

Otto Littmann Maschinenfabrik / Präzisionstechnik GmbH
CO₂ Littmann Strahltechnik

Oehleckring 32
22419 Hamburg
040/532960

Reduzierung der Schallemission beim Strahlen mit festem Kohlendioxid

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 25529– 21/0 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Thomas Schüler
(Otto Littmann Maschinenfabrik / Präzisionstechnik GmbH)

und

Univ.-Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann
(Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb,
Technische Universität Berlin)

Hamburg,

April 2010

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	25529	Referat	21	Fördersumme	112.000,00
----	--------------	---------	-----------	-------------	-------------------

Antragstitel **Reduzierung der Schallemission beim Strahlen mit festem Kohlendioxid**

Stichworte Schallemission, Verfahren

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
2 Jahre	18.07.2007	31.01.2010	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Otto Littmann Maschinenfabrik Präzisionmechanik GmbH	Tel	040/53296-0
		Fax	040/53296299
	Oehleckring 32 22419 Hamburg	Projektleitung Thomas Schüler	
		Bearbeiter Thomas Schüler	

Kooperationspartner Technische Universität Berlin
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
Bereich Fertigungstechnik
Sokr. PTZ 001
Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Spezifischer Nachteil des Strahlens mit festem Kohlendioxid ist die hohe Lärmbelastung. Dort, wo der mit hoher Strömungsgeschwindigkeit austretende Kernstrahl auf die ruhende Umgebungsluft trifft, werden starke Turbulenzen verursacht. Diese sind hauptverantwortlich für die Geräuschenstehung. Mit hohen Strahldrücken werden beim Trockeneisstrahlen gesundheitsschädliche Schalldruckpegel von bis zu 130 dB (A) erreicht, auch im Bereich nicht hörbarer Frequenzen treten hohe Schalldruckpegel auf. Bisherige Schutzmaßnahmen gegen Lärmemission beim Strahlen mit festem CO₂ basieren auf organisatorischen Schutzmaßnahmen durch Umhausung des gesamten Systems mit Schallschutzeinrichtungen oder durch persönliche Schutzmaßnahmen unter Verwendung von Kapselgehörschutz. In dem vorliegenden Forschungsvorhaben sollen technische Schutzmaßnahmen zur Vermeidung der Lärmstehung entwickelt und umgesetzt werden. Dadurch lassen sich die Vorteile des Verfahrens im Hinblick auf die Flexibilität und die Sublimation des Strahlmittels z. B. durch den Einsatz von In-Line-Reinigungsprozessen erschließen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zuerst werden relevante Anwendungsbereiche des Strahlens mit festem CO₂ und die einzuhaltenden Schallgrenzwerte ermittelt. Die strömungstechnische Optimierung einer Standarddüse sowie deren schalltechnische Analyse mittels akustischer Kamera stellen den ersten Schritt des technologischen Teils dieses Forschungsvorhabens dar. Ziel dabei ist es, Kenntnisse über die Mechanismen der Schallentstehung im Bereich der Strahldüsenkonstruktion bereitzustellen. Diesen wird mit entsprechenden konstruktiven Maßnahmen entgegengewirkt, ohne die Leistung der Strahldüsen signifikant herabzusetzen. Mittels CFD-Simulation werden diese Maßnahmen im Hinblick auf ihre Tauglichkeit zum Strahlen mit festem CO₂ überprüft. Nach der Bewertung und Auswahl der Düsenvarianten, werden diese mit Hilfe des Rapid Prototyping Verfahrens selektives Lasersintern (SLS) hergestellt. Mit Hilfe von Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera werden die mit den verschiedenen Strahldüsenvarianten erreichten Strahlmittelgeschwindigkeiten ermittelt und so die Ergebnisse der CFD-Simulation überprüft. Anhand von Schallpegelmessungen und Frequenzanalysen werden die entwickelten Düsen der Standarddüse gegenübergestellt und Erkenntnisse über die Schallemission einzelner Konstruktionsmerkmale gewonnen, die bei der weiteren Entwicklung von lärmreduzierten Strahldüsen von Nutzen sind. Darüber hinaus erfolgt die Überprüfung und Bewertung der Leistungsfähigkeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	2
3	Reduzierung der Schallemission beim Strahlen mit festem Kohlendioxid	5
3.1	Ermittlung relevanter Anwendungsbereiche mit entsprechend einzuhaltenden Schallgrenzwerten	5
3.2	Strömungstechnische Optimierung einer Standarddüse	6
3.3	Schalltechnische Untersuchung der Standarddüse mittels akustischer Kamera	9
3.4	Erarbeitung neuer und Übertragung relevanter Lösungsansätze auf Strahldüsen zum Strahlen mit festem CO ₂	13
3.5	Modellierung entsprechender Strahldüsen mit Lärminderungsmaßnahmen sowie CFD-Simulation	16
3.6	Herstellung der relevanten Düsenvarianten mittels selektiven Lasersinterns	21
3.7	Schallpegelmessung und Frequenzanalyse der entwickelten Strahldüsen	23
3.8	Erarbeitung und Definition standardisierter Reinigungsaufgaben	28
3.9	Durchführung von technologischen Untersuchungen	29
3.10	Vergleich der Strahldüsenvarianten hinsichtlich Abtragsleistung	33
4	Fazit	35
5	Literaturverzeichnis	36

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Strömungsgeschwindigkeiten der Standarddüse-opt. bei $p_S = 13$ bar	7
Bild 2:	Vektorfeld der Strömungsgeschwindigkeiten der Standarddüse-opt. bei $p_S = 13$ bar	8
Bild 3:	Vektorfeld der Strömungsgeschwindigkeiten der Standarddüse-opt. mit angepasstem Winkel des konvergenten Teils bei $p_S = 13$ bar	8
Bild 4:	A-bewerteter Schalldruckpegel in Abhängigkeit des Strahldruckes der Standarddüse und der Standarddüse-SLS	9
Bild 5:	A-bewerteter Schalldruckpegel in Abhängigkeit des Strahldruckes der Standarddüse-opt. im Vergleich zur Standarddüse-SLS	10
Bild 6:	Mittenfrequenzen der Oktavbänder in Abhängigkeit des Strahldruckes Standarddüse-opt. im Vergleich zur Standarddüse-SLS	11
Bild 7:	Maximaler Schalldruckpegel der Standarddüse-opt.	12
Bild 8:	Schalldruckpegel im Terzmittenband 10 kHz der Standarddüse-opt.	12
Bild 9:	Prinzipdarstellung zur Erzeugung eines Mantelstrahl nach dem Ejektorprinzip	14
Bild 10:	Lärmreduzierungskonzepte der Düsenaustrittsöffnung	14
Bild 11:	Variierte Durchmesser der Mäanderdüsen	16
Bild 12:	Strömungsgeschwindigkeiten der Mäanderdüsen bei $p_S = 13$ bar	18
Bild 13:	Strömungsgeschwindigkeiten der Chevrongdüsen bei $p_S = 13$ bar	19
Bild 14:	Strömungsgeschwindigkeiten beim Einsatz von Ejektoren bei $p_S = 13$ bar	20
Bild 15:	Strahldüsen mit Lärmreduzierungskonzepten, hergestellt mit dem selektiven Lasersintern	22
Bild 16:	A-bewerteter Schalldruckpegel in Abhängigkeit vom Strahldruck der Düsen mit Lärmreduzierungsmaßnahme im Vergleich zur Standarddüse-SLS	24
Bild 17:	A-bewerteter Schalldruckpegel in Abhängigkeit vom Strahldruck der Düsen mit Lärmreduzierungsmaßnahme und Ejektor im Vergleich zur Standarddüse-SLS	25
Bild 18:	Schallspektrum der Düsen mit Lärmreduzierungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei $p_S = 7$ bar	25
Bild 19:	Schallspektrum der Düsen mit Lärmreduzierungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei $p_S = 10$ bar	26

Bild 20:	Schallspektrum der Düsen mit Lärminderungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei einem $p_S = 13$ bar	27
Bild 21:	Abgetragene Masse in Abhängigkeit vom Strahldruck der Düsen mit Lärminderungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei Transportdruck $p_T = 2$ bar	30
Bild 22:	Abgetragene Masse in Abhängigkeit vom Strahldruck der Düsen mit Lärminderungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei Transportdruck $p_T = 4$ bar	31
Bild 23:	Abgetragene Masse in Abhängigkeit vom Strahldruck der Düsen mit Lärminderungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei Transportdruck $p_T = 6$ bar	32
Bild 24:	Vergleich der relevanten Strahldüsen hinsichtlich maximalen Schallpegel und Abtragsleistung in Abhängigkeit vom Strahldruck bei $p_T = 2$ bar	33
Bild 25:	Vergleich der relevanten Strahldüsen hinsichtlich maximalen Schallpegel und Abtragsleistung in Abhängigkeit vom Strahldruck bei $p_T = 4$ bar	34
Bild 26:	Vergleich der relevanten Strahldüsen hinsichtlich maximalen Schallpegel und Abtragsleistung in Abhängigkeit vom Strahldruck bei $p_T = 6$ bar	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Varierte Parameter der Mäanderdüse	16
Tabelle 2:	Verwendete Parametereinstellung	29

Formelzeichen und Abkürzungen

L_A	A-bewerteter Schalldruckpegel	dB(A)
a	Arbeitsabstand	mm
d_a	Außendurchmesser Mäanderdüse	mm
d_i	Innendurchmesser Mäanderdüse	mm
f_{mO}	Mittenfrequenz Oktavband	kHz
m_A	Abgetragene Masse Obomodulan	g
p_S	Strahl Druck	bar
p_T	Transportdruck für Trockeneispellets	bar
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	m/s
α	Strahlwinkel	°

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden Lärminderungsmaßnahmen an Strahldüsen für das Trockeneisstrahlen entwickelt. Aufgrund des weichen Strahlmittels, Trockeneis, sind hohe Strahlgeschwindigkeiten notwendig, um eine Reinigungsleistung zu erzielen, wodurch wiederum hohe Schallpegel entstehen. In einem ersten Schritt wurde die vorhandene Standardstrahldüse strömungstechnisch optimiert. Hierzu wurde die numerische Strömungssimulation (CFD) eingesetzt. Die strömungstechnisch verbesserte Düse stellte die Basis für die Umsetzung unterschiedlicher Lärminderungskonzepte dar. Es flossen sowohl Ansätze aus der Druckluft als auch aus dem Triebwerksbau in die Entwicklung ein. Bei der Umsetzung der Lärminderungskonzepte war notwendig, die Geometrien der Düsenaustrittskanten an den jeweiligen Strömungsverlauf anzupassen. In diesem Fall kam wiederum die CFD zum Einsatz. Mit Hilfe der Simulation können Parameter schnell geändert und überprüft werden. Darüber hinaus ermöglicht die Simulation die Überprüfung unterschiedlicher Geometrien und reduziert somit den Aufwand von Untersuchungen unter realen Bedingungen. Die für die Simulation notwendigen CAD-Daten konnten gleichzeitig für den Herstellungsprozess der Prototypen verwendet werden. Die Umsetzung der Lärminderungskonzepte in Strahldüsenprototypen erfolgte mit dem selektiven Lasersintern (SLS) verwendet. Mit dem SLS-Verfahren können Prototypen in einer angemessenen Zeit gefertigt werden und dabei auch komplexe Geometrien, wie beispielsweise eine Mäandergeometrie, erzeugt werden. Alle gefertigten Strahldüsenprototypen wurden der Standarddüse, welche ebenfalls mit SLS gefertigt wurde um einen realen Vergleich der Düsen zu gewährleisten, hinsichtlich Lärmemission und Abtragsleistung gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass bereits die optimierte Standarddüse einen wesentlich geringeren Schallpegel aufweist. Bei den Düsen mit Lärminderungskonzepten erwies die Chevrongeometrie als leiseste Düse. Beim Vergleich dieser beiden Düsen mit der Standarddüse-SLS, bezüglich der Abtragsleistung, wiesen die beiden erstgenannten Düsen eine deutlich höhere Abtragsleistung bei gleichzeitig reduziertem Schalldruckpegel auf. Beim Vergleich der Düsen bei gleichen Abtragsleistungen konnte so eine Reduzierung des Schalldruckpegels um mehr als 10 dB(A) erreicht werden. Des Weiteren sind die Standarddüse-opt. und die Chevrongdüse, aus fertigungstechnischer Sicht mit Abstand am einfachsten herzustellen. Die Mäanderförmigen Düsen hingegen lassen Fertigungsverfahren schnell an ihre Grenzen stoßen.

2 Einleitung

Die Industrie sucht für die Produktion und im Bereich der industriellen Aufarbeitung nach innovativen Fertigungsverfahren für die Prozesse Reinigen und Entschichten. Häufig werden für das Entfernen von Beschichtungen und Lackierungen sowie das Reinigen von Bauteilen und Anlagenkomponenten Strahlverfahren eingesetzt. Die dafür zur Verfügung stehenden Strahlsysteme unterscheiden sich in der Art des Strahlmittels und des Beschleunigungsmediums. Aus ökonomischer sowie aus ökologischer Sicht, erweisen sich bei diesen konventionellen Strahlverfahren die anfallenden Strahlmittelrückstände als zunehmend problematisch. Diese müssen meistens wiederaufbereitet oder unter Umständen sogar als Sondermüll entsorgt werden.

