

KMA Umwelttechnik GmbH, Königswinter  
in Zusammenarbeit mit dem  
Fachgebiet Gießereitechnik der Universität Kassel

**Luftschleiersysteme für die effektive Erfassung von  
Emissionen an Druckgießmaschinen zur Steigerung der  
Nachhaltigkeit und Energieeffizienz von Gießereien**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az 38828/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Arnulf Goetz M.Sc., KMA Umwelttechnik GmbH  
Milan Wloemer M.Sc., KMA Umwelttechnik GmbH  
Aimo Graf M.Sc., Universität Kassel  
Leon Zimmermann B.Sc., Universität Kassel  
Dr. Holger Wagner, KMA Umwelttechnik GmbH  
Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier, Universität Kassel

Königswinter, März 2026

## Inhaltsverzeichnis

1	Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen .....	3
2	Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen .....	5
3	Zusammenfassung .....	6
4	Einleitung .....	7
5	Hauptteil.....	10
5.1	Arbeitsschritte und angewandte Methoden.....	10
5.1.1	Definition Anforderungsprofil und Erstellung Lasten- und Pflichtenheft (AP 1).....	10
5.1.2	Entwicklung einer Simulationsmethodik zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit der Luftschleiertechologie für skalierbare Maschinengrößen (AP 2).....	11
5.1.3	Entwicklung eines Messkonzepts und Applikation der Messtechnik in die DGM (AP 3 und AP 10) .....	22
5.1.4	Konstruktive Ausarbeitung (AP 4 - 7 + 9) .....	24
5.1.5	Entwicklung Versuchsplan & Beschaffung geeigneter Trennmittel (AP 8).....	26
5.1.6	Parameterstudie in praktischen Gießversuchen (AP 11) .....	28
5.1.7	Iterative Validierung (AP 12 - 13) .....	31
5.1.8	Energetische Systembewertung & Beurteilung der Umweltwirkung (AP 14).....	33
5.1.9	Übertragung der Erkenntnisse auf andere Anwendungsszenarien, insb. Großanlagen (AP 16) .....	35
5.2	Diskussion der Ergebnisse .....	36
5.2.1	Entwicklung eines zuverlässigen Auslegungs- und Simulationsmodells für die wirksame und bedarfsgerechte Gestaltung eines Raucherfassungssystems mit Luftschleier für DGM unterschiedlicher Größen .....	36
5.2.2	Entwicklung einer technischen Umsetzung, die eine Ausstattung von DGM mit einem Raucherfassungssystem mit Luftschleier gemäß dem Auslegungsmodell in möglichst wirtschaftlicher Weise ermöglicht.....	37
5.2.3	Konzept zur Steuerung und Regelung des Raucherfassungssystems im Zusammenspiel mit der Druckgießanlage sowie einem nachfolgenden Abluftfilter, um Wirksamkeit und Ressourceneffizienz bestmöglich aufeinander abstimmen zu können.....	37
5.3	Publikationen .....	38
6	Fazit.....	39
7	Literaturverzeichnis.....	41
8	Anhang .....	42

## 1 Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1: Schematische Prinzipskizze des Sprühprozesses im Druckgießzyklus (links) und Sprühkopf während des Trennmittelauftrags (rechts) .....	7
Abbildung 2: Raucherfassungshaube über Kaltkammerdruckgießzelle am Fachgebiet für Gießereitechnik der Universität Kassel.....	9
Abbildung 3: 3D-Modell eines Luftschleiersystems oberhalb einer Thixomoldinganlage am Fachgebiet Gießereitechnik der Universität Kassel. Dargestellt sind die drei wesentlichen Bestandteile eines Luftschleiersystems: Blaseinheit (türkis), die einen horizontalen Luftstrom erzeugt, Erfassungseinheit (rot), die die durch den Luftstrom abgelenkten Emissionen aus dem Sprühprozess erfasst und der Luftfilter (blau), der die abgesaugte Luft von Verunreinigungen reinigt. ....	12
Abbildung 4: Simulationsraum mit Basisnetz als Raster und drei in grün dargestellten lokalen Netzen mit feinerer Vernetzung .....	13
Abbildung 5: Querschnittsdarstellung des berechneten Simulationsnetzes mit verfeinerten Zellen.....	13
Abbildung 6: Darstellung der Blaseinheit mit dem Leitblechwinkel und der Luftspalthöhe, welche in Simulation und Versuchen variiert werden.....	14
Abbildung 7: Berechnung der Effekte für die durchgeführte Simulation mit zwei Stufen pro Parameter .....	16
Abbildung 8: Detailliertere Effektstudie auf die größten Einflussparameter .....	17
Abbildung 9: Simulationsergebnisse der parametrischen Studie mit Parametern aus Tabelle 3 .....	19
Abbildung 10: Simulationsergebnisse der erfassten Wasserdampfmassenströme für einen Erfassungsvolumenstrom von 14.000 m <sup>3</sup> /h und eine Wurfweite von 1.500 mm .....	20
Abbildung 11: Simulationsergebnisse der erfassten Wasserdampfmassenströme für einen Erfassungsvolumenstrom von 14.000 m <sup>3</sup> /h und eine Wurfweite von 1.970 mm .....	21
Abbildung 12: Vergleich der Simulationsergebnisse für einen Erfassungsvolumenstrom von 14.000 m <sup>3</sup> /h und eine Wurfweite von 1.500 mm ohne Sprühroboter (links) und mit Sprühroboter entsprechend Abbildung 10 (rechts) .....	21
Abbildung 13: Darstellung der Simulationsergebnisse mit kugelförmig dargestelltem Wasserdampf und der pfeilförmig dargestellten, aus der Blaseinheit stammenden Luftströmung.....	22
Abbildung 14: Beispiele untersuchter Varianten der Erfassungshauben (v.l.: Düsenplatte, Wirbelhaube, Schlitze) .....	25
Abbildung 15: YIZUMI UN 1250MGII Thixomoldingmaschine mit installiertem Prototypen der Luftschleieranlage und Messmitteln .....	26
Abbildung 16: Über zehn Gießzyklen aufgezeichnete Massenströme des Trennmittels und des berechneten Wasserdampfmassenstrom im Absaugkanal. Versuchseinstellung: 15.000 m <sup>3</sup> /h Erfassungsvolumenstrom, 3% Blasleistung, 5° Leitblechwinkelanstellung, 5 mm Spalthöhe am Blasdüsenausgang .....	28
Abbildung 17: Grafische Darstellung der ermittelten Erfassungsraten der praktischen Versuche für einem Erfassungsvolumenstrom von 15.000 m <sup>3</sup> /h .....	30
Abbildung 18: Vergleich der Erfassungsraten der praktischen Versuche für Erfassungsvolumenströme von 11.000 m <sup>3</sup> /h (links) und 13.000 m <sup>3</sup> /h (rechts) .....	30
Abbildung 19: Vergleich von Versuchs- mit Simulationsergebnissen bei einer Luftspalthöhe von 5 mm .....	31
Abbildung 20: Vergleich von Versuchs- mit Simulationsergebnissen bei einer Luftspalthöhe von 10 mm .....	32
Abbildung 21: Blech zur Verbesserung der Erfassung .....	33
Abbildung 22: Simulationsergebnisse für vergrößerte Anlagengrößen bei gleichbleibendem Erfassungsvolumenstrom von 15.000 m <sup>3</sup> /h, 10 mm Luftspalthöhe und einen Wasserdampfmassenstrom von 0,5 kg/s .....	35

Tabelle 1: In Parameterstudie zur Bestimmung der Einflüsseffekte nach Siebert untersuchte Einflussgrößen .....	15
Tabelle 2: Parametersätze zur Berechnung einer detaillierteren Effektstudie .....	17
Tabelle 3: Auflistung der Simulationsparameter mit besonderem Fokus auf die Erfassungsvolumenströme .....	18
Tabelle 4: Auflistung der Simulationsparameter mit zugehörigen Werten .....	19
Tabelle 5: Parameter mit zugehörigen Werten zur Erstellung eines Versuchsplans .....	26
Tabelle 6: Ausschnitt des Versuchsplans .....	27
Tabelle 7: Versuchsergebnisse der durchgeführten Versuche mit einer Luftspalthöhe von 5 mm .....	29
Tabelle 8: Versuchsergebnisse der durchgeführten Versuche mit einer Luftspalthöhe von 10 mm .....	29
Tabelle 9: Parameter der parametrischen Studie zum Vergleich mit durchgeführten Versuchen .....	31

## 2 Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

### Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
CAD	Computer-Aided Design
CE	Conformité Européenne
CFD	Computational Fluid Dynamics
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DGM	Druckgussmaschine
DIN	Deutsche Industrie Norm
GTK	Fachgebiet Gießereitechnik der Universität Kassel
KMA	KMA Umwelttechnik GmbH, Königswinter

### Nomenklatur

$g$	Erdbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$h$	Höhe	$mm$
$m$	Masse	$kg$
$\dot{m}$	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$
$v$	Strömungsgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$V$	Volumen	$m^3$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$\frac{m^3}{h}$
$p$	Druck	$Pa$
$P_{Blas}$	Ventilatorleistung	%
$R$	Individuelle Gaskonstante	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$T$	Temperatur	$K$
$x$	Strecke, Wurfweite	$mm$
$\alpha$	Winkel	°
$\eta$	Wirkungs-, Erfassungsgrad	–, %
$\vartheta$	Temperatur	°C
$\varphi$	Relative Luftfeuchte	–

### 3 Zusammenfassung

Im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Entwicklungsprojekts (Az 38828/01) der KMA Umwelttechnik GmbH, Königswinter, und dem Fachgebiet Gießereitechnik der Universität Kassel wurde ein Luftschleiersystem zur lokalen Raucherfassung an Druckgießmaschinen konzipiert, simulativ ausgelegt, konstruktiv umgesetzt und experimentell erprobt. Ausgangspunkt ist die Emissionsentstehung beim Sprühvorgang (Trennmittel-Wasser-Gemisch bzw. ölbasiertes Trennmittel), dessen Verdampfung/Vernebelung ohne lokale Erfassung zu Hallenluftbelastung, Ablagerungen, erhöhten Risiken (u. a. Arbeitsschutz, Brandlast) sowie zu Energieverlusten durch Hallenlüftung führen kann. Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines zuverlässigen Auslegungs- und Simulationsmodells für ein platzsparendes, modular integrierbares Luftschleiersystem, das auf unterschiedliche Maschinengrößen übertragbar ist und eine Erfassungsrate von  $\geq 95\%$  ermöglicht.

