Bohrungen sind kleiner als im CAD vorgesehen. Dies kann daran liegen, dass die Schnittebene der Bohrungen nicht sauber in der Mitte liegt und somit das Messergebnis verfälscht wird. Es kann auch auf Fertigungsungenauigkeiten zurückzuführen sein.

	01	02	03	04	05	06	07
D_m	0.68	0.66	0.68	0.67	0.85	0.66	0.78
Schnitt	0.68	0.6	0.56	0.7	0.98	0.51	0.82
CAD	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.7	0.7

TAB 1. Bohrungsdurchmesser der versch. Schindeln

5.2 Temperaturmessungen und Kühleffektivität

Die Wandtemperatur der Prüflinge wird während der Versuche mit der Infrarot-Kamera ImageIR 8380 aufgenommen und festgehalten. Die Wandtemperaturen werden bei immer gleichem Druckverlust (3%) aufgenommen. Dies ergibt sich aus den Bedingungen in

einer realen Brennkammer, in der der Druckverlust konstruktiv vorgegeben ist. Die Temperaturbilder zeigen die Prüfschindeln von der der Brennkammer zugewandten Seite, welche durch die Heißgasströmung erwärmt und durch die Kühlluft, die aus der Kühlkammer hinter der Platte kommt, gekühlt werden. Die Heißluft strömt von unten nach oben.

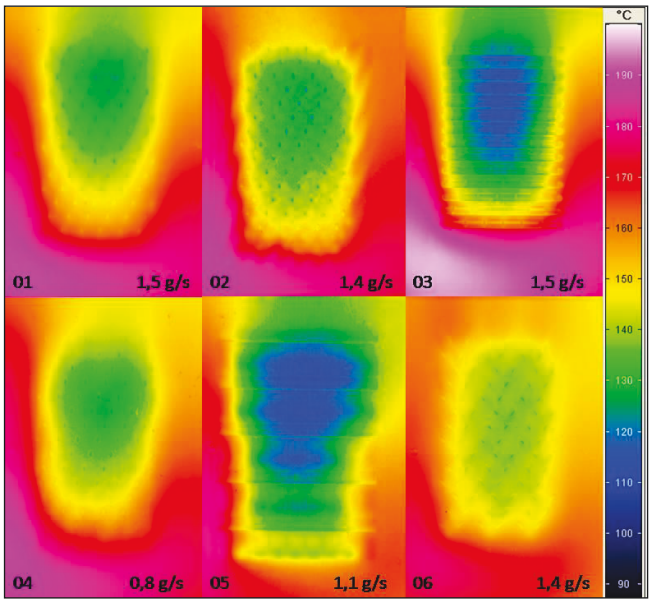

BILD 6. Temperaturaufnahmen durch IR-Kamera

Bei dem Vergleich der verschiedenen Kühlsysteme untereinander ist stromab an der Anströmkante eine unterschiedlich hohe Temperatur zu beobachten, obwohl die Vorwärmtemperatur bei allen ca. 300°C beträgt. Die Schwankungen der Vorwärmtemperatur liegen bei maximal ±4°C. Die Wandtemperatur im unteren Teil der Schindel schwankt allerdings von ca. 200°C bis ca. 150°C. Bei der Auswertung fällt auf, dass der Massenstrom der Heißluft nicht immer identisch ist. Dies kann zu unterschiedlichen Wandtemperaturen der Schindeln führen. Bei einem geringeren Massenstrom und gleichbleibenden Querschnitt sowie bei gleichbleibender Dichte wird die Geschwindigkeit ebenfalls verringert. Eine Verlangsamung der Hauptströmung von ca. 5m/s wiederum führt zu einer rechnerischen Temperaturdifferenz an der Prüflingswand von fast 20°C. Auch die Kühllufttemperatur ist von Versuch zu Versuch unterschiedlich. Bei der Betrachtung der Bilder fällt weiterhin auf, dass an der Unterkante jeder einzelnen Schindel ein Temperaturgefälle von links nach rechts entstanden ist. Ein möglicher Grund für diese Verteilung ist, dass eine der Spulen des Lufterhitzers nicht richtig funktioniert, was zu einer unterschiedlich warmen Strömung führen könnte. Das Temperaturgefälle wird daher in einem weiteren Versuch mittels eines Thermoelements direkt vor der Wand und zwei Reihen weiter in die Brennkammer hinein (z-Richtung) in Abständen von 1mm über die Länge x gemessen und festgehalten.