Als Alternative bietet sich das Strahlen mit festem Kohlendioxid (CO_2) an. Dieses ist ein Druckluftstrahlverfahren bei dem Kohlenstoffdioxid in seiner festen Form als Einwegstrahlmittel verwendet wird. Ausgangsstoff für das Strahlmittel ist flüssiges CO_2 , das als Nebenprodukt der Wasserstoff-, Ammoniak- oder Ethanolproduktion anfällt. Es trägt daher nicht zusätzlich zum Treibhauseffekt bei. Das Verfahren ist vergleichbar mit dem Sandstrahlen, jedoch wird mit dem festen Kohlendioxid ein innovatives Strahlmittel verwendet, welches mehrere vorteilhafte Eigenschaften besitzt. Bedingt durch den Sublimationseffekt des Kohlendioxids bei Umgebungsdruck, muss lediglich die abgetragene Beschichtung oder Verunreinigung beseitigt werden. Das entstandene gasförmige Kohlendioxid kann als natürlicher Bestandteil der Luft in die Atmosphäre entweichen. Speziell auf dem Gebiet der Düsen ist die Anlagentechnik noch nicht zufrieden stellend entwickelt. Zu einem technologischen Nachteil des Verfahrens gehört beispielsweise die hohe Schalleistung.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Kenntnisse über die Mechanismen der Schallentstehung im Bereich der Strahldüsenkonstruktion bereitzustellen. Diesen soll mit entsprechenden technischen Maßnahmen entgegengewirkt werden, ohne die Leistung der Strahldüsen signifikant herabzusetzen. Der zurzeit erreichte Schalldruckpegel soll abhängig vom Anwendungsbereich in einem Schallgrenzbereich bewegt werden, der für diesen Anwendungsbereich zulässig ist. Aus diesem Grund werden zuerst für das Strahlen mit festem Kohlendioxid Anwendungsbereiche mit entsprechenden Schallgrenzwerten definiert. Insbesondere im Bereich der Düsen-

technik sind die Entwicklungsarbeiten noch nicht zufrieden stellend. In diesem Zusammenhang werden schon in der ersten Phase des vorliegenden Forschungsprojektes die auf dem Markt befindlichen Standarddüsen strömungstechnisch dahin optimiert werden, dass bei gleich bleibender Abtragsleistung weniger Druckluft und ein geringerer Strahldruck benötigt und entsprechend weniger Lärm emittiert wird. Die strömungstechnisch optimierte Standarddüse wird dann mit Hilfe einer akustischen Kamera schalltechnisch analysiert, um Schallquellen während des Strahlvorgangs zu identifizieren und entsprechend gezielt darauf einzugehen. Ausgehend von der strömungstechnisch optimierten Standarddüse werden Lösungsansätze zur Schallreduzierung ausgearbeitet und umgesetzt. Die daraus entwickelten Strahldüsen werden der Standardstrahldüse schallmesstechnisch und technologisch gegenübergestellt.

Des Weiteren werden aus den Ergebnissen der schalltechnischen Analyse mit der akustischen Kamera neue Lösungsansätze erarbeitet und umgesetzt. Trotz schalltechnischer Optimierungen sollen keine signifikanten Leistungsverluste gegenüber aktuellen Standarddüsen entstehen. Um die Wirkung der einzelnen Lärminderungsmaßnahmen auf die Leistung beurteilen zu können, werden diese zunächst separat untersucht. Dazu werden die Strahldüsen mit den o. g. sowie mit den neu zu erarbeitenden spezifischen Merkmalen in Anlehnung an die Standarddüse mittels eines 3D-CAD-Programms modelliert und mit Hilfe der numerischen Fluidodynamik (CFD) simuliert. Ziel ist es, ein Eignungskriterium für die Düsenvarianten bereitzustellen, die für das Strahlen mit festem CO₂ relevant sind. Als praktisch sinnvolle Größe wird der Strömungsgeschwindigkeitsverlauf ermittelt. Aus diesen Ergebnissen wird eine Auswahl an Düsenvarianten getroffen, die für das Strahlen mit festem CO₂ geeignet sind. Darauf aufbauend wird auf eine gezielte Düsenauslegung mit einer Kombination mehrerer Lärminderungsmaßnahmen hingearbeitet.

Nach der Auswahl und Bewertung der Düsenvarianten, werden diese mit Hilfe des Rapid Prototyping Verfahrens selektives Lasersintern (SLS) hergestellt. Mit diesem Verfahren ist es möglich, verschiedene Ausführungen der zu entwickelnden Düsen sowie die Kombination der einzelnen Lärminderungsmaßnahmen zu realisieren.

Durch Schallpegelmessungen und Frequenzanalysen werden die entwickelten Düsen der Standarddüse gegenübergestellt und Erkenntnisse über Schallemissionen

einzelner Konstruktionsmerkmale gewonnen, die bei der weiteren Entwicklung von lärmreduzierten Strahldüsen von Nutzen sind. Darüber hinaus erfolgt die Überprüfung und Bewertung der Leistungsfähigkeit der entwickelten Düsen anhand der massebezogenen Abtragsleistung. Hierfür wird der Modellwerkstoff obomodulan, ein zu Platten verpresster Polyurethanschaum, verwendet.

3 Reduzierung der Schallemission beim Strahlen mit festem Kohlendioxid

3.1 Ermittlung relevanter Anwendungsbereiche mit entsprechend einzuhaltenden Schallgrenzwerten

In der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 06.02.2003 wird der Tages-Lärmexpositionspegel auf 80 dB(A) festgelegt [EU03]. In der VDI-Richtlinie 2058 Blatt 3 werden darüber hinaus unterschiedliche Schallpegelgrenzen in Abhängigkeit von der zu verrichtenden Tätigkeit definiert [VDI99]. Es wird unterschieden zwischen geistiger Tätigkeit, einfacher oder überwiegend mechanisierter Bürotätigkeit und allen sonstigen Tätigkeiten. Die letztgenannten Tätigkeiten sind durch folgende Anforderungen gekennzeichnet:

- geringe Komplexität mit entsprechendem Schwierigkeitsgrad
- wiederkehrende Arbeitsinhalte
- Signalerkennbarkeit
- Entscheidungsfindung anhand vorgegebener Alternativen

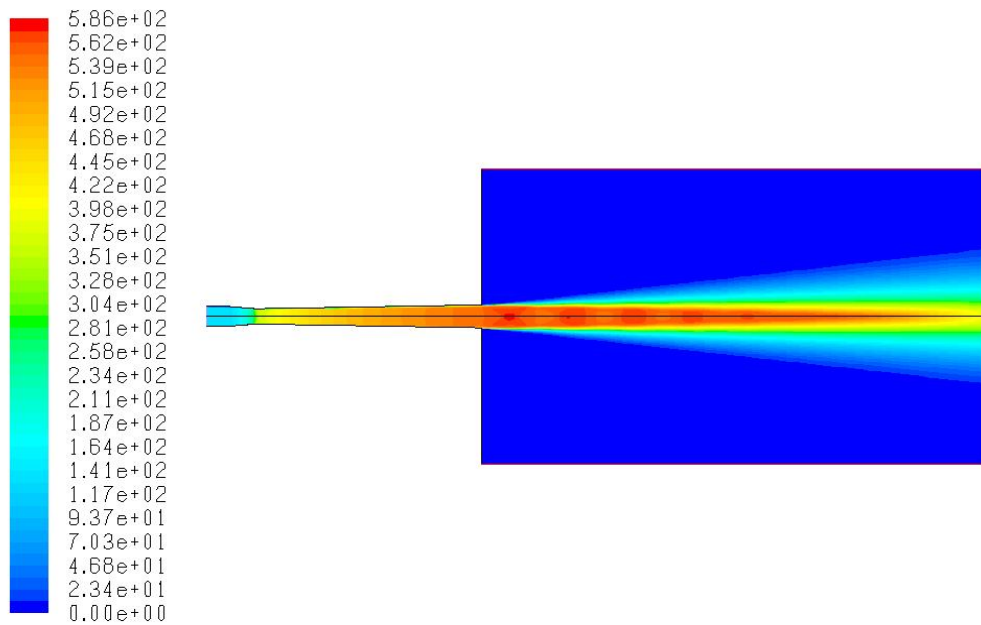
Das Reinigen mittels Trockeneisstrahlen kann zu dieser Gruppe gezählt werden. Nach der VDI Richtlinie 2058 Blatt 3 liegt der maximal zulässige Schalldruckpegel für diese Gruppe bei 85 dB(A). Hinsichtlich der Aktualität der Richtlinien wird jedoch der Wert für den maximalen Schalldruckpegel der EU-Richtlinie, 80 dB(A) verwendet. Wird dieser Schallpegel überschritten müssen persönliche Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Eine Schutzmaßnahme kann eine Schallschutzkabine sein. Bei Arbeiten innerhalb einer solchen Kabine muss ein persönlicher Gehörschutz getragen werden. Hier können sowohl Ohrstöpsel als auch Gehörschutz mit Kopfbügel verwendet werden.

3.2 Strömungstechnische Optimierung einer Standarddüse

Die vorhandenen Strahldüsen der Firma Littmann sind keine Lavaldüsen. Durch den Einsatz von Lavaldüsen kann die Strömungsgeschwindigkeit sowohl des Transportmediums Luft als auch die des Strahlmittels, hier Trockeneis, erhöht werden. Dies hat den Vorteil, dass zum Erreichen der bisherigen Geschwindigkeit weniger Energie, in diesem Fall Strahldruck, aufgewendet werden muss. Ein geringerer Strahldruck bedeutet auch einen geringeren Massenstrom. Die Strömungsgeschwindigkeit bleibt im Idealfall gleich hoch, was bedeutet dass der Geschwindigkeitsgradient zwischen dem Freistrah und der ruhenden Umgebungsluft auf dem selben Niveau wie ohne Lavaldüse liegt, es aber aufgrund des geringeren Massenstrom dennoch zu einem Absenken der Lärmemissionen kommt.

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurde eine Lavaldüse entwickelt, welche sich an der Geometrie hinsichtlich Länge, Durchmesser etc. der Standarddüse orientiert. Hierbei kam das Strömungssimulationsprogramm Fluent 6.3 zum Einsatz. Mit Hilfe der CFD (Computational Fluid Dynamic) können die entsprechenden Parameter sowohl hinsichtlich der Geometrie als auch der Randbedingungen wie Strahldruck, Temperatur etc. schnell variiert werden. Somit ist eine zügige Vorentwicklung möglich, da Zeit für die Untersuchungen an Prototypen eingespart werden kann und nur die erfolgversprechenden Varianten unter realen Bedingungen getestet werden müssen.

Im ersten Schritt wurde der optimale Winkel des konvergenten Teils der Düse ermittelt. Anschließend wurde der Winkel des divergenten Teils und der Durchmesser der engsten Stelle, in Abhängigkeit zum Strahldruck, variiert. Die so iterativ entwickelte Strahldüse wurde mit Hilfe der Strömungssimulation untersucht. Die Analyse der Simulationen erfolgte mit dem integrierten Postprozessor, welcher die zahlenmäßig vorliegenden Ergebnisse in eine bildhafte Darstellung des berechneten Strömungsgebietes transferiert. Im folgenden Bild ist der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten der optimierten Standarddüse (Standarddüse-opt.) bei einem Strahldruck, $p_s = 13$ bar dargestellt, Bild 1. Wie zu erkennen ist entstehen keinerlei Verdichtungsstöße im Freistrah. Dadurch werden Verluste verhindert und die Beschleunigung der Trockeneispellets verbessert.



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jan 12, 2008
 FLUENT 6.3 (axi, dp, dbns imp, rke)

Bild 1: Strömungsgeschwindigkeiten der Standarddüse-opt. bei $p_s = 13$ bar

In ersten Versuchen zeigte sich jedoch, dass die so entwickelte Düse unter realen Bedingungen zum Verstopfen neigt. Aus diesem Grund wurde die gesamte Strahlpistole und Düse in 3D konstruiert und anschließend eine Simulation durchgeführt. Hier zeigte sich, dass es im Eingangsbereich der Düse, markierter Bereich in Bild 2, zu starken Verwirbelungen und zu Rückströmungen kommt. Diese Wirbel führen dazu, dass die Pellets nicht abtransportiert werden und schließlich aneinander festfrieren bis die Düse letztendlich verstopft. Aus diesem Grund wurde eine weitere Iterationschleife durchlaufen und der Winkel des konvergenten Teils angepasst. Der so ermittelte Winkel für den konvergenten Teil liegt bei $4,3^\circ$. Die Ergebnisse der Simulation der optimierten Standarddüse (Standarddüse-opt.) zeigen, dass hierbei keine Rückströmung mehr auftritt, Bild 3.

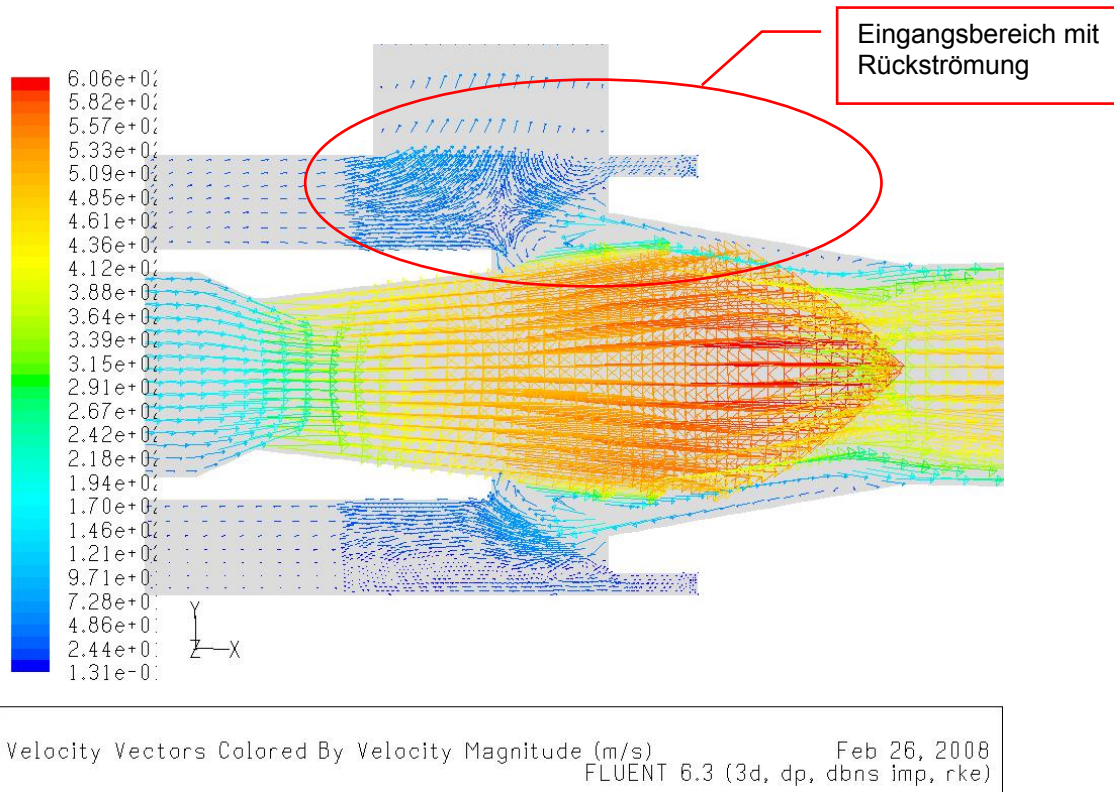


Bild 2: Vektorfeld der Strömungsgeschwindigkeiten der Standarddüse-opt. bei $p_s = 13$ bar