Zur Auslegung wurde eine CFD-Simulationsmethodik mit SolidWorks FlowSimulation entwickelt und in Parameterstudien angewandt. Ergänzend wurde ein Messkonzept zur Bewertung der Erfassungsleistung aufgebaut. Parallel erfolgte die konstruktive Entwicklung eines Prototyps und die Integration in eine Thixomolding-Druckgießzelle (Yizumi UN1250MgII) am Fachgebiet Gießereitechnik der Universität Kassel.

Die CFD-Studien identifizierten den Erfassungsvolumenstrom und Blasvolumenstrom als maßgebliche Einflussgrößen auf die Erfassungsrate; Querströmungen und zu hohe Blasvolumenströme wirken nachteilig, ein größerer Luftspalt verbessert die Erfassung. In praktischen Gießversuchen wurde die Zielgröße von 95 % Erfassungsrate erreicht. Die Versuche bestätigten qualitativ die Simulationserkenntnisse; zugleich kamen aber auch die Grenzen des Simulationsmodells zutage.

Energetisch wurde gegenüber einer klassischen Haubenlösung eine um etwa 1,8 kW erhöhte elektrische Leistungsaufnahme ermittelt, was wie erwartet in höheren Betriebskosten resultiert. Im Vergleich zu einer zentralen Abluftanlage ohne lokale Raucherfassung wird jedoch ein deutlich positiver Effekt erzielt, wobei die Reduktion der Betriebskosten um ca. 89 % bei gleichzeitig nahezu 90 % geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt. Materialeitig weist der errichtete Prototyp geringere herstellungsbedingte CO<sub>2</sub>-Äquivalente von ca. 16,3 t CO<sub>2</sub> (Luftschleier) gegenüber ca. 17,1 t CO<sub>2</sub> (Haubenlösung) auf.

Für größere Anlagen zeigen Skalierungssimulationen bei gleichbleibenden Volumenströmen sinkende Erfassungsraten; bei 40 % vergrößerter Geometrie wird eine maximale Erfassungsrate von ca. 75 % simulativ berechnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass für größere Druckgießmaschinen höhere Blas- und insbesondere höhere Erfassungsvolumenströme sowie ein größerer Luftspalt erforderlich sein werden und dass eine Auslegung für Großanlagen nicht allein auf Basis des entwickelten Simulationsmodells erfolgen sollte. Als nächster Schritt werden daher weitere Versuche an einer größeren Anlage empfohlen. Zudem sollen weitere Optimierungen in Bezug auf Energiebedarf und Geometrien wesentlicher Anlagenteile durchgeführt werden.

Insgesamt zeigt sich, dass der Einsatz einer Luftschleiertekologie eine gute Möglichkeit der Erfassung von Emissionen im Druckgießprozess bietet. Insbesondere für Gießereien, in denen der Einsatz einer Haubenlösung betriebsbedingt nicht möglich ist, bietet die Luftschleiertekologie eine gute Alternative.

## 4 Einleitung

Der Druckguss ist ein zentraler Fertigungsprozess in der modernen Leichtmetallgussindustrie. Während jedes Gießzyklus, der typischerweise 50 bis 120 Sekunden dauert, wird die Form nach dem Öffnen zur Entnahme des Gussteils von einem entsprechenden Sprühkopf mit einem Trennmittel-Wassergemisch besprüht, [Nog11]. Dadurch wird das Anhaften des Metalls verhindert. Oftmals wird der Effekt der Verdampfungskühlung auch zur Formtemperierung genutzt. Der Sprühvorgang (siehe Abbildung 1) erfolgt bei Formtemperaturen zwischen 140 und 380 °C, [Fra19]. Die eingesetzten Flüssigkeiten – meist ein Gemisch aus wasserbasiertem Trennmittel und Wasser oder im Rahmen des Minimalmengensprühens ölbasiertes Trennmittel ohne Wasserzusatz – verdampfen zu großen Teilen bei Kontakt mit der heißen Formoberfläche und bilden einen aufsteigenden Sprühnebel [Nog11]. Ohne eine gezielte lokale Raucherfassung breitet sich dieses Emissionsgemisch ungehindert in der Hallenatmosphäre aus. In Abbildung 1 ist das geöffnete Druckgießwerkzeug und der bewegliche Sprühkopf während des Trennmittelauftrags schematisch dargestellt. Die entstehenden Dämpfe enthalten neben Wasser und Ölen auch weitere wasserstoffhaltige Verbindungen. Diese können zu einem erhöhten Wasserstoffgehalt in der Aluminium- bzw. Magnesiumschmelze und damit zu Porosität, somit zur Beeinflussung der Bauteileigenschaften und somit zum Ausschuss der Gussteile oder sogar zu exothermen Magnesiumbränden führen, [Sam92].

### Form geöffnet, Form wird gesprüht (Auftrag Trennmittel)

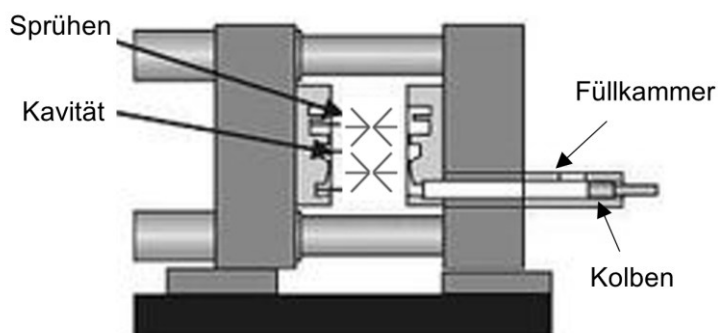


Abbildung 1: Schematische Prinzipskizze des Sprühprozesses im Druckgießzyklus (links) und Sprühkopf während des Trennmittelauftrags (rechts)

Die Umweltrelevanz dieser Emissionen ist vielschichtig. Erstens stellt die Belastung der Hallenluft mit gesundheitsschädlichen Substanzen ein direktes Risiko für das Personal dar. Langfristige Exposition gegenüber fein verteilten Trennmittelbestandteilen kann Atemwegserkrankungen, Hautreizungen und andere gesundheitliche Beeinträchtigungen hervorrufen, [Chi22]. Zweitens führt die Ablagerung des Nebels auf Maschinen, Förderanlagen und Gebäudestrukturen zu einer schmierigen, rutschigen Oberfläche, die nicht nur die Betriebssicherheit mindert, sondern auch die Brandlast erhöht, [DGU20]. Drittens wird die kontaminierte Luft häufig über passive Dachöffnungen oder offene Hallentore in die Umgebung entlassen, wodurch lokale Luftqualität und Ökosysteme beeinträchtigt werden. Der fehlende Rückgewinnungsmechanismus bedeutet zudem einen erheblichen Wärmeverlust: Bei niedrigen Außentemperaturen wird zusätzliche Heizenergie benötigt, um die Hallenluft auf ein arbeitsfähiges Niveau zu bringen, [Jav12]. Wird stattdessen eine raumluftechnische Anlage zur aktiven Lüftung eingesetzt, steigt der Energieverbrauch exponentiell, weil das gesamte Hallenvolumen – und nicht nur das lokale Emissionsvolumen – gefiltert und erwärmt werden muss. Im Vergleich dazu ermöglicht

eine lokale Raucherfassung, dass nur ein relativ kleines Luftvolumen behandelt wird, was sowohl den Energiebedarf als auch die Betriebskosten signifikant reduziert.

Für lokale Raucherfassungssysteme kommen derzeit Erfassungshauben zum Einsatz, siehe Abbildung 2. In diesen Hauben sammeln sich die aufsteigenden Emissionen und können dann abgesaugt und gefiltert werden. Die Erfassungshauben setzen jedoch voraus, dass ausreichend freier Bauraum für die Installation einer Erfassungshaube vorhanden ist. Bei konventionellen DGM-Anlagen stellt dies teilweise Gießereien vor Probleme, aber insbesondere bei den immer größer werdenden Megacasting- bzw. Gigacasting-Systemen, ist dieser Bauraum häufig nicht verfügbar. Außerdem würden die erforderlichen Hauben aufgrund ihrer Größe und ihres Gewichts erhebliche Herausforderungen in Fertigung, Transport und Montage mit sich bringen. In der Praxis verzichten daher zahlreiche Gießereien auf eine lokale Erfassung und lassen die Emissionen unkontrolliert in die Hallenluft entweichen. Für diese Gießereien stellt das in diesem Vorhaben untersuchte Luftschleiersystem eine Möglichkeit dar ressourcen- und energieeffizient Emissionen lokal zu erfassen und einer Filterung zuzuführen, [DBU24].

Ziel des Vorhabens ist es, ein zuverlässiges Auslegungs- und Simulationsmodell für ein lokales Raucherfassungssystem mit Luftschleier zu entwickeln, das für Druckgießmaschinen unterschiedlicher Größenklassen (400 t bis mehr als 5.000 t Schließkraft) anwendbar ist. Das Modell soll ex-ante die notwendige Dimensionierung des Luftschleiers sowie des angeschlossenen Abluftfiltersystems unter Berücksichtigung spezifischer Produktionsbedingungen (z. B. Trennmittelmenge, Zykluszeit, Formtemperatur) ermöglichen. Auf Basis dieser Berechnungen wird ein Prototyp eines modularen, platzsparenden Erfassungssystems realisiert, das ohne umfangreiche bauliche Eingriffe in bestehende DGM-Zellen integriert werden kann. Die Zielvorgaben umfassen sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte: qualitativ soll das System eine kontinuierliche, nahezu vollständige Erfassung des Sprühnebels ( $\geq 95\%$  Erfassungsrate) gewährleisten und gleichzeitig die Prozessstabilität durch Reduktion von Oberflächenverschmutzungen und Wasserstoffeinträgen verbessern. Quantitativ wird ein Energieeinsparpotenzial von bis zu 90 % gegenüber konventioneller Hallenlüftung ohne Wärmerückgewinnung angestrebt, was einer Reduktion des jährlichen Stromverbrauchs um mehrere hundert Megawattstunden entspricht.