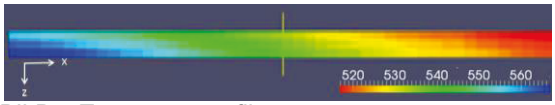

BILD 7.Temperaturprofil

Um bei der Auswertung die verfälschenden Einflüsse zu reduzieren und somit eine Vergleichbarkeit zu erreichen, werden die Daten der IR-Kamera von der Wandtemperatur in die Kühleffektivität der Schindeln umgerechnet. Die Datenmatrix der Wandtemperatur, welche durch die IR-Kamera ermittelt wird, wird dabei in die waagerechte Achse x und die senkrechte Achse y eingeteilt und für jede Temperatur $T_{x,y}$, eine passende Effektivität $\eta_{x,y}$ errechnet.

$$\eta_{x,y} = \frac{T_x - T_{x,y}}{T_x - t_{vv1}} \quad (1)$$

T_x ist der Wert der abhängig in x-Richtung dem Temperaturprofil zu entnehmen ist und bei t_{vv1} handelt es sich um die Kühllufttemperatur.

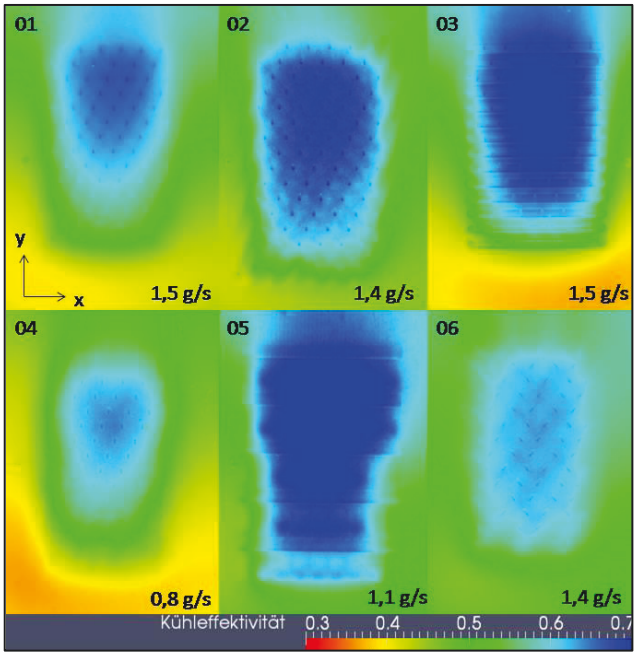

BILD 8. Darstellung der errechneten Kühleffektivität

Bei den Versuchen ergeben sich bei einem Druckverlust von 3% für die einzelnen Schindeln unterschiedliche Massenströme der Kaltluft. Die Massenströme sind bei der Darstellung oben bei jeder Schindel in der Ecke rechts unten zu sehen. Die unterschiedlichen Kaltluftmassenströme erschweren den Vergleich, da die Kühleffektivität mit steigendem Massenstrom besser wird. Ziel der Konstruktionen ist allerdings eine gute Effektivität bei geringem Massenstrom. Daher werden zunächst diejenigen Schindeln betrachtet, die einen vergleichbaren Kühlluftmassenstrom aufweisen.