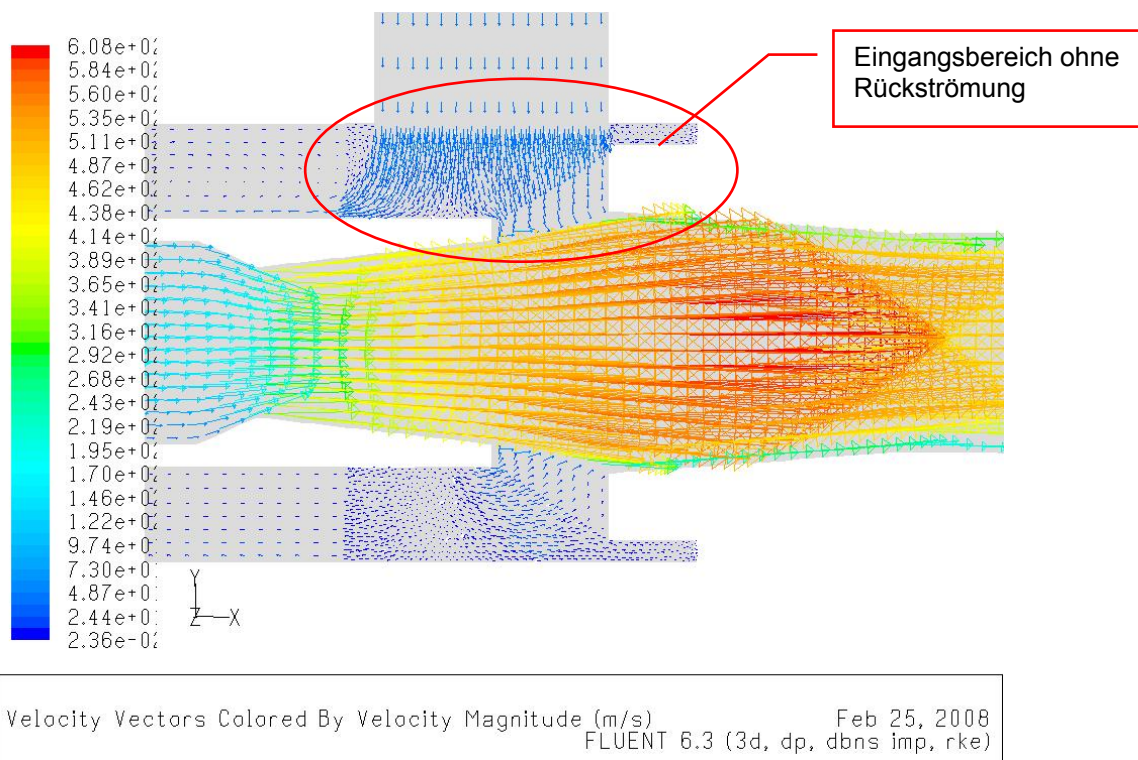


Bild 3: Vektorfeld der Strömungsgeschwindigkeiten der Standarddüse-opt. mit angepasstem Winkel des konvergenten Teils bei $p_s = 13$ bar

3.3 Schalltechnische Untersuchung der Standarddüse mittels akustischer Kamera

Die Strahldüsen mit den Lärminderungskonzepten sollen mit Hilfe des selektiven Lasersinterns (SLS) hergestellt werden. Um den Einfluss des Materials auf die Lärmemissionen abschätzen zu können, wurde zunächst ein Vergleich der Lärmemissionen zwischen der Ausgangsdüse und einem SLS-Pendant vorgenommen. Gleichzeitig wurde neben dem Freistrahls auch das Auftreffen auf ein Werkstück betrachtet, um auch diese Veränderung der Lärmemissionen charakterisieren zu können. Gemäß der Terminologie der Fa. Littmann wurde hierbei die „rote“ Düse als Standard gewählt, da es sich hierbei um die leistungsstärkste Düse handelt.

Das in Bild 4 dargestellte Diagramm zeigt die Lärmemissionen sowohl der Standarddüse und der Standarddüse-SLS als auch das jeweilige Auftreffen auf ein Werkstück. Die Standarddüse-SLS besitzt eine etwas geringe Lärmemission als die Standarddüse. Die jeweiligen Lärmemissionen beim Auftreffen der Strömung auf ein Werkstück (WS) zeigen eine ähnliche Charakteristik zueinander. Darüber hinaus entspricht diese Charakteristik auch der des Freistrahls, mit dem Unterschied einer höheren Lärmemission. Da Werkstücke nur schwer standardisierbar sind und stark von der jeweiligen Reinigungsaufgabe abhängen, erfolgt die weitere Betrachtung der Lärmemissionen nur am Freistrahls der zu untersuchenden Düsen.

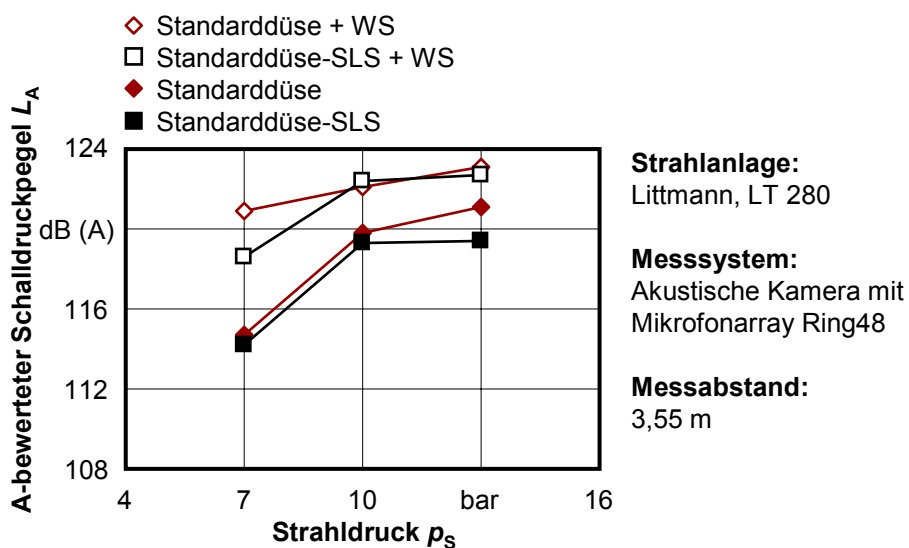


Bild 4: A-bewerteter Schalldruckpegel in Abhängigkeit des Strahldruckes der Standarddüse und der Standarddüse-SLS

Der Vergleich der Standarddüse-SLS mit der Standarddüse-opt. ist im Bild 5 dargestellt, wobei die Standarddüse-opt. ebenfalls mittels selektivem Lasersintern hergestellt wurde. Aus der Darstellung wird deutlich, dass aufgrund der strömungstechnischen Optimierung lediglich eine geringfügige Reduzierung der Lärmemission erreicht werden konnte. Die durchschnittliche Reduzierung des A-bewerteten Schalldruckpegels liegt hierbei bei 2,8 dB (A).

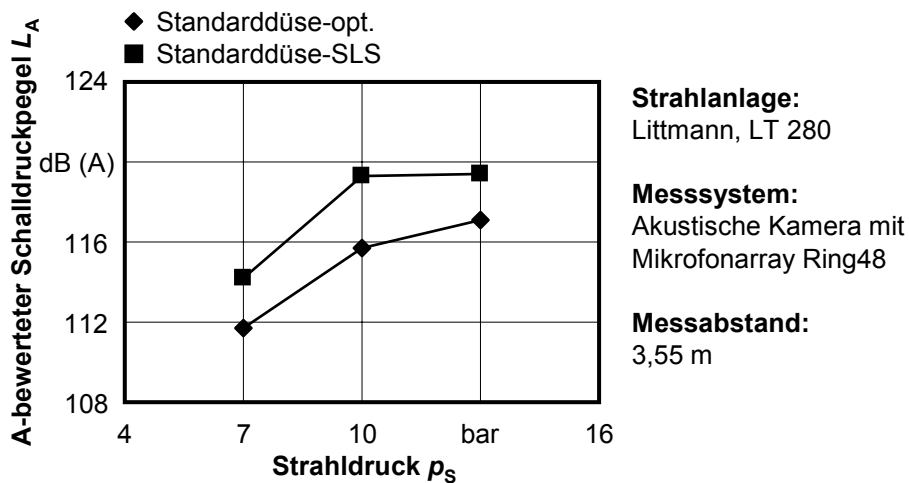


Bild 5: A-bewerteter Schalldruckpegel in Abhängigkeit des Strahldruckes der Standarddüse-opt. im Vergleich zur Standarddüse-SLS

Die Ergebnisse der Frequenzanalyse sind in Bild 6 dargestellt. Abgebildet sind die Mittenfrequenzen der Oktav-Bänder in Abhängigkeit vom Strahldruck im Vergleich zwischen der Standarddüse-opt. und der Standarddüse-SLS. Es ist zu erkennen, dass im tiefen Frequenzbereich die Standarddüse-opt. lauter als die Standarddüse-SLS ist. In den Frequenzbereichen auf die das menschliche Gehör am empfindlichsten reagiert, zwischen 1 kHz und 2 kHz, sind beide Düse in etwa gleich laut. In den hohen Frequenzbereichen ist die Standarddüse-opt. wesentlich leiser als die Standarddüse-SLS. Auch das trägt dazu bei dass die unangenehme Empfindung der Lautstärke reduziert wird.

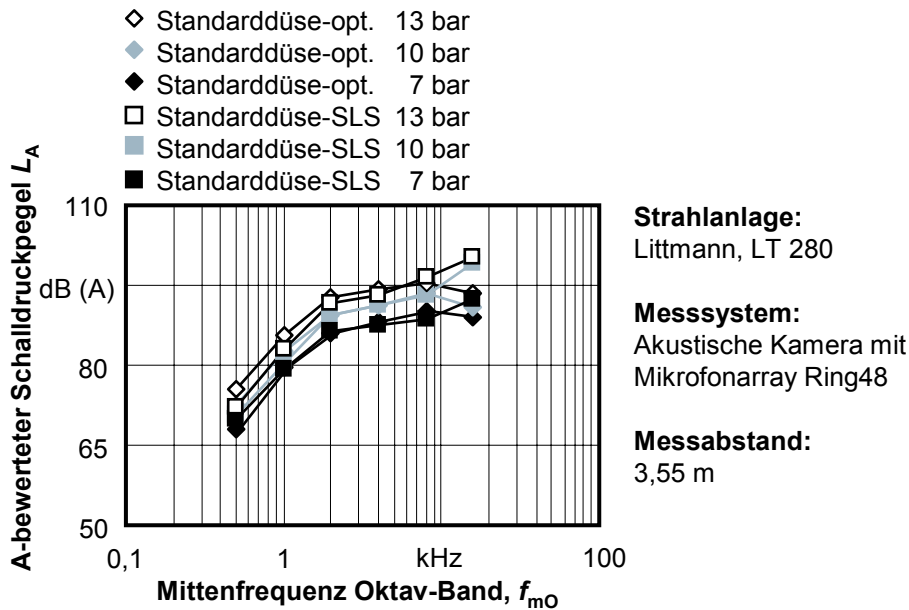
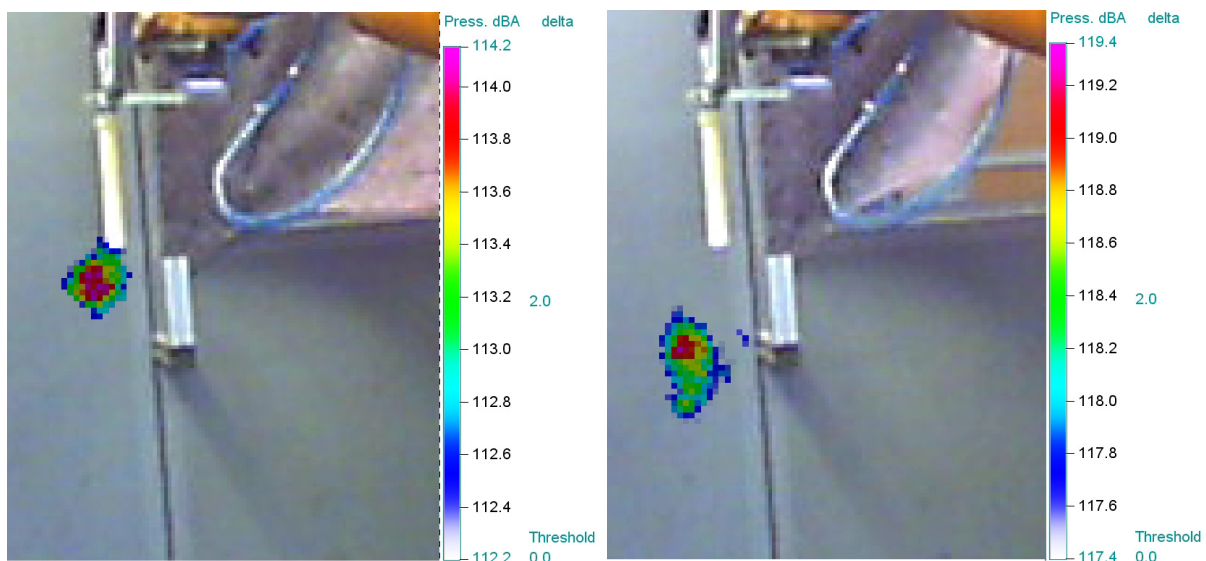


Bild 6: Mittenfrequenzen der Oktavbänder in Abhängigkeit des Strahldruckes Standarddüse-opt. im Vergleich zur Standarddüse-SLS