Die Aufgabenstellung gliedert sich in mehrere aufeinander abgestimmte Arbeitspakete. Zunächst erfolgt eine umfassende Analyse der bestehenden DGM-Prozesse, um die relevanten Emissionsparameter (Trennmittelzusammensetzung, Sprühvolumen, Temperaturprofile, Zyklusfrequenz) zu quantifizieren. Auf dieser Basis wird ein Simulationsmodell entwickelt, das Strömungs- und Thermodynamik-Berechnungen (CFD) durchführt, um die Bildung und Ausbreitung des Sprühnebels zu prognostizieren. Anschließend wird das Modell zur Optimierung des Luftschleiersystems verwendet: Die Geometrie, die Strömungsführung und die Ansteuerung von Unter- bzw. Überdruck werden iterativ angepasst, um die gewünschte Erfassungsrate bei minimalem Energieaufwand zu erreichen. Parallel dazu wird ein Prototyp-Erfassungssystem konstruiert, das aus einer kompakten Haube, einem modularen Luftschleier und einem integrierten Filtermodul besteht. Die mechanische Auslegung berücksichtigt die Beschränkungen kleiner DGM, sodass das System sowohl nachträglich als auch bei Neuanlagen ohne umfangreiche bauliche Änderungen installiert werden kann. Das fertige System wird anschließend in einer vollautomatisierten Thixomolding-Druckgießzelle des Fachgebiets Gießereitechnik der Universität Kassel unter realen Produktionsbedingungen getestet. Dabei werden Messreihen zur Bestimmung der tatsächlichen Erfassungsrate und des Energieverbrauchs durchgeführt.

Die gewonnenen Daten dienen sowohl der Validierung des Simulationsmodells als auch der Feinabstimmung des Prototyps. Abschließend wird ein Leitfaden erstellt, der die Vorgehensweise zur Auslegung, Installation und Inbetriebnahme des Luftschleiersystems für unterschiedliche Maschinentypen beschreibt und damit die Transferierbarkeit des Lösungsansatzes in die Praxis sicherstellt.



Abbildung 2: Raucherfassungshaube über Kaltkammerdruckgießzelle am Fachgebiet für Gießereitechnik der Universität Kassel

Durch die Kombination von fundierter Modellierung, praxisnaher Prototypentwicklung und umfassender experimenteller Validierung schließt das Projekt die bislang bestehende Lücke im technischen Lösungsangebot für die lokale Raucherfassung bei Druckgießmaschinen. Die Möglichkeit, Emissionen bereits am Entstehungsort zu erfassen und zu behandeln, reduziert nicht nur den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Bilanz, sondern verbessert gleichzeitig die Arbeitsplatzbedingungen, erhöht die Prozessstabilität und minimiert das Risiko von Materialausschuss. Damit leistet das Vorhaben einen wesentlichen Beitrag zu den übergeordneten Zielen der Gießereibranche, die sich zunehmend nach verbesserter Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Arbeitssicherheit ausrichtet. Die im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse und das daraus resultierende Auslegungs- und Wirkungsmodell bilden die Grundlage für eine weltweite Anwendung des Ansatzes und ermöglichen es Gießereien, die gesetzlichen Vorgaben zur Emissionsbegrenzung zu erfüllen, ohne dabei erhebliche Investitions- oder Betriebsaufwände in Kauf nehmen zu müssen.

## 5 Hauptteil

Im Folgenden sollen die Durchführung des Vorhabens und die Ergebnisse detailliert dokumentiert werden. Zunächst werden die einzelnen Arbeitsschritte anhand der im Projektantrag formulierten Arbeitspakete (AP), die dabei angewandten Methoden und die erzielten Ergebnisse dargestellt. Anschließend erfolgt eine ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse gegenüber dem Stand der Technik. Abschließend werden Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse vorgestellt.

### 5.1 Arbeitsschritte und angewandte Methoden

#### 5.1.1 Definition Anforderungsprofil und Erstellung Lasten- und Pflichtenheft (AP 1)

Zur strukturierten Entwicklung des Luftschleiersystems wurde zunächst ein umfassendes Anforderungsprofil erstellt. Dieses bildete die Grundlage für die anschließende Ausarbeitung des Lasten- und Pflichtenhefts. Ziel des Anforderungsprofils war es, alle relevanten technischen, betrieblichen, wirtschaftlichen sowie umwelt- und arbeitsschutzbezogenen Randbedingungen systematisch zu erfassen und zu gewichten.

Die Anforderungen wurden dabei in mehrere Kategorien gegliedert. Zu den zentralen technischen Anforderungen zählten die zuverlässige Erfassung der beim Druckguss- bzw. Sprühprozess entstehenden Emissionen (insbesondere Aerosole aus Trennmitteln), die kontrollierte Führung der belasteten Luftströme sowie deren Abführung zu einer nachgeschalteten Filteranlage. Ein wesentliches funktionales Kernelement stellte dabei der Einsatz eines Luftschleiers dar, der einen stabilen, reproduzierbaren Luftstrom erzeugt und die Emissionen gezielt in Richtung der Erfassungseinheit lenkt.

Darüber hinaus wurden betriebliche Anforderungen definiert, die sicherstellen sollten, dass der Produktionsprozess, Rüstvorgänge sowie Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten durch das neue System nicht beeinträchtigt werden. Besondere Bedeutung kam hierbei der Zugänglichkeit der Gießzelle, der Berücksichtigung beweglicher Maschinenteile sowie der Interaktion mit Sprühsystemen und Entnahmerobotern zu.

Ergänzend wurden wirtschaftliche Anforderungen formuliert, wonach Investitions- und Betriebskosten das Niveau bestehender Erfassungssysteme nicht überschreiten sollten. Gleichzeitig sollte der Bauraumbedarf reduziert und eine möglichst flexible Anpassbarkeit an unterschiedliche Maschinengrößen und -konfigurationen gewährleistet sein. Weitere Anforderungen betrafen Aspekte des Arbeits- und Gesundheitsschutzes, insbesondere die Minimierung von Lärmimmissionen sowie eine ergonomische Ausführung wartungsrelevanter Komponenten.

Auf Basis des definierten Anforderungsprofils wurde ein Lastenheft erstellt, welches die Anforderungen an die zu entwickelnde Raucherfassungsanlage aus Betreibersicht beschreibt. Das Lastenheft formuliert dabei ausschließlich, welche Anforderungen das System erfüllen muss, ohne eine konkrete technische Umsetzung vorzugeben.

Zentraler Bestandteil des Lastenhefts ist die Forderung nach einer modular aufgebauten Emissionserfassung bestehend aus einer Blaseinheit zur Erzeugung eines Luftschleiers, einer Erfassungseinheit zur Aufnahme der belasteten Luft sowie einer Filteranlage mit integriertem

Ventilator zur Emissionsminderung. Die Lösung sollte sowohl für unterschiedliche Sprühverfahren (konventionelles Sprühen, Minimalmengen-, Mikro- und Hybridsprühen) als auch für verschiedene Maschinengrößen skalierbar einsetzbar sein.

Weiterhin wurden Anforderungen an die Einstellbarkeit des Luftschleiers (Volumenstrom, Sprühwinkel, optionale Höhenverstellung), an die Wartungs- und Reinigungszugänglichkeit der Erfassungseinheit sowie an den Umgang mit Kondensatbildung formuliert. Zudem enthält das Lastenheft Anforderungen an die Integration in bestehende Maschinenperipherie, insbesondere im Hinblick auf Hallenkräne, Versorgungsleitungen, bewegliche Maschinenteile und Entnahmeroboter.

Ergänzend wurden Anforderungen an Sensorik und Datenerfassung definiert, um relevante Betriebsparameter wie Volumenströme, Energieverbräuche und Emissionskennwerte erfassen und überwachen zu können. Diese Daten bilden zugleich eine Grundlage für die wissenschaftliche Bewertung der Wirksamkeit der entwickelten Lösung im Projektverlauf.

Im Anschluss an die Erstellung des Lastenhefts wurden die dort formulierten Anforderungen in einem Pflichtenheft konkretisiert. Ziel des Pflichtenhefts war es, darzustellen, wie die definierten Anforderungen technisch umgesetzt werden sollen. Hierzu erfolgte die Überführung der funktionalen und betrieblichen Anforderungen in konkrete konstruktive, strömungstechnische und regelungstechnische Konzepte.

Das Pflichtenheft beschreibt unter anderem das grundsätzliche Funktionsprinzip der Luftschleieranlage, die Auslegung der Blas- und Erfassungseinheit, die Anbindung an die Filtertechnik sowie die vorgesehenen Steuerungs- und Synchronisationskonzepte mit dem Sprühzyklus der Druckgussanlage. Zudem wurden Kriterien zur Überprüfung der Zielerreichung festgelegt, die als Grundlage für spätere Versuche und Optimierungen dienen.

Das erarbeitete Lasten- und Pflichtenheft stellte eine zentrale Grundlage für die weitere Projektbearbeitung dar. Es diente sowohl als Planungsinstrument für die konstruktive Umsetzung als auch als Bewertungsmaßstab zur Beurteilung der entwickelten Prototypen und Versuchsergebnisse. Durch die strukturierte Definition der Anforderungen konnte die Entwicklung der Hauben-Alternative zielgerichtet erfolgen und die Wirksamkeit der Lösung im Hinblick auf Emissionsminderung, Betriebstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit systematisch untersucht werden.

#### 5.1.2 Entwicklung einer Simulationsmethodik zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit der Luftschleier-technologie für skalierbare Maschinengrößen (AP 2)

Zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit und zur Dimensionierung von Luftschleieranlagen für unterschiedliche Maschinengrößen wurde eine CFD-Simulationsmethodik entwickelt. Nach einem kurzen Auswahlprozess einigten sich die Projektpartner auf das in die CAD-Software SolidWorks integrierte CFD-Modul SolidWorks FlowSimulation. In SolidWorks wurde ein vereinfachtes Modell der am Fachgebiet für Gießereitechnik der Universität Kassel vorhandenen Thixomoldingmaschine Yizumi UN1250MgII nachkonstruiert und um die Bestandteile eines Luftschleiersystems (Blas- und Erfassungseinheit) ergänzt. Abbildung 3 zeigt ein 3D-Modell des Luftschleiersystems sowie die Thixomolding-Maschine des Fachgebiets Gießereitechnik, die als Träger für den Prototypen dient. Die wesentlichen Bestandteile des Luftschleiersystems sind farbig hervorgehoben.