Die Massenströme der Prüfschindeln mit der Kammerwand (02), der Grabenkonstruktion (03) und den V-Bohrungen (06) sind ähnlich zum Massenstrom der Effusionsbohrungen (01). Die Schindeln 02 und 03 haben eine sehr gute Kühleffektivität im Vergleich zu den Effusionsbohrungen (01). Die Effektivität dieser beiden Schindeln liegt im Bereich der Bohrungsaustritte nahezu konstant bei 0,7. Bei der Schindel 06 ist die Effektivität mit ca. 0,6 geringer als die maximal erreichte Kühleffektivität der Effusionsbohrungen. Allerdings ist die Effektivität bei den V-Bohrungen im Bereich der Bohrungen konstant, wobei die Effektivität der Effusionsbohrungen erst stromauf zunimmt.

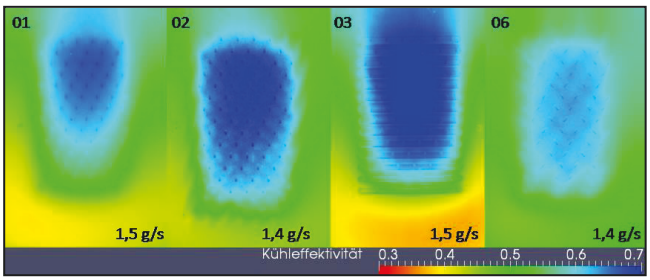

BILD 9. Vergleich von Schindel 01 zu 02,03 und 06

Bei der Schindel 02 sind die Konturen der Kammern im Innern zu sehen. Dies ist im unteren Bereich zu erkennen, in dem noch keine Bohrungsaustritte sind. Dort wird bereits durch die innenliegenden Kammern gekühlt. Der Nachlauf ist nicht sehr stark ausgeprägt. Dies zeigt, dass die Filmbildung nicht so effektiv ist. Die Kühlung wird bei dieser Schindel also hauptsächlich konvektiv erreicht.

Die Ursache der schlechten Filmbildung ist die Geometrie der Austrittsbohrungen. Die Bohrungen sind zu kurz, sodass der Winkel der Bohrung keinen Einfluss auf das Strömungsverhalten der austretenden Luft hat. Der Strahl der Kühlluft hebt ab und vermischt sich mit der Heißluft. Das unregelmäßige Ausströmverhalten ist auch bei dem Wasserstrahltest zu sehen.

Bei der Schindel mit den Grabenkonstruktionen (03) ist stromauf der Bohrungen eine hohe Kühleffektivität zu beobachten. Die Kontur der Gräben ist deutlich zu sehen. Dies liegt daran, dass sich die Gräben mit der Kühlluft füllen. Daraufhin strömt die Kühlluft mit einem geringen Impuls aus den Gräben und kann dadurch sehr viel besser von der Heißgasströmung mitgezogen werden. Dadurch bildet sich ein flächendeckender Kühlluftfilm zwischen der Heißluftströmung und der Brennkammerwand. Diese Konstruktion kühlt demnach hauptsächlich mittels Filmkühlung, was auch den kühlen Nachlauf erklärt.

Die Temperaturverteilung der Schindel mit den V-Bohrungen (08) legt die Vermutung nahe, dass die Kühlung hauptsächlich durch Konvektion stattfindet, da sich der gekühlte Bereich allein auf den Bereich der Bohrungen konzentriert. Es bildet sich kein kühler Nachlauf am oberen Teil der Schindel. Wahrscheinlich reißt der Strahl sehr bald nach dem Austritt ab, vermischt sich mit der Heißluft und vermindert somit die Kühlleistung. Dies kann vielleicht durch näher beieinander liegende Bohrungsaustritte und folglich kleineren Winkeln zwischen den Bohrungen verbessert werden. Bei den Wasserstrahlversuchen wird auch deutlich, dass die Bohrungsanordnung für diese Anwendung ungünstig ist. Durch die Länge der Bohrung ist die Konvektionskühlung allerdings verbessert.