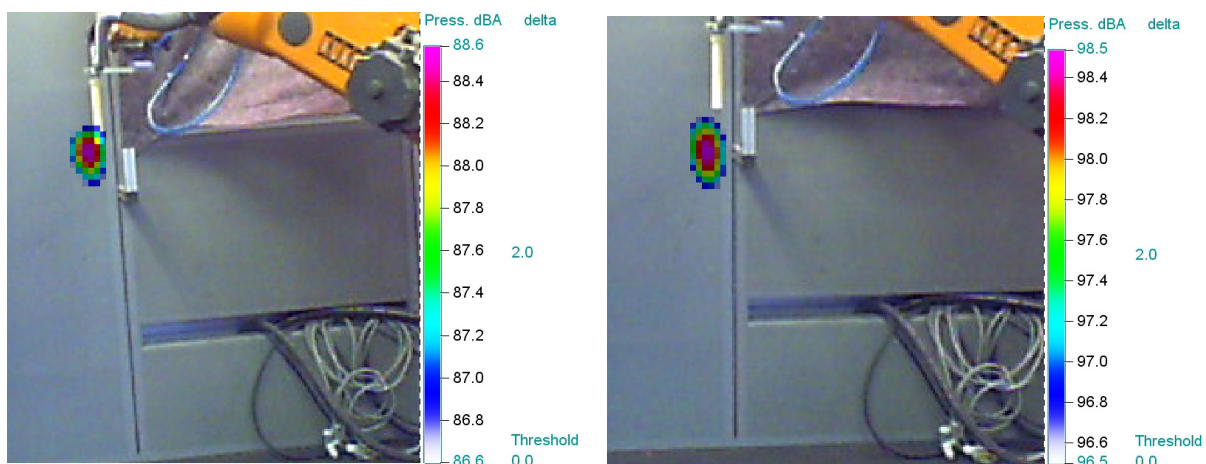
In Bild 7 sind die Lärmemissionen der Standarddüse-SLS bei 7 bar (A) und 13 bar (B) als Aufnahme mit der akustischen Kamera dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die maximale Lautstärke bei 7 bar von 114,2 dB(A) direkt an der Düse und bei 13 bar von 119,4 dB(A) weiter stromabwärts ist. Die Ursache dafür ist in der Veränderung des Kernstrahls zu sehen. Der Kernstrahl ist bei 13 bar deutlich länger, was dazu führt, dass sich das Mischungsgebiet in Richtung stromabwärts vergrößert wird. Des Weiteren entstehen am Düsenaustritt Gebiete mit kleinen Wirbeln, die ursächlich für hochfrequenten Lärm sind. Weiter stromab dagegen bilden sich größere Wirbelstrukturen aus, die niederfrequenten Lärm erzeugen [Br04]. Im Bild 8 sind die Lärmemission bei 7 und 13 bar im Terzmittenband von 10 kHz, d. h. hochfrequenten Lärm, dargestellt. Diese Darstellung stützt die Aussage zum verlängerten bzw. verschobenen Mischungsgebiet, da auch hier die Verlagerung der Lärmemission in einem hochfrequenten Terzband deutlich wird.



A $p_s = 7$ bar

B $p_s = 13$ bar

Bild 7: Maximaler Schalldruckpegel der Standarddüse-opt.



A $p_s = 7$ bar

B $p_s = 13$ bar

Bild 8: Schalldruckpegel im Terzmittenband 10 kHz der Standarddüse-opt.

3.4 Erarbeitung neuer und Übertragung relevanter Lösungsansätze auf Strahldüsen zum Strahlen mit festem CO₂

Bei der Auslegung von Strahldüsen, wie sie für das Trockeneisstrahlen benötigt werden, muss auf die Eignung in Bezug auf das Strahlen mit Partikeln geachtet werden. Als ein ausschlaggebendes Eignungskriterium ist hier der Düsenquerschnitt zu betrachten. Dieser muss ausreichend groß ausgelegt werden, um ein störungsfreies Strahlen bei variierenden Pelletgrößen und -massenströmen zu gewährleisten. Wie in Kapitel 3.2 bereits beschrieben kann es bei ungünstigen Bedingungen im Mischungsbereich der Strahlpistole schnell zu Verstopfungen kommen. Da dies auch bei den Mehrkanaldüsen zu erwarten ist, werden diese nicht für weitere Untersuchungen herangezogen. Alle anderen, im Antrag genannten Lärminderungsmaßnahmen, wurden für eine Übertragung auf das Trockeneisstrahlen als anwendbar eingestuft. Die zu entwickelnden Düsen sollten demnach mit folgenden Lärminderungsmaßnahmen ausgestattet sein bzw. eine Kombination aus mehreren aufweisen:

- Ummantelung eines Kernstrahls mit Hilfe von Bypass-Strömen, um das Geschwindigkeitsprofil über den Querschnitt positiv zu beeinflussen
- Beschleunigung des Vermischungsvorgangs zweier koaxialer Strahlen
- Verhältnis von Strahlumfang zu Strahlquerschnitt vergrößern, zum Beispiel mit mäanderförmigen Düsenaustrittskante

Aus der Druckluft- und der Triebwerkstechnik sind verschiedene Konzepte zur Lärminderung bekannt. Ziel ist es den Mischungsvorgang zwischen ruhender und bewegter Luft zu beschleunigen. Dadurch soll der Geschwindigkeitsgradienten verringert werden. Folgende grundlegenden Konzepte wurden für die Entwicklung herangezogen:

- Chevronförmige Düsenaustrittskante
- Mäanderförmige Düsenaustrittskante
- Mantelstrahl mittels Ejektor

Darüber hinaus wurden die oben genannten Lärminderungsmaßnahmen untereinander kombiniert. Das Bild 9 zeigt die Kombination eines Ejektors mit einer Strahldüse deren Austrittsöffnung mäanderförmige Geometrie besitzt. Dadurch wird der Vermischungsvorgang beider Strahlen positiv beeinflusst. Die Aufnahme des Ejektors ist

so gestaltet, dass ein Anbringen an unterschiedliche Strahldüsen ermöglicht wird. Dadurch lässt sich die Anzahl der zu testenden Kombinationen erhöhen.

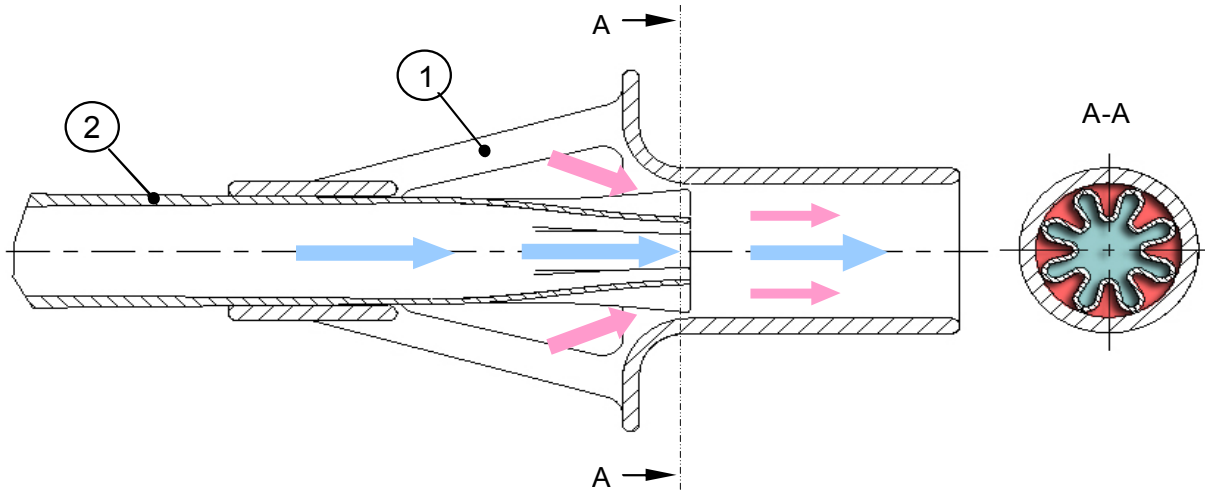


Bild 9: Prinzipdarstellung zur Erzeugung eines Mantelstrahl nach dem Ejektorprinzip

Eine weitere Möglichkeit der Kombination zweier Lärminderungsmaßnahmen ist in Bild 10 dargestellt. Durch die mäanderförmige Düsenaustrittsöffnung wird zum einen das Verhältnis von Strahlumfang zu Strahlquerschnitt vergrößert und zum anderen die Vermischung zweier coaxialer Strahlen beschleunigt, Bild 10 A. Die gezackte Düsenaustrittskante (Chevron-Düse) soll die Vermischung positiv beeinflussen, Bild 10 B. Die Kombination beider vorher genannten Varianten soll deren Eigenschaften vereinen, Bild 10 C.

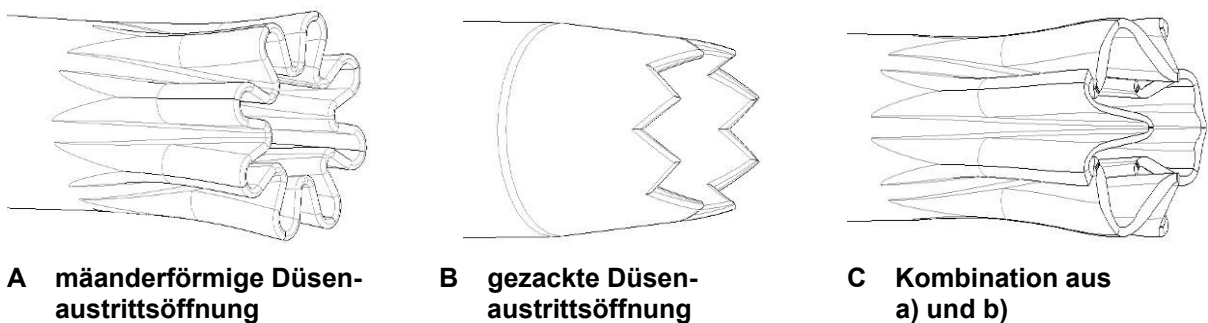


Bild 10: Lärminderungskonzepte der Düsenaustrittsöffnung

Des Weiteren wurde die Geometrie der Mäanderförmigen Düsenaustrittsöffnung um 45 ° verdreht. Dadurch soll die Vermischung der coaxialen Strahlen weiter beschleunigt werden. Alle Varianten der Düsenaustrittsöffnung wurden für die weiteren Untersuchungen mit und ohne Ejektor kombiniert.

Versuche die Oberflächen der SLS-Düsen mit Hilfe des Strömungsschleifens zu verändern führten zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen. Daher wurde im weiteren Verlauf der Untersuchungen davon abgesehen. Andere Verfahren zur Bearbeitung von Innengeometrien scheiterten an der Form und der schlechten Zugänglichkeit der Düsen.

3.5 Modellierung entsprechender Strahldüsen mit Lärminderungsmaßnahmen sowie CFD-Simulation

Im Gegensatz zur Simulation der Standarddüse-opt. mussten die Lärminderungsmaßnahmen dreidimensional berechnet werden. Die beschriebenen Lärminderungsmaßnahmen lassen sich nicht im 2D-Bereich abbilden, wodurch die angenommenen Strömungsvorgänge nicht simuliert werden können. Die Grundlegenden Einstellungen hinsichtlich Turbulenzmodell, Berechnungsverfahren etc. sind hingegen dieselben wie bei der zweidimensionalen Simulation. In einem ersten Schritt wurden die CAD-Modelle der Düsen erstellt. Diese können sowohl für die Simulation als auch für die Fertigung mittels selektivem Lasersintern verwendet werden.

Um durch die Lärminderungsmaßnahmen keinen oder nur einen kleinstmöglichen Leistungsverlust zu erzeugen, mussten hierfür die jeweiligen Geometrien angepasst werden. Im Fall der Mäanderdüsen wurden zum einen der äußere Durchmesser, d_a und zum anderen der innere Durchmesser, d_i , variiert, siehe Bild 11.

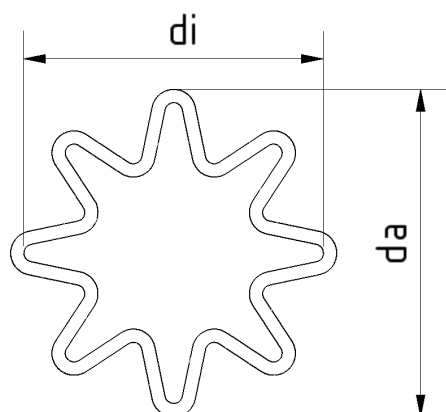


Tabelle 1: Variierte Parameter der Mäanderdüse

Düsenvariante	d_a in mm	d_i in mm
Mäander 1	23	15
Mäander 2	28	20
Mäander 3	32	24

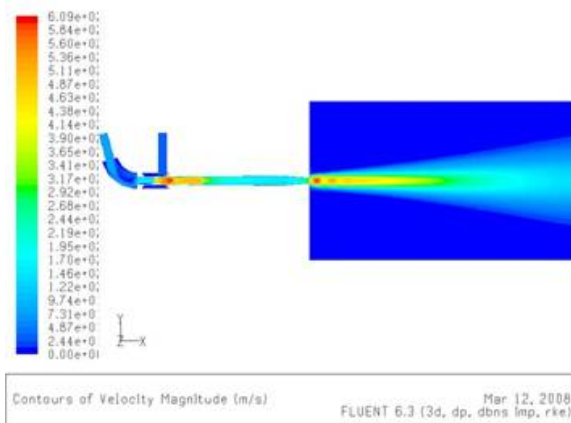
Bild 11: Variierte Durchmesser der Mäanderdüsen

Die Simulationsergebnisse wurden mit dem integrierten Postprozessor bearbeitet und visualisiert. In Bild 12 sind die Geschwindigkeitsverteilungen der simulierten Mäanderdüsen dargestellt. Die Bilder zeigen einen Querschnitt des Berechnungsgebietes, zu dem sowohl die Strahldüse als auch der Freistrahel gehört. Bei der ersten Variante, Bild 12 A ist zu erkennen, dass die Strömung im divergenten Teil der Düse nicht beschleunigt wird. Im Vergleich mit den anderen Varianten der Mäanderdüsen weist die erste Variante eine wesentlich niedrigere Geschwindigkeit auf. Am Düsenaustritt wird die Strömung zwar plötzlich stark beschleunigt, es entsteht aber kurz dahinter ein starker Verdichtungsstoß. Da die Strömungssimulation in den meisten

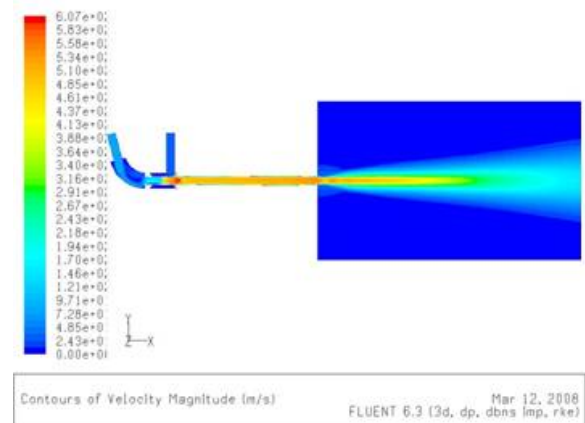
Fällen auf Modellen basiert, bilden sie nie den realen Strömungsverlauf ab. Daher müssen die Ergebnisse kritisch hinterfragt werden. Im Fall der ersten Variante bedeutet das, dass aufgrund des zu kleinen Durchmessers des Düsenaustritts sich die Luft vor dem Austritt staut und wird dann am Austritt beschleunigt. Im Prinzip stellt also der Düsenaustritt eine Verengung dar, die dadurch wieder selbst wie eine Düse wirkt. Stromabwärts würde sich der Freistrahel schnell in radialer Richtung ausbreiten und so stark gebremst werden. In der Simulation ist ein gerichteter Freistrahel erkennbar, in der Realität würde sich jedoch kein derartiger Strahl ausbilden.