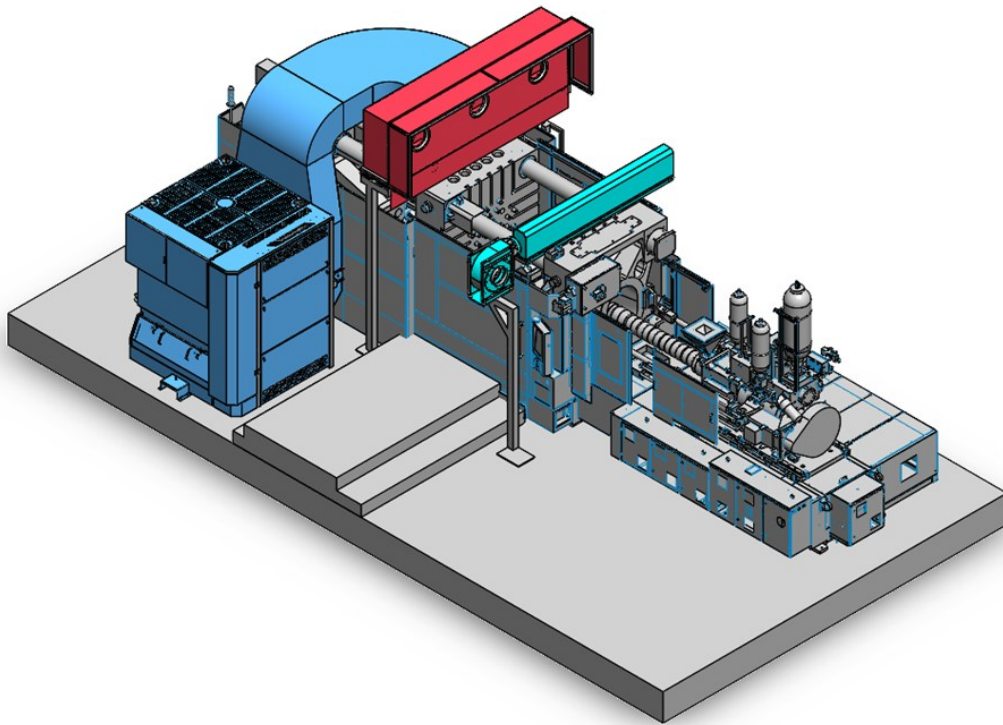


Abbildung 3: 3D-Modell eines Luftschleiersystems oberhalb einer Thixomoldinganlage am Fachgebiet Gießereitechnik der Universität Kassel. Dargestellt sind die drei wesentlichen Bestandteile eines Luftschleiersystems: Blaseinheit (türkis), die einen horizontalen Luftstrom erzeugt, Erfassungseinheit (rot), die die durch den Luftstrom abgelenkten Emissionen aus dem Sprühprozess erfasst und der Luftfilter (blau), der die abgasaugte Luft von Verunreinigungen reinigt.

Für die CFD-Simulationen wurden in FlowSimulation folgende grundlegende Simulations-Einstellungen vorgenommen:

- Externe Strömung außerhalb der Geometrie
- Schwerkraft mit  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Luft und Wasserdampf als Fluide
- Anfangsbedingungen:  $p = 101.325 \text{ Pa}$ ,  $T = 293,2 \text{ K}$ , 100 % Luft, 0 % Wasserdampf

Neben einem globalen Simulationsnetz wurden drei lokale Netze im Modell definiert, um in den entsprechenden Bereichen eine höhere Genauigkeit der Simulation zu erreichen. Abbildung 4 zeigt das globale Netz und die in Grün dargestellten lokalen Netze.

Durch die Netzverfeinerung werden die quaderförmigen Volumenelemente aufgeteilt, wodurch in relevanten Bereichen eine hohe Genauigkeit des Netzes erreicht wird. Das nach der Netzverfeinerung erhaltene Netz ist in Abbildung 5 im Querschnitt dargestellt.

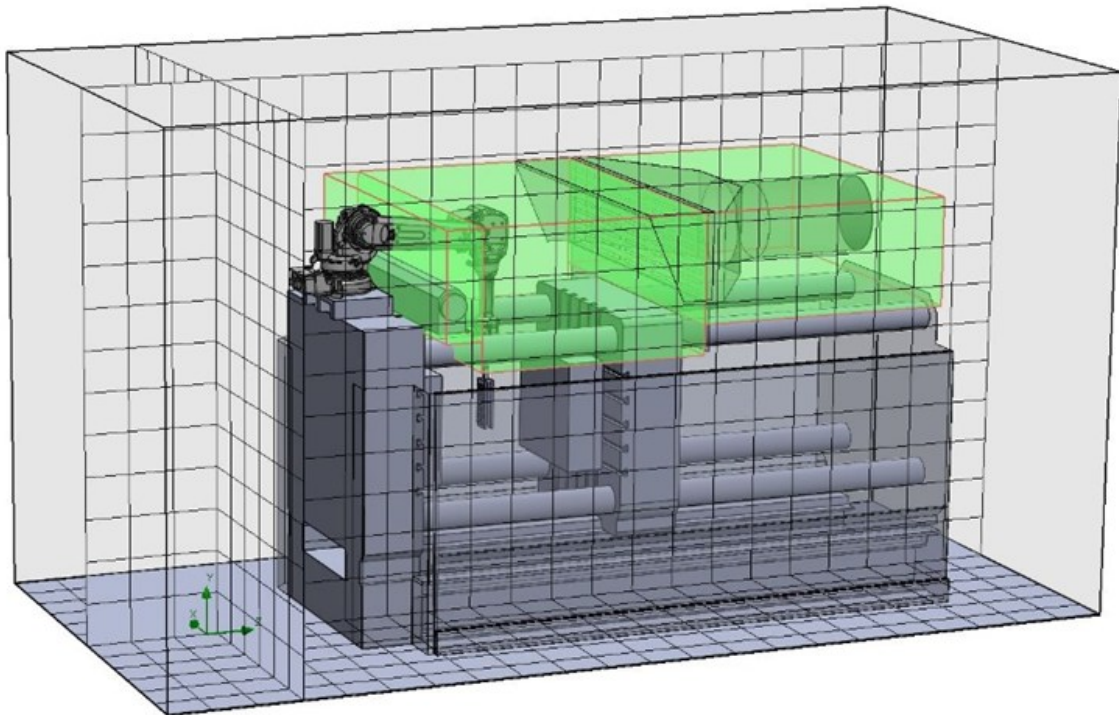


Abbildung 4: Simulationsraum mit Basisnetz als Raster und drei in grün dargestellten lokalen Netzen mit feinerer Ver-  
netzung

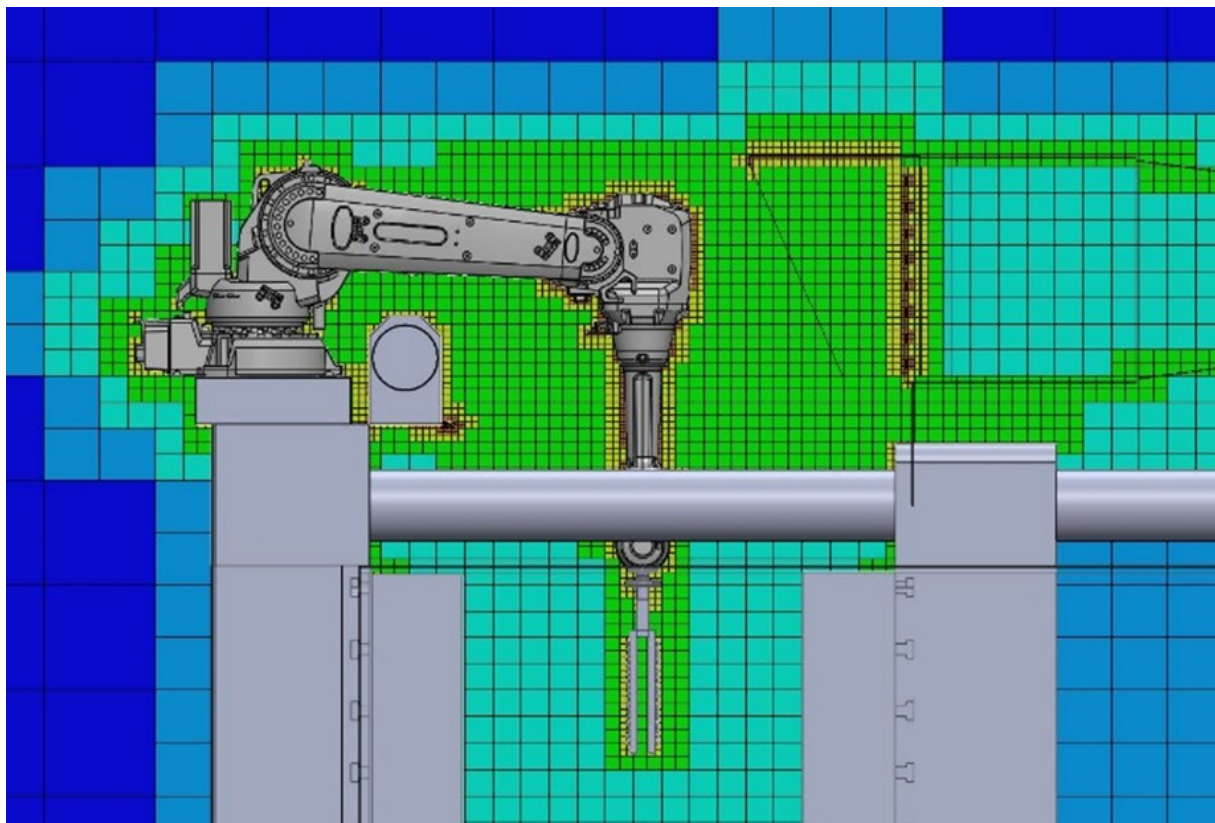


Abbildung 5: Querschnittsdarstellung des berechneten Simulationsnetzes mit verfeinerten Zellen

Als Randbedingungen für die Simulation wurden verschiedene Parameter definiert: An den inneren Flächen der Lufterlässe der Blaseinheit wurden Volumenstromeinlässe definiert. Dadurch wurde gewährleistet, dass sich wie in der Realität Verwirbelungen und Strömungsunterschiede im Inneren der Blaseinheit auch auf den Blasstrahl auswirkten. Am Übergang von Erfassungseinheit und Rohrleitung wurde eine Fläche definiert, die als Volumenstromauslass diente. An dieser Stelle wurde der Erfassungsvolumenstrom eingestellt und der Massenstrom des Wasserdampfs als Simulations- und Berechnungsziel berechnet. Der hier ermittelte Massenstrom von Wasserdampf wurde mit der über die Formflächen eingebrachten Wasserdampfmenge verglichen. Daraus ließ sich die Erfassungsrate des Luftschleiersystemmodells als das Verhältnis der abgesaugten und der über die Formflächen eingebrachten Wasserdampfmenge berechnen.