Der Vergleich der Schindeln Effusionsbohrungen (01) und Langlochbohrung (04) wird erschwert durch die unterschiedlichen Massenströme. Die Kühleffektivität ist hier von 0,3 bis 0,6 farblich dargestellt. Die Kühleffektivität im Zentrum der Platten liegt bei den Konstruktionen bei ca. 0,6. Allerdings ist die Ausdehnung des Bereichs mit dieser Effektivität bei den Effusionsbohrungen größer. Der Bereich bei den Langlochbohrungen, in dem eine hohe Kühleffektivität festzustellen ist, hat eine asymmetrische Form. Stromauf, also im oberen Bereich der Abbildung, ist die Kühleffektivität der Effusionsbohrungen besser als bei den Langlochbohrungen. Werden allerdings die Massenströme in die Betrachtung mit einbezogen, erscheint die Langlochkonstruktion besser als die mit den Effusionsbohrungen. Eine Brennkammerkühlung mit wenig Massenstrom ist aufgrund der begrenzten Menge an zur Verfügung stehender Kühlluft besonders erwünscht. Die Kühlung der Langlochkonstruktion bei fast halb so viel Massenstrom im Vergleich zu den Effusionsbohrungen ist daher sehr gut.

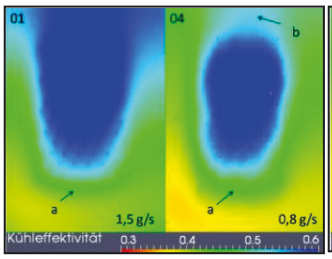

BILD 10. Vgl. 01 und 04

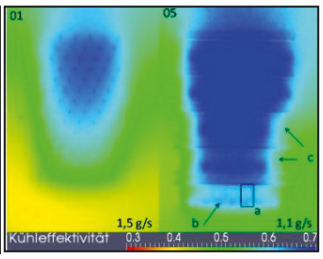

BILD 11. Vgl. 01 und 05

Im unteren Bereich der Schindeln (BILD 10a) ist zu sehen, dass sich die Konvektionskühlung innerhalb der Bohrungen bei den Langlöchern stärker auswirkt. Die Kühlwirkung der Langlöcher wirkt bereits weiter stromab als bei den Effusionsbohrungen. Bei den Langlochbohrungen ist ebenso eine Filmbildung zu beobachten, auch wenn die Auswirkung aufgrund des geringeren Massenstroms weniger stark auffällt als bei den Effusionsbohrungen (s. BILD 10b). Die Kühlung durch die Langlöcher besteht aus einem Zusammenspiel der beiden Kühlungsarten. Die asymmetrische Ausbildung des Kühlfilms ist auf zugesetzte Bohrungen, wie in den Wasserstrahltests zu beobachten, zurückzuführen.

Bei der Konstruktion mit dem Luftverteilerspalt (05) sind im unteren Bereich die innenliegenden Kammern durch die Kühlluft im Innern sichtbar (s. BILD 11a). Ebenso ist der Bereich, in dem die Kühlluft nach dem Eintritt gegen die Innenwand prallt, in BILD 11b zu erkennen. Der Bereich, in dem die Kühleffektivität 0,7 beträgt, ist sehr ausgedehnt und erstreckt sich auch stromauf über den Bereich der Bohrungsaustritte hinaus. Allerdings ist die Kühleffektivität auf der rechten Seite im unteren Bereich, welcher in BILD 11c hervorgehoben wird, geringer. Diese verringerte

Kühleffektivität ist auf zugesetzte Bohrungen (s. BILD 4) zurückzuführen. Dieses Kühlungssystem kühlt also sowohl konvektiv durch die innenliegenden Kammern, als auch durch eine gute Filmbildung, was durch den Nachlauf deutlich wird. Die Kühleffektivität der Schindel ist im Vergleich zu den Effusionsbohrungen sehr viel besser. Zudem ist der benötigte Massenstrom geringer als bei den Effusionsbohrungen.