Die Varianten zwei, Bild 12 B und drei, Bild 12 C, haben untereinander eine ähnliche Charakteristik. Bei der dritten Variante, wird die Strömung am besten beschleunigt, jedoch tritt am Düsenaustritt ein starker Verdichtungsstoß auf, wodurch die Energie der Strömung sehr stark abgebaut wird. Dies ist auch durch den deutlich kürzeren Freistrahel im Vergleich mit Variante zwei ersichtlich. Die zweite Variante der Mäanderdüsen liefert die beste Beschleunigung und einen homogenen Freistrahel. Aus diesem Grund wird diese Variante mittels SLS hergestellt und für die weiteren Untersuchungen verwendet.

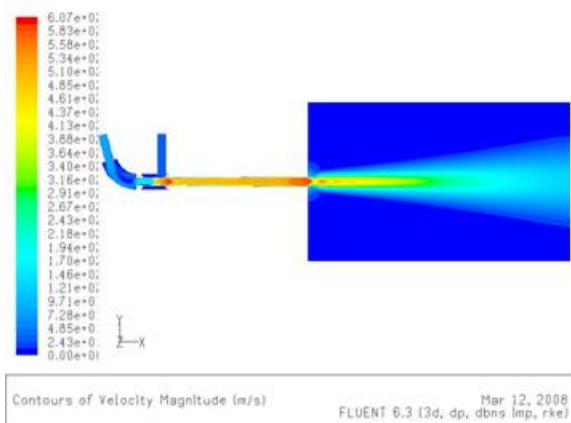
Auf Basis der zweiten Düse wurde eine weitere Variante der Mäanderdüse entwickelt, Bild 12 D. Hier wurde die Mäandergeometrie, wie oben beschrieben, gedreht. Der Beschleunigungsvorgang stellt sich ähnlich dem der zweiten Variante dar und der Freistrahel besitzt darüber hinaus in etwa die gleiche Länge. Aus diesem Grund wird auch diese Variante für weitere Versuche herangezogen.



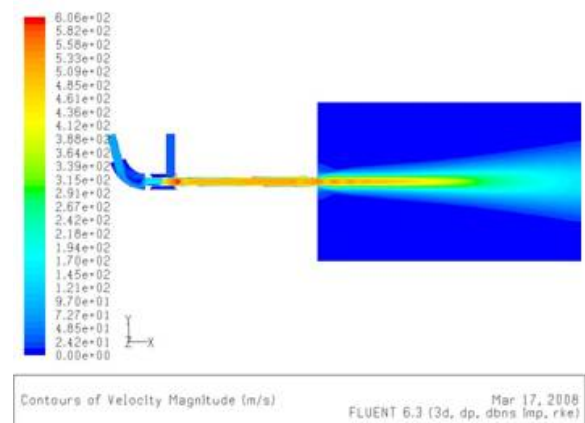
A Mäander 1, $d_a = 23$ mm, $d_i = 15$ mm



B Mäander 2, $d_a = 28$ mm, $d_i = 20$ mm



C Mäander 3, $d_a = 32$ mm, $d_i = 24$ mm



D Mäander 4, gedreht $\alpha = 45^\circ$, $d_a = 28$ mm, $d_i = 20$ mm

Bild 12: Strömungsgeschwindigkeiten der Mäanderdüsen bei $p_s = 13$ bar

Die Variation der Geometrien bei den Düsen mit gezackter Düsenaustrittskante, den Chevrongdüsen, beschränkt sich auf die Anzahl der Zacken. Es wurden Düsen mit 4, 8 und 12 Zacken modelliert und simuliert. Die vierte Variante ist eine Kombination aus mäanderförmiger und gezackter Düsenaustrittskante, vgl. Bild 10 C. Der Vergleich des Strömungsgeschwindigkeitsprofils der Chevrongdüsen zeigt bei allen einen ähnlichen Verlauf, Bild 13. Hier wurde lediglich die Düsenaustrittskante modifiziert und die Geometrie der Düsen nicht verändert. Für die Beschleunigung der Strömung ist die Innengeometrie der Düsen maßgebend, die Düsenaustrittskante hingegen bestimmt die Schallabstrahlung in die Umgebung. Für die weiteren Untersuchungen werden die Varianten mit 4 und 12 Zacken gewählt, um den Einfluss der Zacken auf die Lärmemission zu untersuchen. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Anzahl der Zacken wird auch hinsichtlich der Lärmemission ein deutlicher Unterschied erwartet. Die Kombinierte Mäander-Chevrongdüse zeigt ebenso einen ähnlichen Geschwindigkeitsverlauf wie die reinen Chevrongdüsen. Zu erkennen sind jedoch Druck-

stöße am Austritt der Strömung beim Übergang in den Freistrahlbereich. Ob und in welchem Maß diese zu einer erhöhten Lärmemission führt, wird in den weiteren Untersuchungen geklärt.

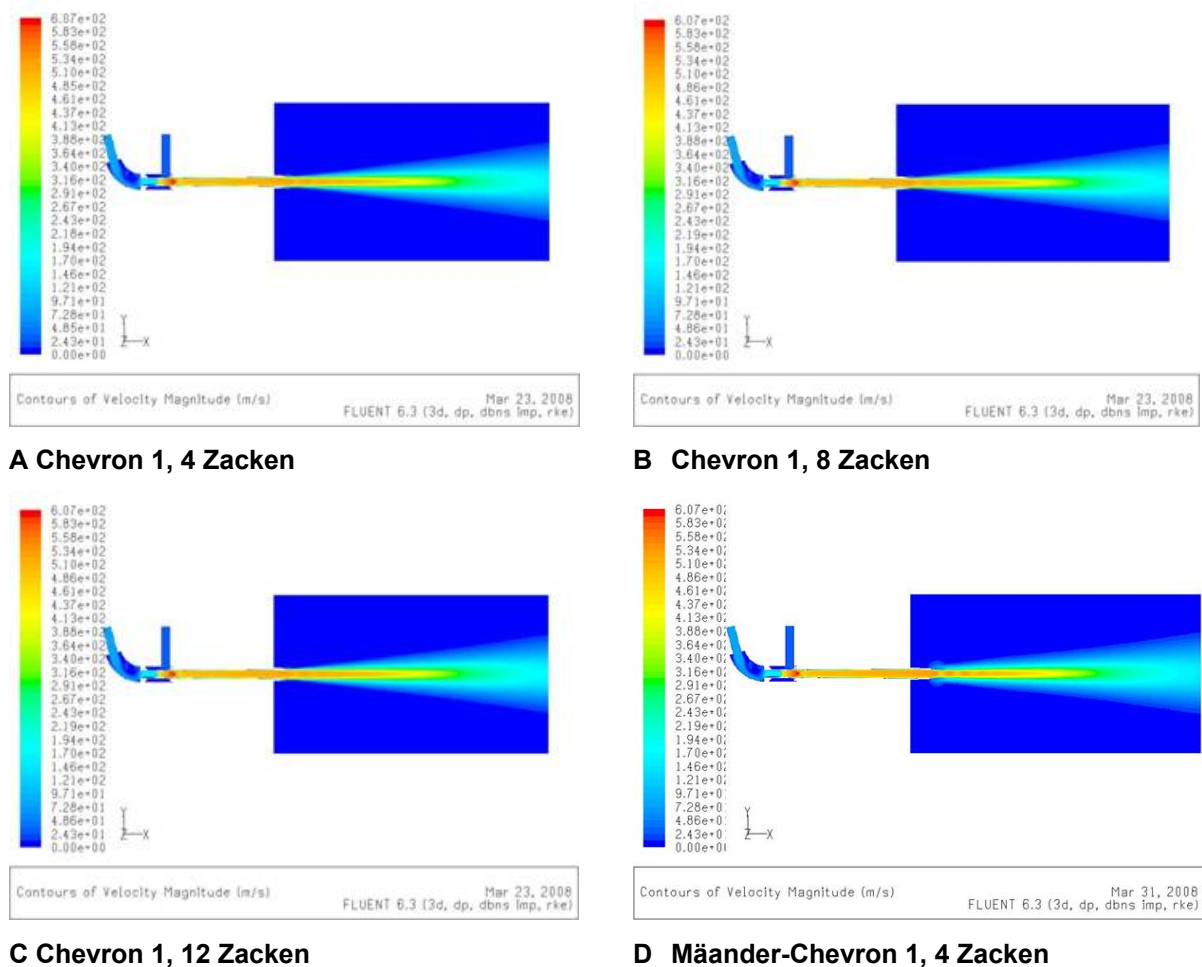


Bild 13: Strömungsgeschwindigkeiten der Chevrongdüsen bei $p_s = 13$ bar

Der zur Erzeugung eines Mantelstrahls verwendete Ejektor wurde bei allen zuvor genannten Varianten simuliert, Bild 14. Der Ejektor befindet sich 20 mm stromabwärts der Düse. Bei der ersten Variante, der Standarddüse-opt., Bild 14 A, treten am Austritt aus dem Ejektor mehr Druckstöße als bei der Simulation ohne Ejektor auf. Am Eingangsbereich des Ejektors ist nur eine geringe ansaugende Wirkung zu erkennen. Dasselbe Verhalten zeigt die Simulation der Chevrongdüse in Verbindung mit dem Ejektor, Bild 14 B. Auch hier ist der ansaugende Effekt zu vernachlässigen. Deutlich größer ist dieser Effekt bei der Simulation der Mäanderdüse, Bild 14 C. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich aufgrund der speziellen Mäandergeometrie bereits ein Mantelstrom bildet und somit wesentlich mehr Luft ansaugt. Dies kann auch bei der vierten Variante, Kombination Mäander- und Chevrongdüse, Bild 14 D, beobachtet werden, wenngleich der Effekt nicht so stark ausgeprägt ist.

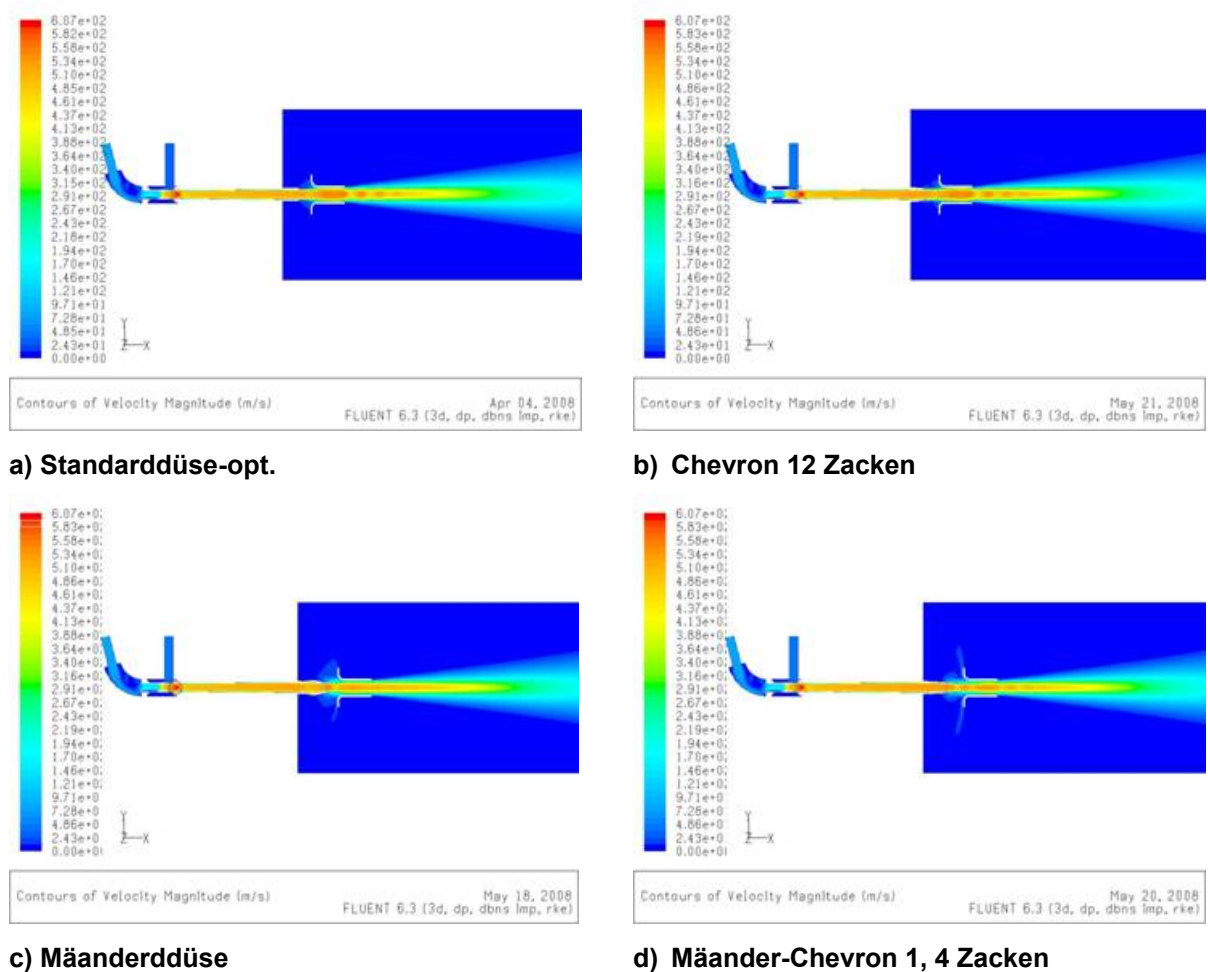


Bild 14: Strömungsgeschwindigkeiten beim Einsatz von Ejektoren bei $p_s = 13$ bar

Die maximalen Geschwindigkeiten der Düsen sind etwa bei allen gleich, jedoch unterscheiden sie sich in ihrer Freistrahlscharakteristik. Die zum Teil starken Verdichtungsstöße lassen auf eine wesentlich schlechtere Beschleunigung der Pellets schließen. Die Geschwindigkeit der Partikel ist im Wesentlichen von ihrer Größe, Form und Masse abhängig. Bei der Simulation könnten zwar die unterschiedlichen Eigenschaften von Partikeln berücksichtigt werden, dies führt jedoch zu einem unverhältnismäßigen Rechen- und Modellierungsaufwand. Des Weiteren kann mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitskamera nur ein Teil der Partikel auf ihre Geschwindigkeit hin überprüft werden. Es lassen sich also keine verlässlichen Aussagen über die erreichte Geschwindigkeit treffen. Aus diesem Grund wird die Leistung der Düsen indirekt über die Antragsleistung bestimmt.