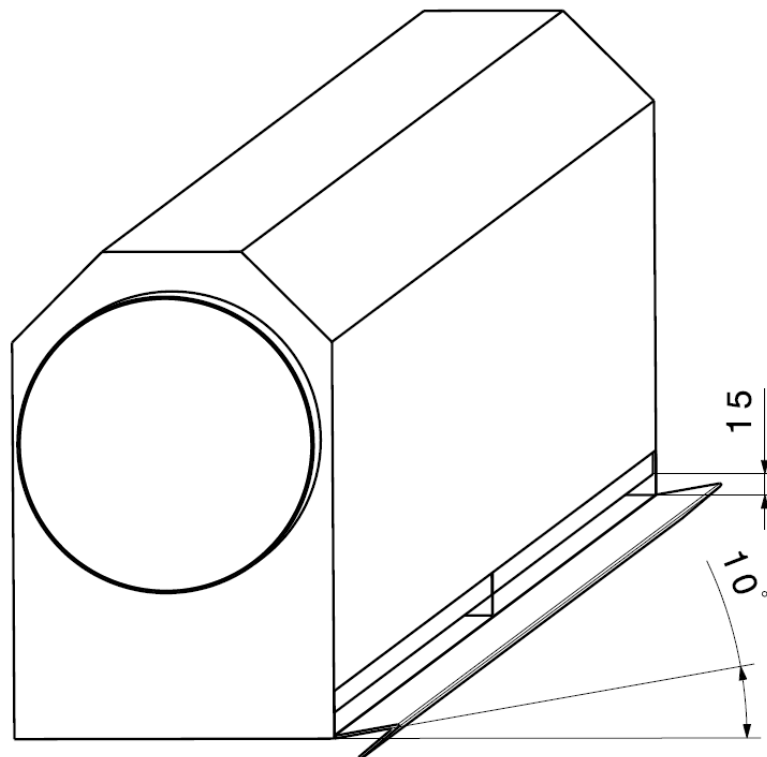


Abbildung 6: Darstellung der Blaseinheit mit dem Leitblechwinkel und der Luftspalthöhe, welche in Simulation und Versuchen variiert werden

Die Simulationsdurchführung erfolgte in Parameterstudien. Dabei werden Parameter mit zugehörigen Werten definiert. Die Software erstellte daraus einen vollfaktoriellen Simulationsplan und führte die Einzelsimulationen nacheinander aus. Neben den Volumenströmen wurden dabei auch die Höhe des Luftspaltes sowie der horizontale Abstand zwischen Blas- und Erfassungseinheit, der als Wurfweite bezeichnet wird, variiert.

Zunächst wurde eine Parameterstudie zur Bestimmung der Einflüsseffekte nach Sieberts [Sie17] durchgeführt, um die größten Einflussgrößen auf die Erfassungsrate zu ermitteln. Untersucht wurden die in Tabelle 1 angegebenen Parameter.

Aus den durchgeführten Simulationen wurden sogenannte Effekte berechnet. Ein Effekt ist die Differenz der Mittelwerte aller Ergebnisse zweier Einflusswerte bei gleichem Einflussfaktor. Je größer der Effekt ist, desto größer ist der Einfluss des Einflussfaktors auf das Ergebnis. Dabei erhält jeder Parameter ein eigenes Teildiagramm, das den Effekt der Änderung des jeweiligen Parameters auf die Erfassungsrate darstellt. Da zu erwarten war, dass bei einem höheren Wasserdampfmassenstrom, der über die Werkzeughälften in das System gelangt, auch ein größerer Massenstrom von Wasser über die Erfassung abgesaugt wird, der somit direkt in das Simulationsergebnis eingeht, wurde neben der absoluten auch eine prozentuale Erfassungsrate bestimmt. Bei dieser wurde der Wassermassenstrom an der Erfassung auf den in das Simulationsmodell eingebrachten Wassermassenstrom bezogen.

Tabelle 1: In Parameterstudie zur Bestimmung der Einflüsseffekte nach Siebert untersuchte Einflussgrößen

Parameter	Unterer Wert	Oberer Wert	Stufenanzahl
Blasvolumenstrom $\dot{V}_{Blas}$	3.000 m <sup>3</sup> /h	3.600 m <sup>3</sup> /h	2
Erfassungsvolumenstrom $\dot{V}_{Erf}$	9.000 m <sup>3</sup> /h	12.000 m <sup>3</sup> /h	2
Wasserdampfmassenstrom $\dot{m}_D$	0,5 kg/s	0,8 kg/s	2
Hallenluftquerströmung $v_{quer}$	0 m/s	3 m/s	2
Werkzeugtemperatur $\vartheta$	220 °C	270 °C	2
Winkel der Blaseinheit $\alpha$	0°	5°	2
Luftspalthöhe $h_0$	3 mm	6 mm	2

Aus den in Abbildung 6 dargestellten Diagrammen lässt sich ablesen, dass die größten Einflussgrößen auf den Wirkungsgrad des Luftschleiersystems der Erfassungsvolumenstrom, also die Menge der abgesaugten Luft, sowie die Luftspalthöhe am Luftauslass der Blaseinheit sind. Beide Parameter sorgen für höhere Erfassungsraten, wenn ihre Zahlenwerte größer sind. Umgekehrt proportional wirkt der ins System gebrachte Wasserdampfmassenstrom auf die Erfassungsrate. Dies ist plausibel, da durch größere Dampfmengen auch die konstruktive Leistungskapazität des Luftschleiersystems steigen muss. Ebenfalls umgekehrt proportional wirken der Blasvolumenstrom und eine Querströmung auf die Erfassungsrate. Die Werkzeugtemperatur und der Winkel der Blaseinheit haben bei diesen Berechnungen kaum Einfluss auf die Erfassungsrate. Wechselwirkungseffekte wurden nicht betrachtet.

Diese erste Effektuntersuchung zeigt, dass sich bei großen Erfassungsvolumenströmen, größeren Luftspalthöhen und kleineren Blasvolumenströmen gute Erfassungsraten ergeben. Eine impulsarme Transportströmung und eine leistungsstarke Absaugung sind dafür notwendig. Dies deckt sich mit der VDI-Richtlinie 2262 Blatt 4 für sogenannte Push-Pull-Systeme für die Absaugung von Dämpfen oberhalb von Flüssigkeitsbädern mit gegenüberliegendem Blasstrahl. Die Richtlinie empfiehlt impulsarme Nachführungen der Zuluft, damit diese nicht zur Störströmung wird, [VDI02].

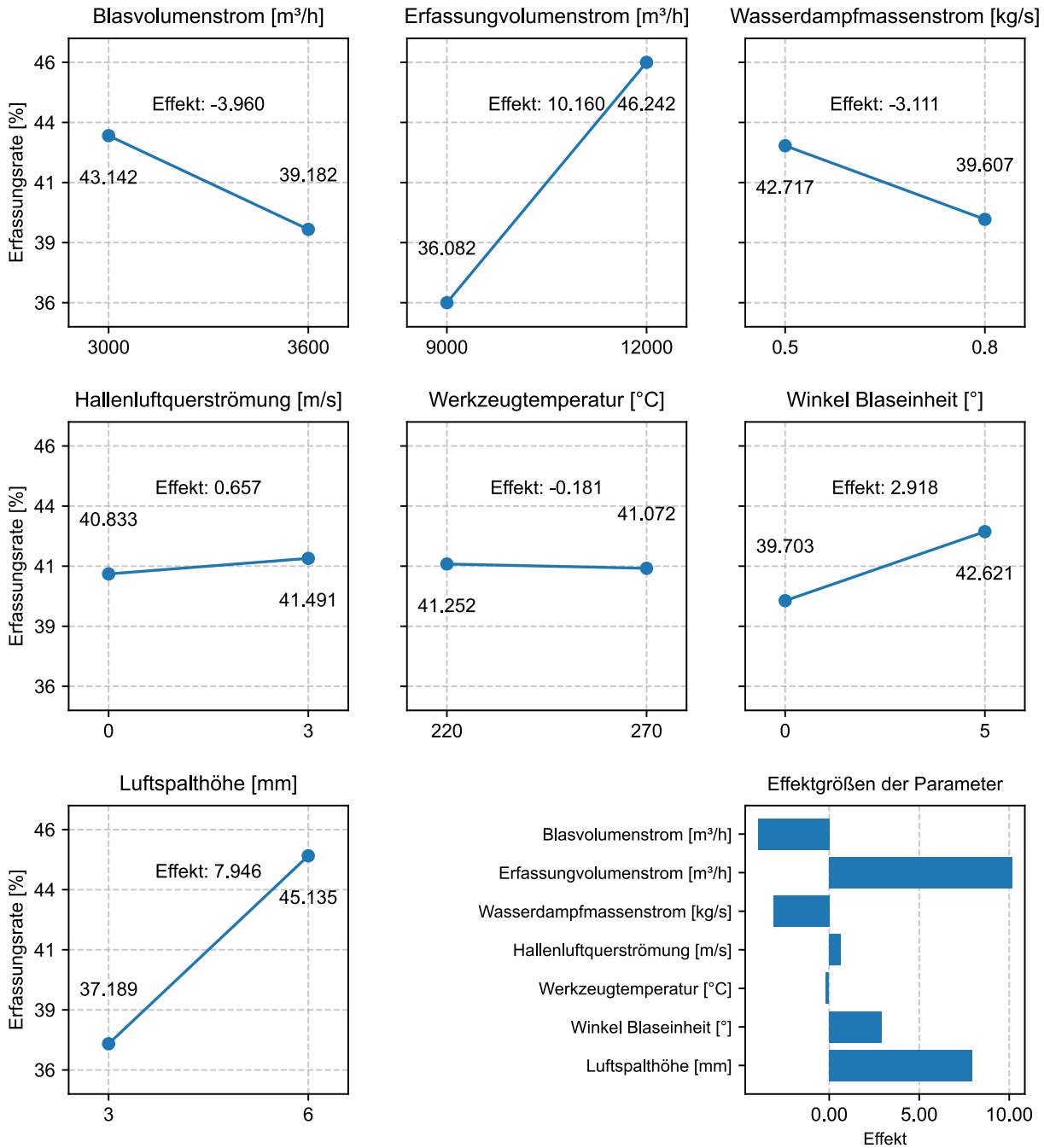


Abbildung 7: Berechnung der Effekte für die durchgeführte Simulation mit zwei Stufen pro Parameter

In einer weiteren Effektstudie wurden die drei Parameter mit dem größten Einfluss noch einmal genauer untersucht. Hierzu wurden die Effekte bei vierstufigen Parametervariationen betrachtet, um nichtlineare Zusammenhänge sowie lokale Minima bzw. Maxima zu identifizieren. Die untersuchten Parameterwerte sind in Tabelle 2 dargestellt. Der Blasvolumenstrom wurde um weitere Einstellungen nach unten erweitert, da geringere Blasvolumenströme in den vorherigen Untersuchungen zu besseren Ergebnissen geführt hatten. Ebenso wurde das Spektrum der Erfassungsvolumenströme nach unten erweitert, da sich im Lasten- und Pflichtenheft auf eine Begrenzung der Filterleistung von 15.000 m³/h geeinigt wurde. Die untersuchten Luftspalthöhen am Auslass der Blaseinheit wurden im Vergleich zur vorherigen Studie nach oben ergänzt, da sich abzeichnete, dass höhere Luftspalte bessere Erfassungsgrade erzielten.