Ein wichtiger Punkt bei der Bewertung des Laserschmelzverfahrens ist der Vergleich mit herkömmlichen Fertigungsverfahren. Die Kühleffektivität liegt bei beiden Prüfplatten mit Effusionsbohrungen bei etwa 0,6. Bei der Schindel mit den lasergebohrten Effusionsbohrungen ist im Vergleich zu der lasergeschweißten Schindel 01 zu beobachten, dass die Kühlung der lasergebohrten Bohrungen besser ist. Dies hat zwei wesentliche Gründe. Der eine Grund ist die in der theoretischen Berechnung erwähnte Wandrauigkeit. Zum anderen entsteht wieder das Problem der unterschiedlichen Massenströme aufgrund der Geometrieungenauigkeit. Die Messungen der Schnittbilder ergeben, dass die lasergebohrten Bohrungen einen größeren Durchmesser haben als den Solldurchmesser von 0,7mm. Dies erschwert den Vergleich, da der Massenstrom dadurch auf 2g/s steigt und somit zu einer besseren Kühlung führt, die nicht mit der Kühleffektivität der lasergeschweißten Bohrungen mit einem Massenstrom von 1,5g/s verglichen werden kann.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Zielsetzung konnte trotz der Schwierigkeiten bei der Vergleichbarkeit der Versuche erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Brennkammerkühlung durch komplexe Geometrien im Innern der Brennkammerwand an Effektivität gewinnen kann. Dadurch kann die Kühlung verbessert und zugleich der Kühlungsluftverbrauch verringert werden. Diese Konstruktionen lassen sich mittels Laserschmelzen aufbauen, was mit herkömmlichen Fertigungsverfahren entweder unter großen Aufwand oder gar nicht möglich wäre. Die Kombination von Filmkühlung und konvektiver Kühlung, wie es auch schon bei den Effusionsbohrungen umgesetzt wird, lässt sich durch Laserschmelzen noch optimieren. Der Einfluss der konvektiven Kühlung kann verbessert werden und somit die Filmkühlung unterstützen. Dies kann sehr gut an den getesteten Konstruktionen der Langlöcher oder auch der Luftverteilerspalte festgemacht werden. Die Konstruktion der Kammerwand hat ein ähnliches Potential, muss allerdings bei der Umsetzung des Kühlfilms verbessert werden. Bei den Konstruktionen zur Verbesserung des Kühlfilms lässt sich nur die Grabenkonstruktion im Vergleich sinnvoll beurteilen. Die Konstruktion erhöht die Kühleffektivität. Allerdings muss bei dieser Konstruktion nachgearbeitet werden. Bei dieser Umsetzung rechtfertigt der Aufwand nicht unbedingt die Anwendung des Laserschmelzverfahrens. Allerdings kann die Fertigung durch Laserschmelzen bei einer hohen Anzahl von Bohrungen durchaus rentabel sein, was wiederum für das Potential des Verfahrens für die Umsetzung von Kühlsystemen in der Brennkammerwand spricht.

Es wäre im Folgenden von Interesse zu überprüfen, wie sich die Konstruktionen unter realen Brennkammerbedingungen verhalten. Dazu sollen zum einen einige der erfolgreichen Konstruktionen aus Inconel 718 lasergeschmolzen werden. Durch dieses Fertigungsverfahren entstehen unzählige Möglichkeiten, um die Kühlung in Brennkammern zu optimieren. Es ist wichtig, diese Arbeit weiter fortzuführen, damit dieses Potential genutzt werden kann.

REFERENCES

[1] Gebhardt, Andreas. *Rapid Prototyping.* München Wien : Hanser, 1996.

[2] Aumund-Kopp, Claus und Petzoldt, Frank. *Laser sintering of parts with complex internal structures.* Bremen : Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research – IFAM, 2008.