3.6 Herstellung der relevanten Düsenvarianten mittels selektiven Lasersinterns

Beim Lasersintern liegen die Ausgangsstoffe als Pulver mit einem Korndurchmesser von 50 bis 100 μm vor. Mit Hilfe eines Laserstrahls wird das Pulver in der jeweiligen Schichtebene miteinander verschmolzen. Beim Erstarren entsteht eine feste Schicht und infolge der Wärmeleitung gleichzeitig eine feste Bindung mit der vorangegangenen Schicht. Durch das Absenken des Bauraums und ein neues Aufbringen von Pulver wird die nächste Schicht zum Sintern vorbereitet. Der Bauprozess im Bauraum erfolgt in einem Temperaturbereich knapp unterhalb der Schmelztemperatur des zu sinternden Materials, so dass der Laser nur eine kleine Differenzenergie aufbringen muss. Die Belichtungsprozedur der Schichten wird solange wiederholt, bis ein vollständiges, reales Modell auf der Bauplatzform aufgebaut ist. Die Werkstoffpalette reicht von Polymeren wie z. B. Polyamid und Polycarbonat bis hin zu hoch schmelzenden Werkstoffen wie Metallen. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen im Bereich der minimalen Schichtdicken von ca. 0,1 mm. Die Oberflächengüte ist direkt von der Partikelgröße und -form abhängig.

In Bild 15 sind beispielhaft Strahldüsen mit Lärmreduzierungskonzepten dargestellt. Die Fertigung mittels selektiven Lasersinterns erlaubt eine schnelle Umsetzung vom virtuellen Prototypen in reale Bauteile. Um eine ausreichende Stabilität der Düsen beim Strahlen zu gewährleisten, mussten insbesondere die mäanderförmigen Strahldüsen mit einer dickeren Wandstärke versehen werden. Andernfalls kann es leicht zu Beschädigungen an den Düsen kommen, da durch die Strömung die Düsen in Schwingung versetzt werden und sich dadurch Risse bilden.

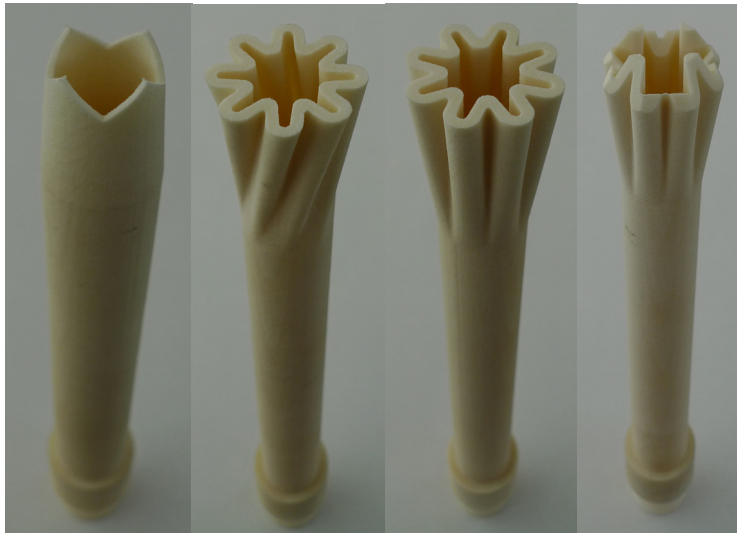


Bild 15: Strahldüsen mit Lärminderungskonzepten, hergestellt mit dem selektiven Lasersintern

3.7 Schallpegelmessung und Frequenzanalyse der entwickelten Strahldüsen

Für die Frequenzanalyse wird die akustische Kamera verwendet. Die Frequenzanalyse besteht aus der Messung der einzelnen Oktavbänder. Bei Verwendung eines herkömmlichen Schallpegelmessgerätes müsste jedes zu messende Oktavband einzeln eingestellt und gemessen werden. Diese Prozedur muss für jeden Parameter und entsprechend für jede Düse wiederholt werden. Dies führt, aufgrund der Anzahl der zu vermessenden Düsen und Kombinationen, zu einem unnötigen Zeitaufwand. Durch die Verwendung der akustischen Kamera kann mit einer Messung sowohl der maximale Schalldruckpegel gemessen als auch, mit Hilfe der zugehörigen Software Noiselmage, eine Frequenzanalyse, wesentlich und einfacher durchgeführt werden.

Für die Messung des maximalen Schallpegels und die Frequenzanalyse wurde der Strahldruck variiert. Es wurde für alle Düsen ein Strahldruck von 7, 10 und 13 bar untersucht. Eine Untersuchung der Lärmemission des Freistrahls beim Auftreffen auf ein Werkstück wurde aus dem in Kapitel 3.3 genannten Gründen nicht durchgeführt. Die Messung des maximalen Schalldruckpegels der Düsen mit Lärmreduzierungsmaßnahmen, Bild 16, zeigt im Vergleich mit der Standarddüse-SLS, dass alle einen geringeren Schalldruckpegel aufweisen. Die geringste Lärmemission weist die Chevrontdüse mit 12 Zacken auf. Im Durchschnitt wurde hier der Schalldruckpegel gegenüber der Standarddüse-SLS um 3,9 dB (A) gesenkt. Die Chevrontdüse mit 4 Zacken weist zwar ebenfalls eine Lärmreduzierung auf, diese ist jedoch geringer als bei der Chevrontdüse mit 12 Zacken und wird daher nicht weiter für Untersuchungen herangezogen. Bis auf die Kombinationsdüse, Mäander-Chevron, weisen alle Lärmreduzierungskonzepte eine ähnliche Charakteristik hinsichtlich der Schalldruckpegel bei entsprechenden Strahldrücken auf. Die Mäander-Chevrontdüse liefert bis auf den Strahldruck von 10 bar deutlich höhere Schalldruckpegel.

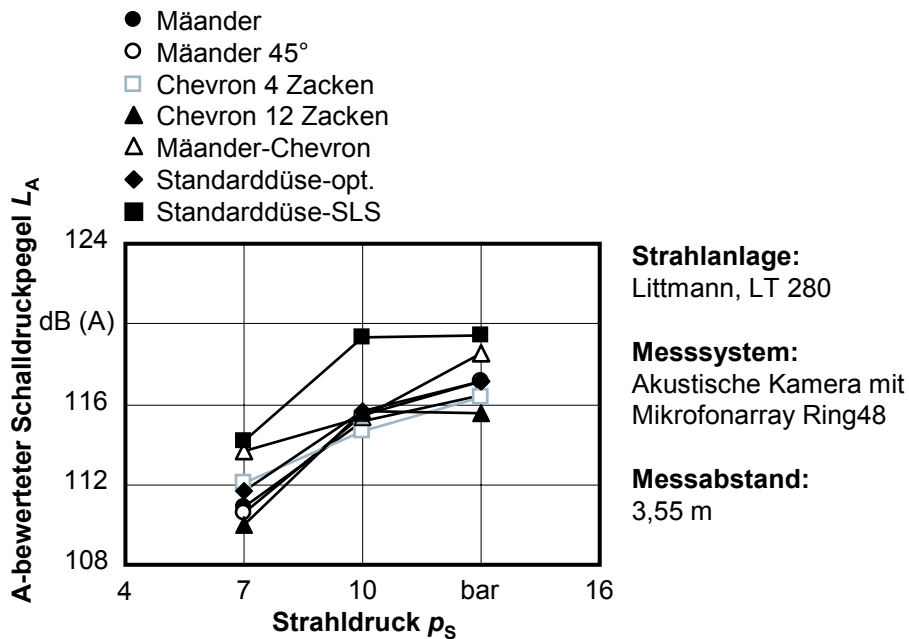


Bild 16: A-bewerteter Schalldruckpegel in Abhängigkeit vom Strahldruck der Düsen mit Lärminderungsmaßnahme im Vergleich zur Standarddüse-SLS

Bild 17, zeigt die maximalen Schalldruckpegel der unterschiedlichen Düsen bei Verwendung eines Ejektors. Die Ejektoreintrittskante befindet sich, wie in der Simulation, 20 mm stromabwärts der Düsenaustrittskante. Bei der Mäander-, Mäander 45 °- und Mäander-Chevondüse konnte der Abstand von 20 mm, aufgrund der Form der Düsenaustrittskante, nicht realisiert werden. In diesem Fall beträgt der Abstand 0 mm, d. h. die Düsenaustritts- und die Ejektoreintrittskante sind deckungsgleich. Im Vergleich zu den Untersuchungen ohne Ejektor ist nur bei einem Strahldruck von 10 bar eine Reduzierung des Schallpegels festzustellen. Sowohl im unteren als auch im oberen Bereich des Strahldrucks sind teils deutlich höhere Werte erkennbar. Wie bereits im Kapitel 3.5 beschrieben, erzielt die Kombination von Mäanderdüse und Ejektor den niedrigsten Schallpegel innerhalb dieser Untersuchung. Da alle anderen Kombinationen höhere Schallpegel erreichen, wird der Ejektor nur noch zusammen mit der Mäanderdüse untersucht.

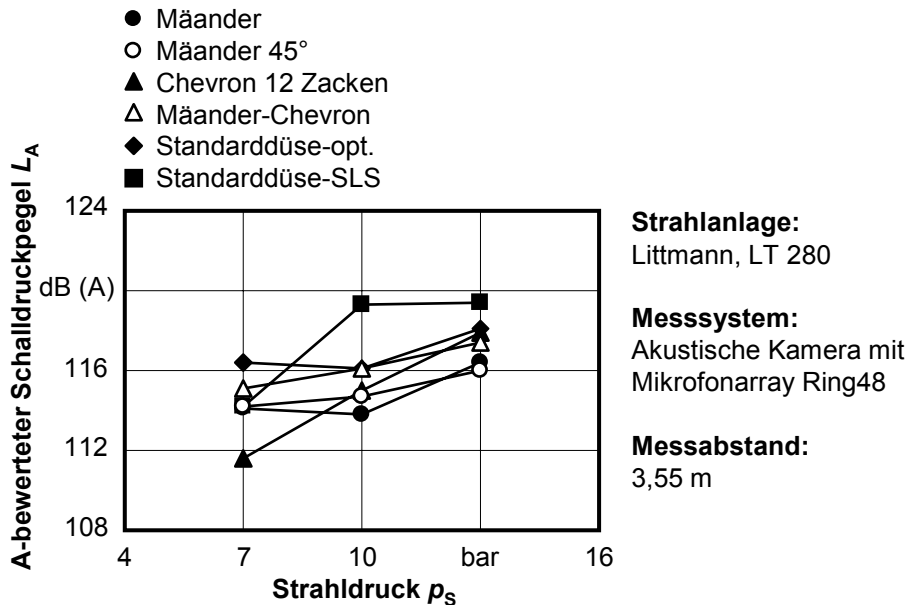


Bild 17: A-bewerteter Schalldruckpegel in Abhängigkeit vom Strahldruck der Düsen mit Lärminderungsmaßnahme und Ejektor im Vergleich zur Standarddüse-SLS

Da das menschliche Gehör im Bereich von 2 bis 5 kHz am empfindlichsten ist, wurde mit einer Frequenzanalyse ermittelt, ob in diesem Bereich die Lärmemissionen reduziert werden konnte. In Bild 18 ist das Schallspektrum der Düsen mit Lärminderungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei einem Strahldruck von 7 bar dargestellt. Zu Erkennen ist, dass die hohen Frequenzen den größten Anteil am Gesamtpegel haben.

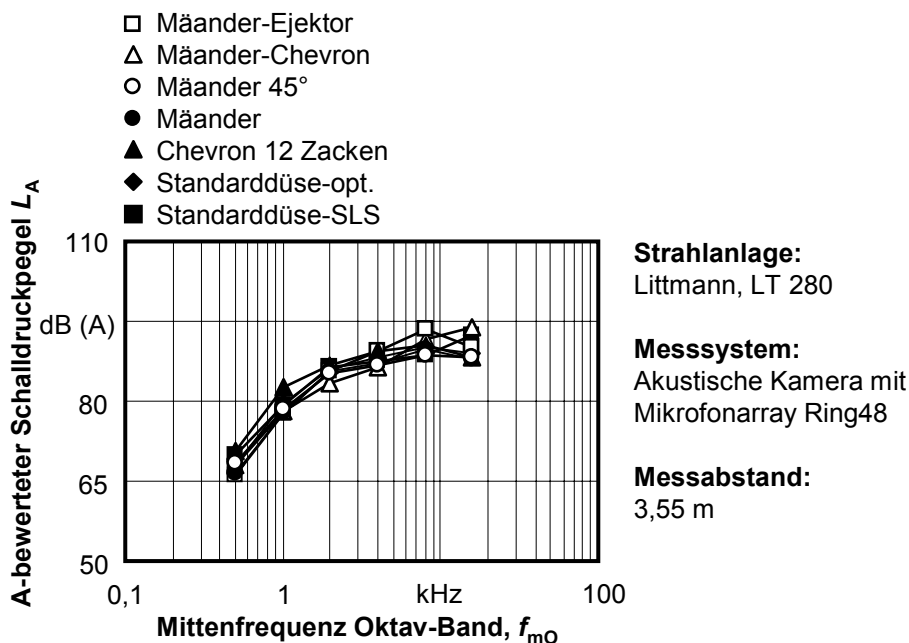


Bild 18: Schallspektrum der Düsen mit Lärminderungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei $p_s = 7$ bar

Das in Bild 19 dargestellte Schallspektrum, bei einem Strahldruck von 10 bar, zeigt im Wesentlichen die gleiche Charakteristik wie das Spektrum bei 7 bar Strahldruck. Lediglich die Chevrongüse weist eine Abweichung im mittleren Frequenzbereich auf. Diese Erhöhung wirkt sich entsprechend der Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs negativ auf das Lautstärkeempfinden aus.