Tabelle 2: Parametersätze zur Berechnung einer detaillierteren Effektstudie

Parameter	Wertebereich	Intervall	Stufenanzahl
Blasvolumenstrom $\dot{V}_{Blas}$	1.800 – 3.600 m <sup>3</sup> /h	600 m <sup>3</sup> /h	4
Erfassungsvolumenstrom $\dot{V}_{Erf}$	6.000 – 12.000 m <sup>3</sup> /h	2.000 m <sup>3</sup> /h	4
Luftspalthöhe $h_0$	3 – 12 mm	3 mm	4

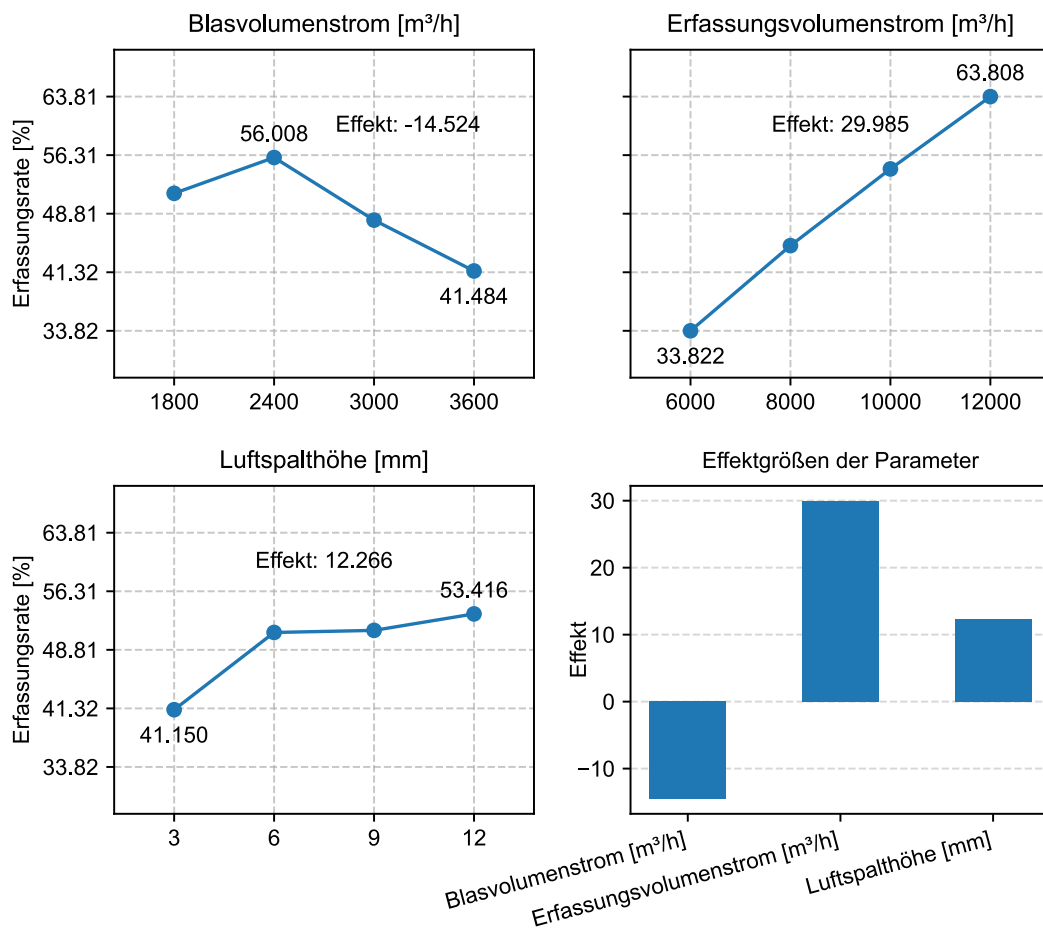


Abbildung 8: Detailliertere Effektstudie auf die größten Einflussparameter

Die gemittelten Erfassungsraten aus dieser Studie sind in Abbildung 8 dargestellt. Tatsächlich konnte ein Optimum der Erfassungsrate im Bereich um 2.400 m<sup>3</sup>/h Blasvolumenstrom festgestellt werden, während die Erfassungsrate linear proportional zum Erfassungsvolumenstrom steigt. Auch bei einer Vergrößerung der Luftspalthöhe steigt die Erfassungsrate an, allerdings nicht linear. Eine deutliche Verbesserung der Erfassungsrate ist bei einer Vergrößerung des Luftspalts von 3 auf 6 mm festzustellen. Eine weitere Aufweitung des Düsenquerschnitts führt im untersuchten Wertebereich dagegen nur zu vergleichsweise geringen Verbesserungen.

Auch bei dieser Untersuchung wurden keine Wechselwirkungseffekte betrachtet.

In weiteren hier nicht aufgeführten Simulationen wurden Untersuchungen bezüglich der Geometrie und Ausführung der einzelnen Komponenten des Luftschleiersystems durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse flossen in die konstruktive Ausarbeitung des Luftschleiersystems ein. Dabei wurden u.a. die Blas- und Erfassungseinheit strömungstechnisch verbessert, sowie untersucht welches Layout des Prallschilds an der Erfassungseinheit bessere Ergebnisse erzielt. Weitere Erläuterungen dazu finden sich in Abschnitt 5.1.4.

Anschließend an die Effektstudien wurden parametrische Studien durchgeführt, die das Ziel haben, die idealen Einstellungsparameter für das Luftschleiersystem zu identifizieren. Zunächst wurde dazu eine parametrische Studie mit den in Tabelle 3 aufgeführten Parametern durchgeführt. Ein besonderer Fokus lag dabei auf dem Erfassungsvolumenstrom. Insgesamt ergaben sich aus dem vollfaktoriellen Simulationsplan 55 Einzelsimulationen. In dieser parametrischen Studie wurde der Sprühroboter nicht berücksichtigt.

Tabelle 3: Auflistung der Simulationsparameter mit besonderem Fokus auf die Erfassungsvolumenströme

Parameter	Wertebereich	Intervall	Stufenanzahl
Blasvolumenstrom $\dot{V}_{Blas}$	1.000 – 5.000 m <sup>3</sup> /h	1.000 m <sup>3</sup> /h	5
Erfassungsvolumenstrom $\dot{V}_{Erf}$	5.000 – 15.000 m <sup>3</sup> /h	1.000 m <sup>3</sup> /h	11
Luftspalthöhe $h_0$	15 mm	-	1
Luftleitblechwinkel $\alpha$	85°	-	1
Wurfweite $x$	1.500 mm	-	1

Die Simulationsergebnisse aus dieser parametrischen Studie sind in Abbildung 9 dargestellt. Es zeigt sich, dass mit ansteigendem Erfassungsvolumenstrom eine stetige Verbesserung der Erfassungsrate einhergeht. Darüber hinaus lässt sich ablesen, dass die Simulationen mit einem Blasvolumenstrom von 2.000 m<sup>3</sup>/h die besten Ergebnisse erzielten. Bei hohen Erfassungsvolumenströmen von 15.000 m<sup>3</sup>/h können bis zu 98% Wirkungsgrad erreicht werden.

In weiteren Simulationen wurden die Erfassungsvolumenströme auf zwei Werte beschränkt, dafür wurde jedoch eine höhere Anzahl an Blasvolumenströmen simuliert als in der vorherigen parametrischen Studie. Daneben wurden auch die Luftspalthöhe und diewurfweite variiert. Im Gegensatz zur vorherigen parametrischen Studie wurde in dieser der Sprühroboter dem Simulationsmodell hinzugefügt.

Aus den in Tabelle 4 dargestellten Parametern ergaben sich 240 Einzelsimulationen. Der Einlassmassenstrom des Wasserdampfs, der über die Werkzeughälften in das System eingebracht wurde, wurde auf 0,5 kg/s festgelegt. Dieser Wert wurde mit dem in der Simulation errechneten Auslassmassenstrom an der Erfassungseinheit verglichen.

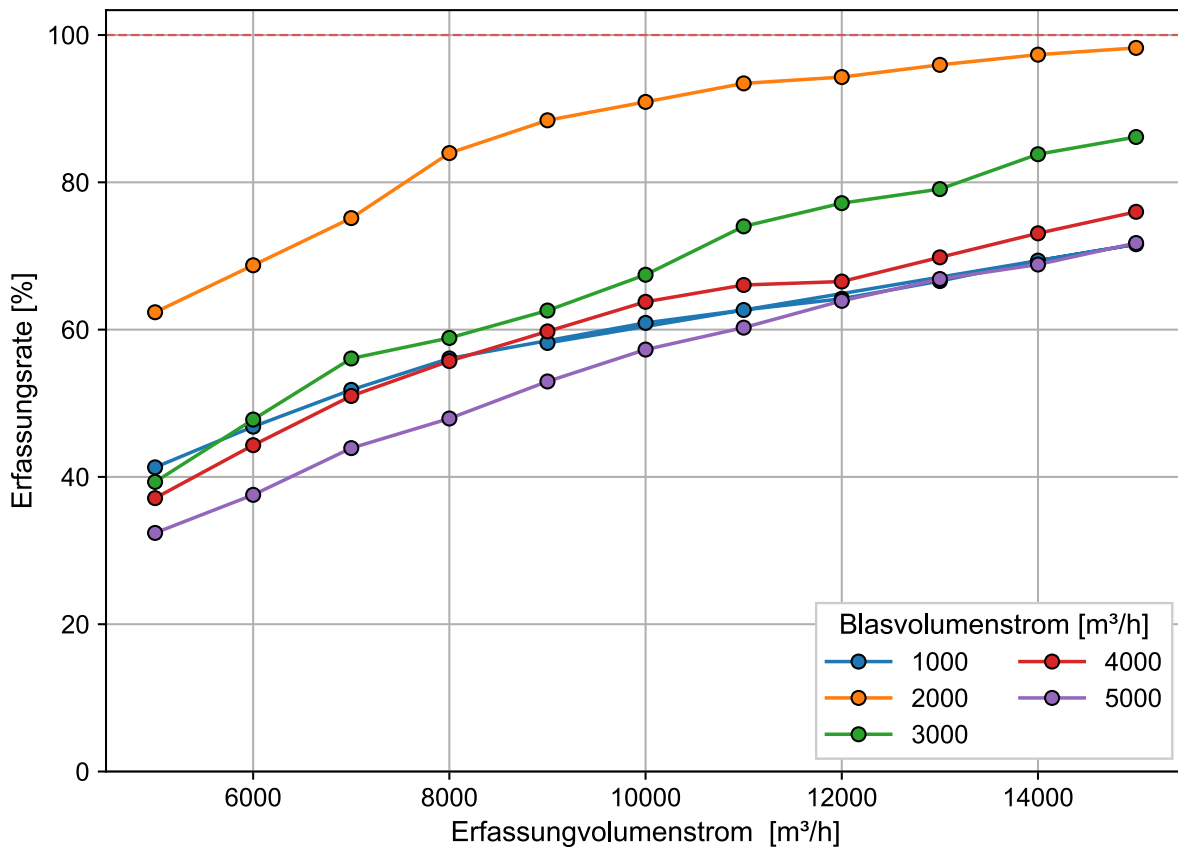


Abbildung 9: Simulationsergebnisse der parametrischen Studie mit Parametern aus Tabelle 3

Tabelle 4: Auflistung der Simulationsparameter mit zugehörigen Werten

Parameter	Wertebereich	Intervall	Stufenanzahl
Blasvolumenstrom $\dot{V}_{Blas}$	500 – 5.000 m³/h	500 m³/h	10
Erfassungsvolumenstrom $\dot{V}_{Erf}$	12.000 – 14.000 m³/h	2.000 m³/h	2
Luftspalthöhe $h_0$	5 – 30 mm	5 mm	6
Wurfweite $x$	1.500 – 1.970 mm	470 mm	2

Die höchsten Auslassmassenströme wurden in den Simulationen bei einem Erfassungsvolumenstrom von 14.000 m³/h und einer Wurfweite von 1.500 m³/h berechnet. Diese Simulationsergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt. Es zeigte sich, dass der erfasste Wasserdampfmassenstrom im Verlauf ein Maximum erreicht. Für kleinere Luftspalthöhen lag dieses Maximum bei niedrigeren Blasvolumenströmen. Die größten Mengen Wasserdampf wurden in der Simulation bei Blasvolumenströmen zwischen 1.500 und 2.500 m³/h erfasst. Die höchste simulierte Erfassungsrate liegt bei 98%.

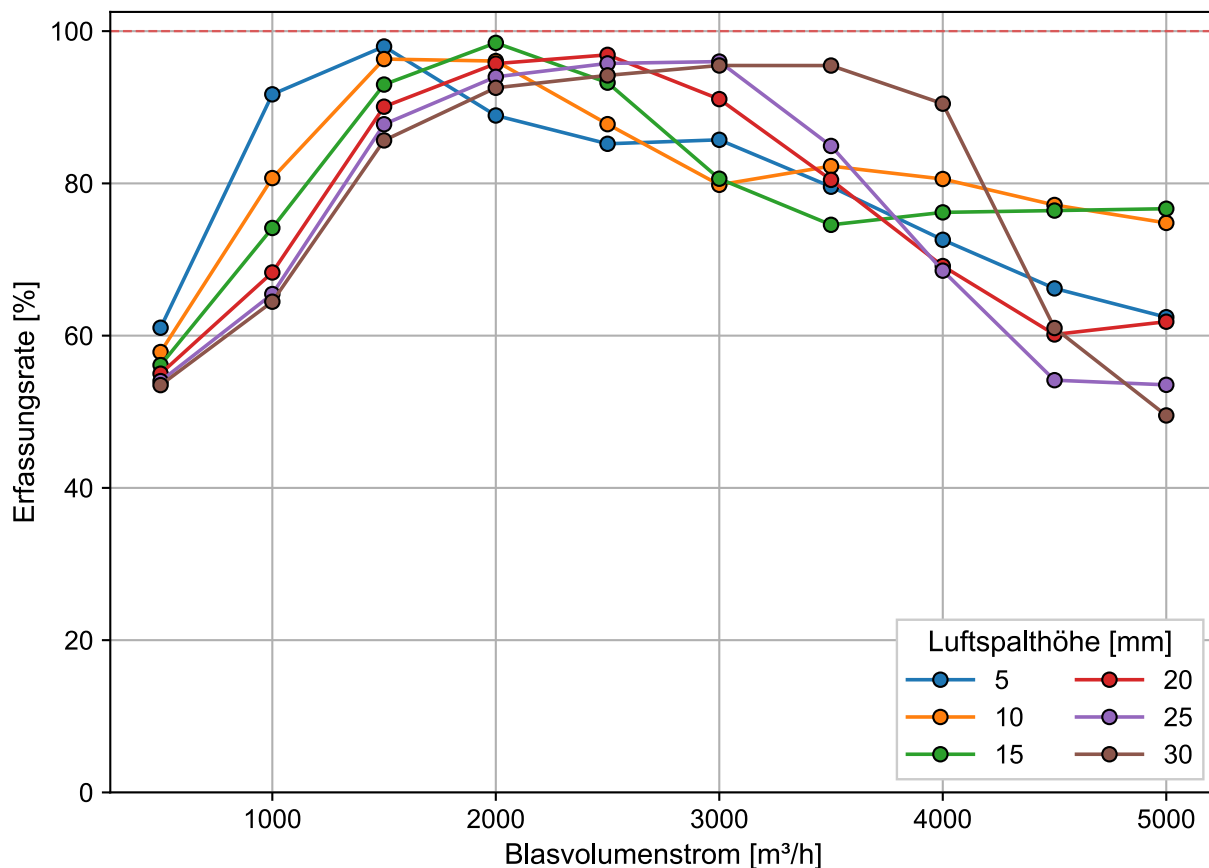


Abbildung 10: Simulationsergebnisse der erfassten Wasserdampfmassenströme für einen Erfassungsvolumenstrom von 14.000 m³/h und eine Wurfweite von 1.500 mm

In Abbildung 11 sind die Simulationsergebnisse für eine Wurfweite von 1.970 mm dargestellt. Es zeigt sich, dass die Erfassungsraten insgesamt geringer ausfallen als bei der geringeren und zuvor betrachteten Wurfweite. Besonders groß ist der Unterschied für niedrige Blasvolumenströme. Die Maxima der Erfassungsraten in den einzelnen Datenreihen liegen gegenüber der vorherigen Simulation bei höheren Blasvolumenströmen. Daraus lässt sich ableiten, dass Luftschleiersysteme auf größeren DGM größere Blasvolumenströme benötigen. Weil allgemein der Wirkungsgrad bei größeren Wurfweiten abnimmt, muss davon ausgegangen werden, dass bei größeren DGM höhere Erfassungsvolumenströme, also größere Luftfilter benötigt werden.

Zum Vergleich des Einflusses des Sprühroboters wird die parametrische Studie aus Tabelle 4 mit und ohne das CAD-Modell des Sprühroboters durchgeführt. Zum Vergleich beider Ergebnisse sind diese in Abbildung 12 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Einfluss des Sprüharms als Störkontur im vorliegenden Simulationsmodell nur geringfügige Effekte auf die Leistungsfähigkeit des Luftschleiersystems hat.

In Abbildung 13 ist das Simulationsergebnis für die Einzelsimulation mit der höchsten Erfassungsraten dargestellt. Dabei ist der aufsteigende Wasserdampf als Kugeln dargestellt und der von der Blaseinheit gebildete Luftschleier als Pfeile. Es zeigt sich, dass aufsteigender Wasserdampf abgelenkt und durch die Erfassungseinheit abgesaugt werden.

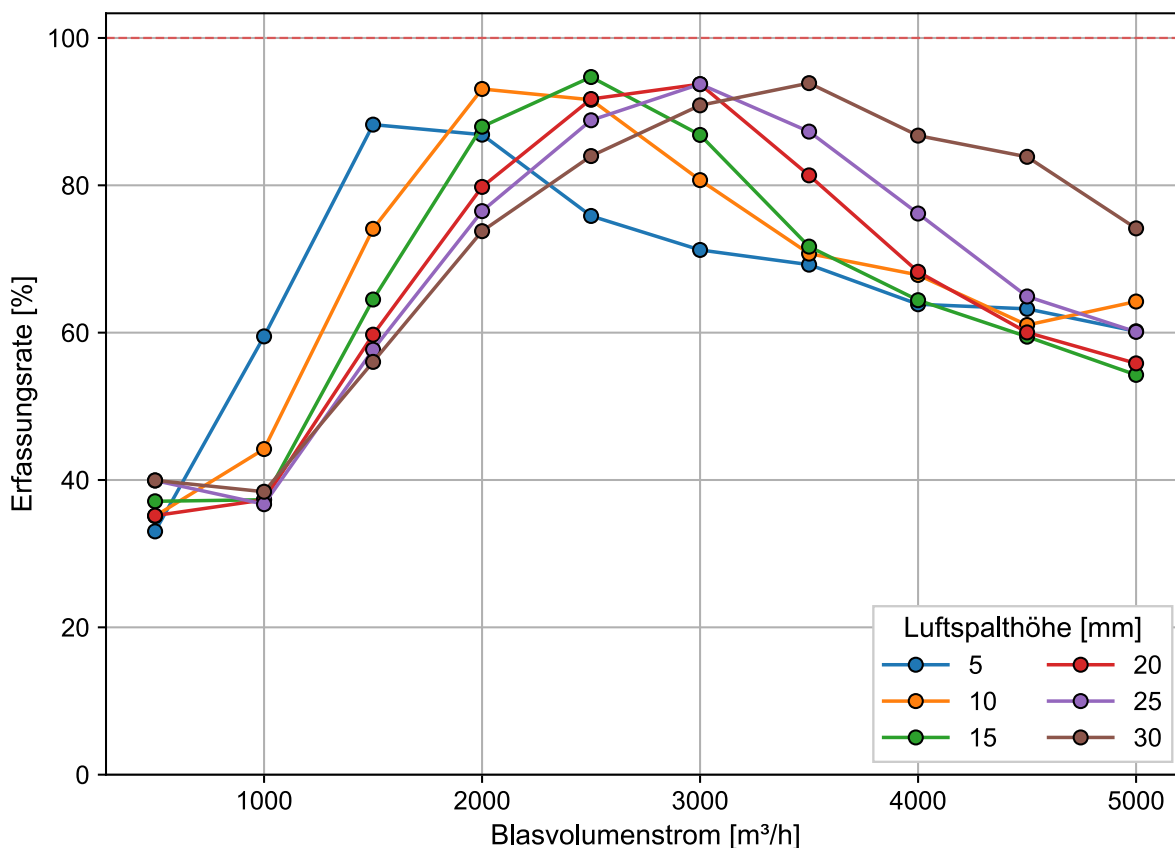


Abbildung 11: Simulationsergebnisse der erfassten Wasserdampfmassenströme für einen Erfassungsvolumenstrom von 14.000 m³/h und eine Wurfweite von 1.970 mm