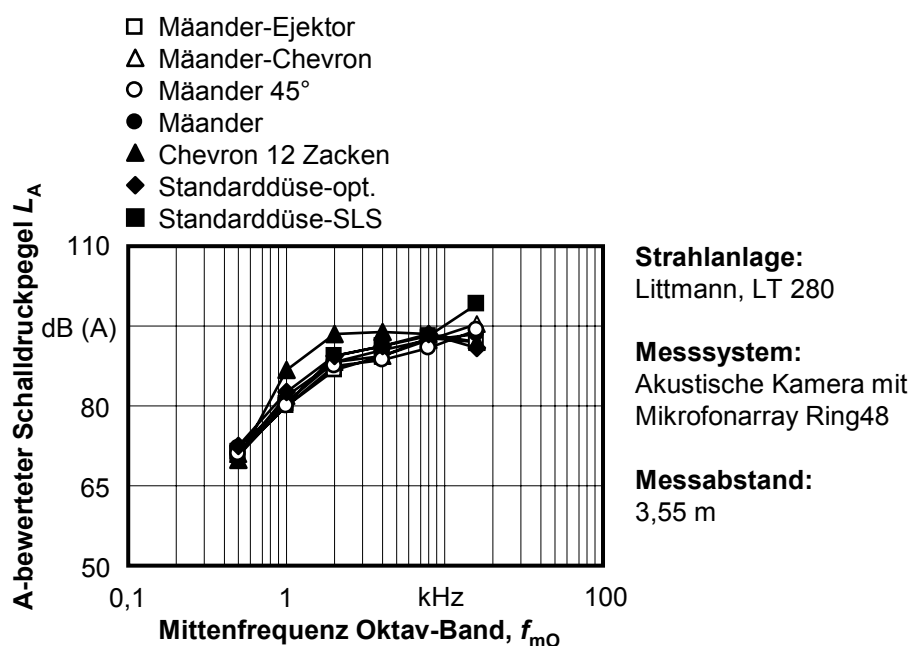


Bild 19: Schallspektrum der Düsen mit Lärminderungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei $p_s = 10$ bar

Die Frequenzanalyse bei 13 bar Strahldruck, Bild 20, zeigt wiederum einen ähnlichen Verlauf wie bei den oben genannten Untersuchungen. Deutlich wird hier, dass speziell im hochfrequenten Bereich die Düsen mit Lärminderungskonzepten sowie die Standarddüse-opt. einen geringeren Schalldruck gegenüber der Standarddüse-SLS aufweisen.

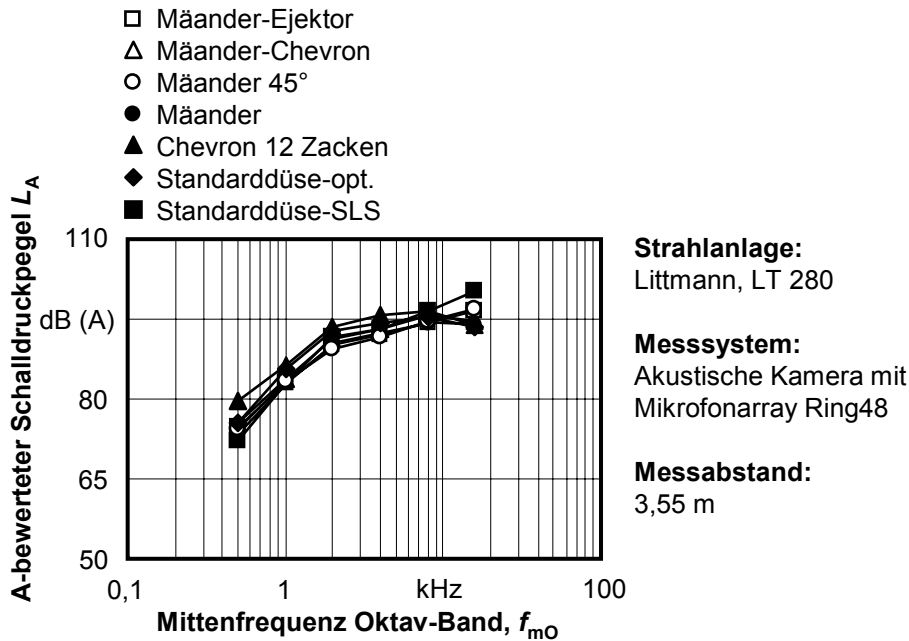


Bild 20: Schallspektrum der Düsen mit Lärminderungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei einem $p_s = 13$ bar

Im Zuge der Schallpegelmessungen konnte gezeigt werden, dass die Lärminderungsmaßnahmen eine Reduzierung der Lärmemissionen erreichen konnten. Darüber hinaus erzielte bereits die Standarddüse-opt. ähnliche Werte wie die Konzepte zur Lärmreduzierung. Gezielt den Schallpegel in bestimmten Frequenzbereichen zu reduzieren führte nicht zum Erfolg. Durch die Frequenzanalyse konnte jedoch gezeigt werden, dass über den gesamten Frequenzbereich eine Minderung der Lärmemissionen erreicht wurde. Die Düsen behalten jedoch im Wesentlichen die Charakteristik der Standarddüse-SLS bei.

3.8 Erarbeitung und Definition standardisierter Reinigungsaufgaben

Zur Ermittlung der erreichbaren Reinigungsleistung der einzelnen Düsen wird die Bestimmung der Abtragsleistung als indirektes Messverfahren verwendet. Hier kann die flächen- oder massebezogene Abtragsleistung ermittelt werden. Bei der flächenbezogenen Abtragsleistung werden entweder lackierte oder mit einer standardisierten Schmutzlösung behandelte Bleche bearbeitet. Dazu wird die Strahlpistole vorzugsweise von einem Roboter mit einer definierten Vorschubgeschwindigkeit und konstantem Arbeitsabstand über die Bleche geführt. Durch die Variation des Strahl- und des Transportdruckes für die Trockeneispellets kann anhand der Strahlbreite die Leistungsbereiche ermittelt werden. Die Breite der so erzeugten Strahlspuren muss dann an unterschiedlichen Stellen vermessen werden. Zum einen ist diese Vorgehensweise sehr zeitaufwendig und zum anderen erfolgt die Wahl der zu messenden Stellen unter Umständen subjektiv, wodurch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur eingeschränkt gegeben ist. Bei der Messung der massebezogenen Abtragsleistung wird die Strahlpistole über ein weiches und poröses Material geführt und dadurch ein Materialabtrag erzielt. Die Massendifferenz ermöglicht dann Aussagen über die erreichbare Abtragsleistung. Im Vergleich mit der flächenbezogenen Abtragsleistung wird bei der massebezogenen Abtragsleistung der subjektive Einfluss verhindert und somit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Bei der Verwendung eines solchen 1-Komponentenmaterials, wird die Grenzschicht zwischen der zu entfernenden Verschmutzung und dem Substrat vernachlässigt. Dies ist jedoch von der jeweiligen Reinigungsaufgabe abhängig und weist bezüglich der Haftungsmechanismen eine große Bandbreite auf. Für eine vergleichende Untersuchung ist ein solches 1-Komponentenmaterial bestens geeignet. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden Probenkörper aus dem zu Platten gepressten Polyurethanschaum obomodulan, Typ 210 der Firma OBO-Werke, verwendet.

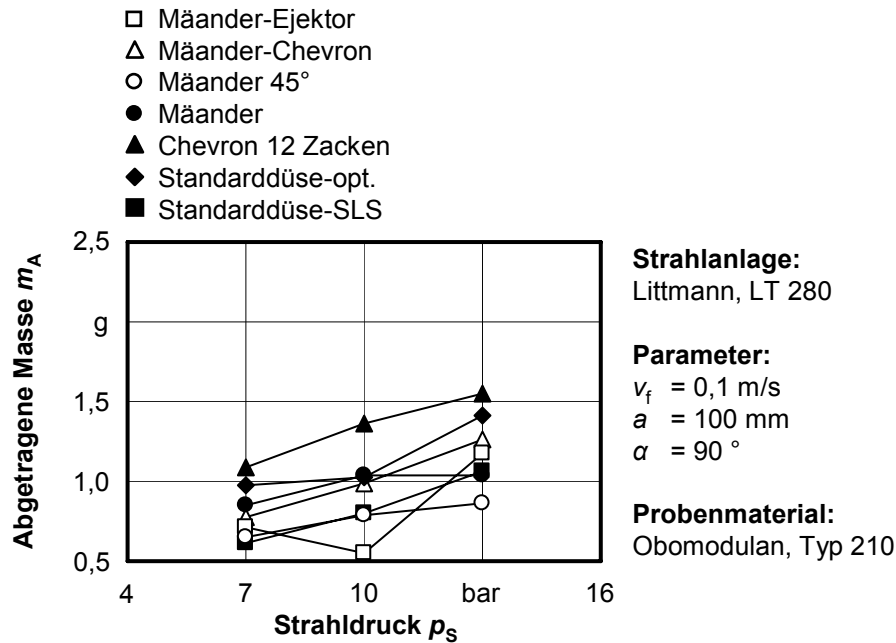
3.9 Durchführung von technologischen Untersuchungen

Um die Leistungsfähigkeit der Düsen zu bestimmen, wurde die jeweilige massebezogene Abtragsleistung ermittelt. Daraus sind Rückschlüsse auf die Reinigungsleistung unter realen Bedingungen möglich. Zur Bestimmung der Abtragsleistung wurden Probenkörper aus obomodulan, vgl. Kapitel 3.8, in den Abmessungen 100 x 80 x 50 mm (l x b x h) verwendet. Die Probenkörper wurden jeweils der Länge nach, bei einer definierten Vorschubgeschwindigkeit von 0,1 m/s bearbeitet. Für jeden der folgenden zu variierenden Parameter wurden je fünf Probenkörper bearbeitet, Tabelle 2. Jeder zu untersuchende Strahldruck wurde mit jedem zu untersuchenden Transportdruck kombiniert und die Abtragsleistung bestimmt.

Tabelle 2: Verwendete Parametereinstellung

Konstante Parameter	Vorschubgeschwindigkeit v_f	Düsenabstand a	Strahlwinkel α
	0,01 m/s	0,1 m	9,7 kg/h
Varierte Parameter	Strahldruck p_s	Transportdruck, Trockispellets p_p	
	7 bar	2 bar	
	10 bar	4 bar	
	13 bar	6 bar	

Da die Länge der Probenkörper und somit auch die Bearbeitungsdauer bei allen Versuchen aufgrund der konstanten Vorschubgeschwindigkeit gleich sind, wurden zum Vergleich der Abtragsleistung die Absolutwerte der abgetragenen Masse als ausschlaggebendes Kriterium herangezogen. In Bild 21 ist die Abtragsleistung der unterschiedlichen Düsen in Abhängigkeit vom Strahldruck bei einem Transportdruck von 2 bar dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Chevrongdüse den besten Abtrag erreicht. Des Weiteren liegt der Abtrag der Standarddüse-opt. ebenfalls über dem der Standarddüse-SLS. Die Abtragsleistungen der Düsen mit mäanderförmigen Düsenaustrittskanten liegen auf einem ähnlichen Niveau wie die Standarddüse-SLS. Die gedrehte Mäanderdüse liefert eine wesentlich geringere Abtragsleistung als die Referenzdüse.



**Bild 21: Abgetragene Masse in Abhängigkeit vom Strahldruck der Düsen mit Lärmminde-
rungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei Transportdruck $p_T = 2 \text{ bar}$**

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Abtragsleistung bei einem Transportdruck von 4 bar zeigen, dass die Chevrongdüse auch in diesem Fall ein wesentlich besseres Ergebnis als die Standarddüse-SLS erreicht, Bild 22. Die Standarddüse-opt. ist nur bei geringen Strahldrücken von 7 bis 10 bar der Referenz überlegen. Die mäanderförmigen Strahldüsenkonzepte können auch in dieser Untersuchung nicht überzeugen. Wiederum liegt die Leistung der gedrehten Mäanderdüse weit unterhalb der Leistung der anderen Düsen.

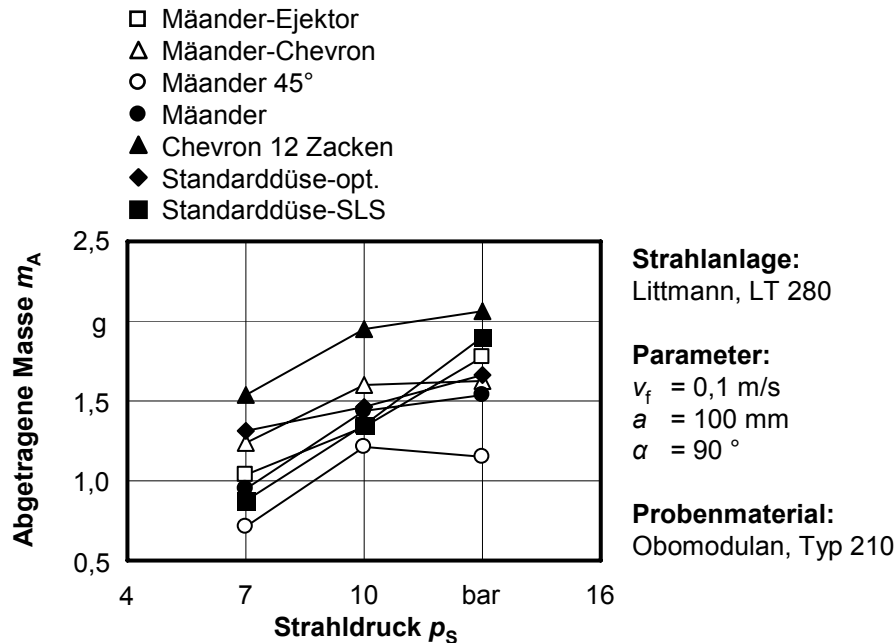


Bild 22: Abgetragene Masse in Abhängigkeit vom Strahldruck der Düsen mit Lärmminde-
rungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei Transportdruck $p_T = 4 \text{ bar}$

Die in Bild 23 dargestellten Ergebnisse zeigen wieder die deutliche Leistungssteigerung sowohl der Chevron als auch der Standarddüse-opt. gegenüber der Standarddüse-SLS. Die Chevron und die Standarddüse-opt. weisen bei 10 bar Strahldruck eine ähnlich hohe Abtragsrate wie die Standarddüse-SLS bei 13 bar auf. Sie liegen bereits bei 7 bar Strahldruck deutlich über dem Wert der Standarddüse-SLS bei 10 bar. Bei den mäanderförmigen Düsen verstopfte die Anlage bei einem Strahldruck von 13 bar. Daher sind in Bild 23 lediglich die Werte für 7 und 10 bar Strahldruck angegeben.

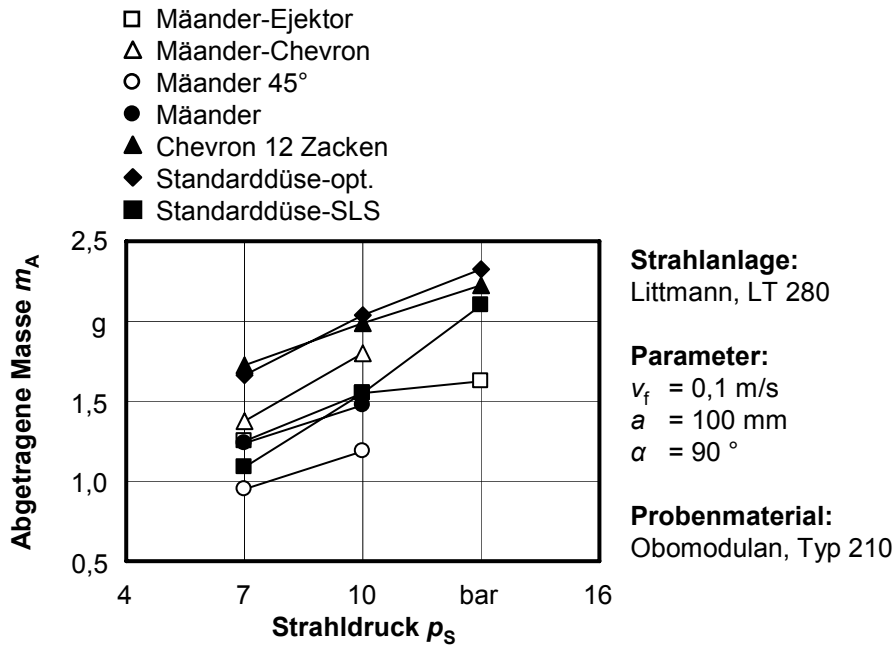


Bild 23: Abgetragene Masse in Abhängigkeit vom Strahldruck der Düsen mit Lärmminde-
rungsmaßnahmen im Vergleich zur Standarddüse-SLS bei Transportdruck $p_T = 6 \text{ bar}$

Es zeigt sich das sowohl die Chevron als auch die Standarddüse-opt. die höchsten Abtragswerte erzielen. Im Gegensatz zu den komplexen Geometrien der Mäanderdüsen ist die Herstellung der Chevrongdüse und der Standarddüse-opt. aus fertigungstechnischer Sicht mit vertretbarem Aufwand möglich. Daher werden die beiden Düsen für den abschließenden Leistungsvergleich mit der Standarddüse-SLS herangezogen

3.10 Vergleich der Strahldüsenvarianten hinsichtlich Abtragsleistung

Für den Vergleich der Strahldüsen hinsichtlich ihrer Abtragsleistung und entsprechender Lärmemission wurden der Standarddüse-SLS die Chevron und die Standarddüse-opt. gegenübergestellt, Bild 24. Dargestellt ist der maximale Schallpegel des Freistrahls. Beim Auftreffen des Freistrahls auf eine Oberfläche ist mit einem höheren Schallpegel zu rechnen. Der erhöhte Schallpegel betrifft alle Düsenvarianten gleich und besitzt darüber hinaus über die Strahldrücke eine ähnliche Charakteristik, vgl. Kapitel 3.3. Neben dem Schallpegel ist entsprechend des Strahldrucks die abgetragene Masse dargestellt. Bild 24 zeigt diesen Vergleich bei einem Transportdruck für die Trockeneispellets von $p_T = 2$ bar. Es ist zu erkennen, dass zum einen die Schallpegel sowohl bei der Chevrongüse als auch bei der Standarddüse-opt. geringer sind als bei der Standarddüse-SLS. Zum anderen konnte die Abtragsleistung bei beiden erstgenannten Düsen gegenüber der Standarddüse-SLS deutlich erhöht werden. So kann beispielsweise dieselbe Abtragsleistung der Standarddüse-SLS bei einem Strahldruck von 13 bar mit der Standarddüse-opt. bereits mit 10 bar erreicht werden. Die Chevrongüse erreicht diese Werte bereits bei 7 bar Strahldruck. Das entspricht im letzten Fall einer Reduzierung der Lärmemission von 119,4 dB(A) bei der Standarddüse-SLS auf 110,0 dB(A) bei der Chevrongüse. Beim Vergleich der maximalen Abtragsleistung, bei 13 bar Strahldruck, erreicht die Chevrongüse eine um 46,7 % höhere Abtragsmasse. Die Standarddüse-opt. erzielt eine um 33,4 % höhere Abtragsrate.

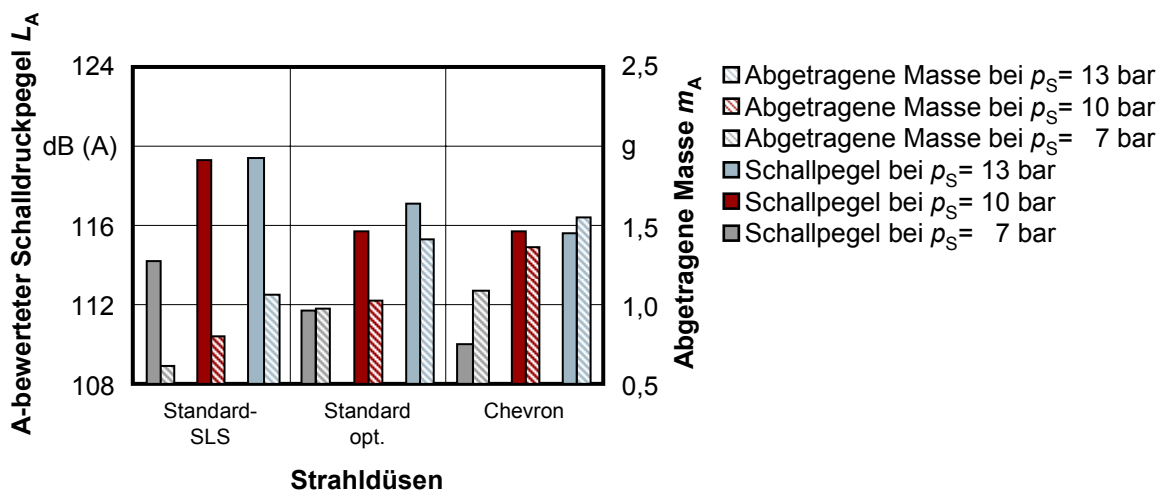


Bild 24: Vergleich der relevanten Strahldüsen hinsichtlich maximalen Schallpegel und Abtragsleistung in Abhängigkeit vom Strahldruck bei $p_T = 2$ bar

Der Vergleich der Düsen bei einem Transportdruck von 4 bar ist in Bild 25 dargestellt. Die Standarddüse-opt. hat hierbei nur noch bei niedrigem und mittlerem Strahl- druck einen Vorteil gegenüber der Standarddüse-SLS. Obgleich der maximale Schalldruckpegel bei allen Strahldrücken geringer ist. Die Chevrongüse hebt sich vor allem bei niedrigen Strahldrücken deutlich von der Standarddüse-SLS ab. Beim maximalen Strahldruck fällt der Vorteil gegenüber der Standarddüse-SLS gering aus.

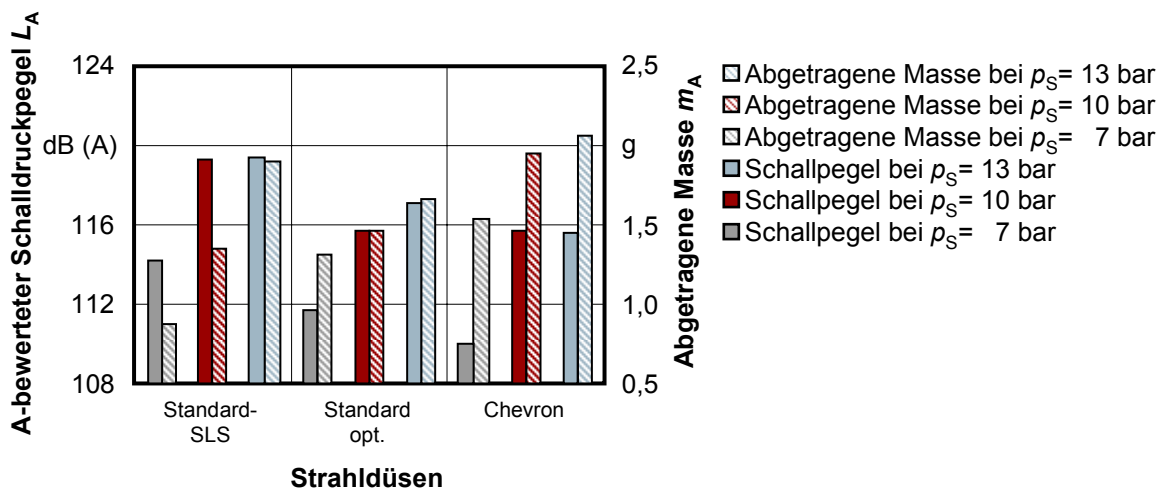


Bild 25: Vergleich der relevanten Strahldüsen hinsichtlich maximalen Schallpegel und Abtragsleistung in Abhängigkeit vom Strahldruck bei $p_T = 4$ bar

Auch bei einem Transportdruck von 6 bar haben die Standarddüse-opt. und die Chevrongüse nur bei niedrigen und mittleren Strahldrücken einen Vorteil hinsichtlich Abtragsleistung gegenüber der Standarddüse-SLS, Bild 26. Dieser Vorteil ist bei maximalen Strahldruck von 13 bar nur noch gering ausgeprägt. Dennoch ist der Schallpegel der entwickelten Düsen bei entsprechendem Strahldruck wesentlich geringer als bei der Standarddüse-SLS.

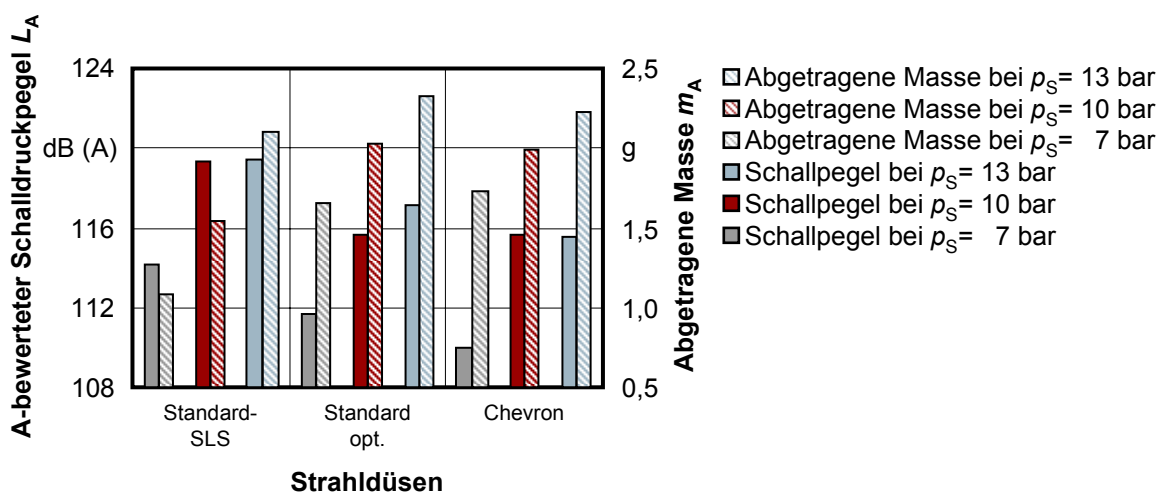


Bild 26: Vergleich der relevanten Strahldüsen hinsichtlich maximalen Schallpegel und Abtragsleistung in Abhängigkeit vom Strahldruck bei $p_T = 6$ bar

4 Fazit

Eine Lärminderung durch speziell geformte Düsenaustrittskanten ist nur in einem gewissen Rahmen möglich. Die aus der Luft- und Raumfahrt übertragenden Konzepte, wie die Mäander und Chevrongüse, haben jedoch bei einem Strahlverfahren, deren Aufgabe es ist Oberflächen zu bearbeiten, nur eine begrenzte Wirkung. Wie gezeigt werden konnte, kann der Schallpegel im Freistrahle reduziert werden. Beim Auftreffen auf eine Oberfläche hingegen entstehen wiederum andere Schallpegel. Der Einsatz dieser Düsenaustrittskante beispielsweise bei Treibwerken ist durchaus sinnvoll, da hier der entstehende Strahl nicht auf ein Hindernis trifft. Als Strahldüse sind diese Konzepte, nicht zuletzt aufgrund des hohen fertigungstechnischen Aufwandes, nur bedingt von Vorteil. Deutlich wurde auch, dass die strömungstechnische Auslegung einer Strahldüse einen wesentlichen Einfluss auf die Leistung und somit auch auf die Lärmentstehung hat. Für die strömungstechnische Optimierung konnte die numerische Strömungssimulation (CFD) erfolgreich eingesetzt werden. Durch die Nutzung der CFD konnte sowohl die Entwicklungszeit als auch die Anzahl der unter realen Bedingungen zu testenden Prototypen erheblich reduziert werden. Dies stellt einen bedeutenden Vorteil gegenüber der zurzeit üblichen Vorgehensweise dar. Die entwickelte optimierte Standarddüse übertrifft die Leistung gegenüber der Standarddüse, bei gleichzeitig reduzierter Lärmemission.

5 Literaturverzeichnis

- [Brä04] Bräunling, W.J.G.: Flugzeugtriebwerke; Grundlagen, Aero-Thermodynamik, Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten und Emissionen; 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, 2004
- [EU03] N. N.: Richtlinie 2003/10/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Februar 2003 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Lärm)
- [VDI99] N. N.: VDI 2058 Blatt 3. Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten, 1999, Beuth Verlag Berlin