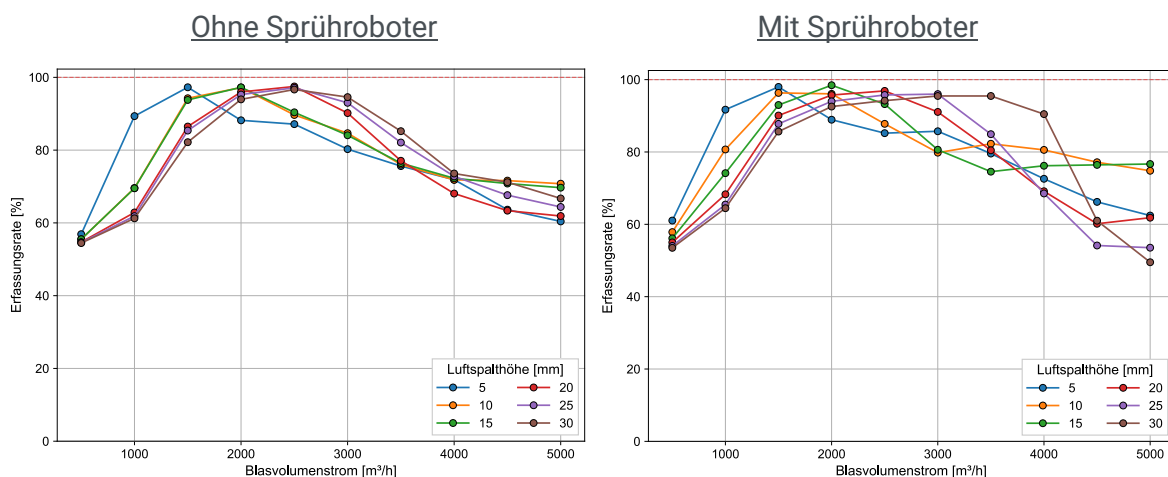


Abbildung 12: Vergleich der Simulationsergebnisse für einen Erfassungsvolumenstrom von 14.000 m³/h und eine Wurfweite von 1.500 mm ohne Sprühroboter (links) und mit Sprühroboter entsprechend Abbildung 10 (rechts)

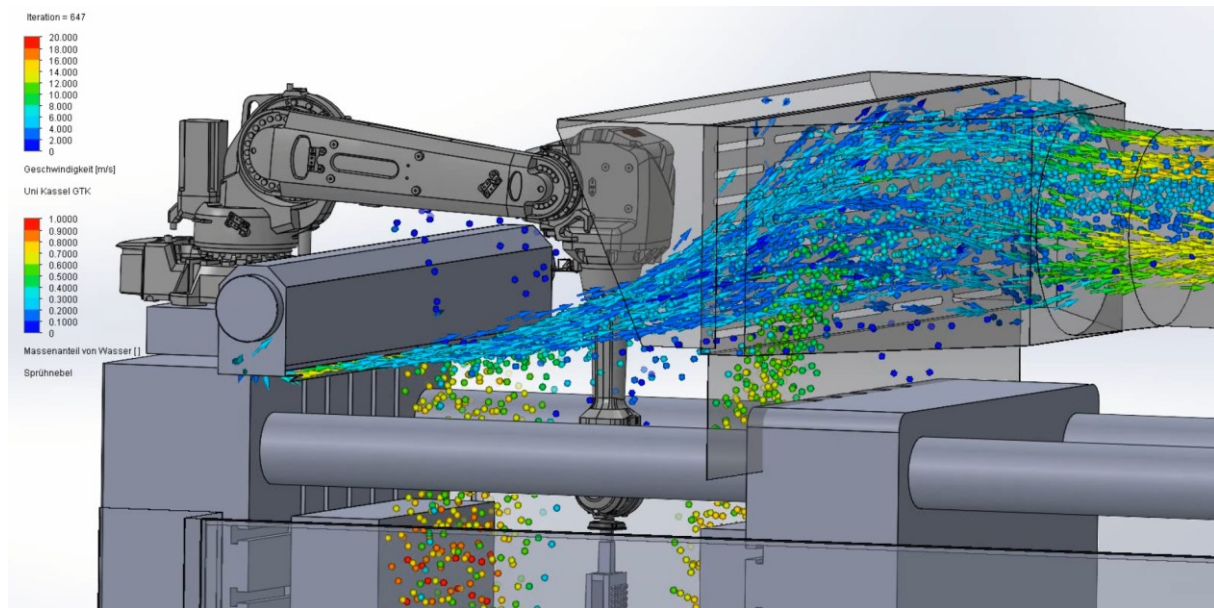


Abbildung 13: Darstellung der Simulationsergebnisse mit kugelförmig dargestelltem Wasserdampf und der pfeilförmig dargestellten, aus der Blaseinheit stammenden Luftströmung

### 5.1.3 Entwicklung eines Messkonzepts und Applikation der Messtechnik in die DGM (AP 3 und AP 10)

Die Luftschleiertechologie soll den Sprühnebel erfassen und abführen. Die Untersuchung der Erfassungsleistung sollte mittels Sensoren stattfinden. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Analyse des von der Luftschleiertechologie erfassten Sprühnebels. Die Untersuchungen wurden sowohl qualitativ als auch quantitativ durchgeführt.

Zur Bewertung der Erfassungsqualität des Prototyps eines Luftschleiersystems wurde ein Messkonzept entwickelt. Zur Messung der Anlagenfunktion wurden die eingesetzte und die von der Anlage erfasste Sprühmenge verglichen. Zur Ermittlung der Sprühmenge kam ein Durchflussmengenmesser des Typs FD-XS20 in Verbindung mit einer FD-XA1 Haupteinheit der Firma Keyence zum Einsatz. Dieser maß den durchflossenen Volumenstrom des Wasser-Trennmittel-Gemischs in der zur Sprüheinheit führenden Trennmittelleitung. Aus dem gemessenen Volumenstrom wurde ein Massenstrom berechnet. Daneben war es nötig, die erfasste Sprühmenge zu ermitteln. Hierzu wurde ein Feuchte- und Temperatursensor im Absaugkanal installiert, sodass er sich im erfassten Luftstrom befand. Als Sensor kam ein HMD65 Feuchte- und Temperatursensor von Vaisala zum Einsatz. Dieser ist für die Messung von Feuchte und Temperatur in durchströmten Rohren konzipiert. Der Sensor besitzt einen 250 mm langen und dünnen Zylinderkörper, an dessen Spitze das Sensorelement sitzt. Durch eine Bohrung im Kanal wurde der Sensor in diesen eingeführt und angeschraubt. Das Sensorelement saß somit mittig in der Luftströmung. Aus dessen Messdaten wurde der Massenstrom des in der Luft gelösten Wasserdampfs berechnet. Dafür wurde zunächst der temperaturabhängige Sättigungsdampfdruck nach

$$p_s = 6,112 \text{ hPa} \cdot \exp\left(\frac{17,62 \cdot \vartheta}{243,12 \text{ °C} + \vartheta}\right)$$

berechnet, [VDI03]. Der in der Luft befindliche Wasserdampf lässt sich als ideales Gas darstellen. Für diesen gilt die thermische Zustandsgleichung.

$$p_W \cdot V = m_W \cdot R_W \cdot T$$

Dabei ist  $p_W$  der Partialdruck des Wasserdampfs. Die relative Luftfeuchtigkeit stellt das Verhältnis von Partialdruck zu Sättigungsdruck dar.

$$\varphi = \frac{p_W}{p_s}$$

Bei einer relativen Feuchte von 1 bzw. 100% ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt und kann kein weiteres Wasser aufnehmen. Der Massenstrom des Wasserdampfs im Absaugkanal ergibt sich aus der zeitlichen Ableitung der thermischen Zustandsgleichung mit relativer Luftfeuchte und dem Sättigungsdruck als

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}(\varphi \cdot p_s)}{R_W \cdot T}$$

mit dem Abluftvolumenstrom des Filters, dem Sättigungsdampfdruck für die gemessene Temperatur, der gemessenen Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit sowie der individuellen Gaskonstante für Wasser. Dieser Massenstrom wurde unter Berücksichtigung der Umgebungfeuchte mit der Sprühmenge verglichen. Zum Vergleich verschiedener Versuchseinstellungen wurde eine Erfassungsrate  $\eta$  eingeführt. Diese stellt das Verhältnis von erfasster Wassermenge, abzüglich der aus der Umgebung erfassten Wasserdampfmenge zur gesprühten Wassermenge dar.

$$\eta = \frac{m_{erfasst} - m_{Umgebung}}{m_{gesprüht}}$$

Der Anteil des aus der Umgebung stammenden Wasserdampfs an der erfassten Gesamtmenge wurde aus dem Minimum des Messdatenverlaufs ermittelt.

Zur Detektion aufsteigender, sichtbarer Aerosole wurden oberhalb der Anlage Laser und Fotowiderstände eingesetzt. Dabei strahlen die Laserstrahlen über die Anlage hinweg jeweils auf einen Fotowiderstand. Aufsteigende Aerosole verringern das Laserlicht, was zu einer messbaren Helligkeitsveränderung auf den Fotowiderständen führt. Leider konnten die Messdaten dieser Laser-Fotowiderstands-Paare aufgrund von Umwelteinflüssen keine verlässlichen Ergebnisse liefern. Alle Messdaten wurden über Messkarten von National Instruments an einen Computer weitergegeben, mit LabVIEW verarbeitet und gespeichert.

Zur visuellen Aufzeichnung und Plausibilitätsprüfung der Versuche wurden Kameras vom Typ U3-3890CP-C-HQ Rev.2.2 von IDS eingesetzt. Diese waren so positioniert, dass sie die aufsteigenden Sprühnebel aufzeichnen konnten.

#### 5.1.4 Konstruktive Ausarbeitung (AP 4 - 7 + 9)

Die gesamte konstruktive Ausarbeitung des Systems erfolgte phasengerecht entsprechend den Schritten Aufgabenklärung, Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung gemäß der VDI-Richtlinie 2221 „Entwicklung technischer Produkte und Systeme“, [VDI01].

Zu Beginn der konstruktiven Arbeiten wurde im Rahmen von AP4 (Analyse Platzbedarf und Konzeption Arbeitssicherheit) eine detaillierte Analyse der örtlichen Gegebenheiten durchgeführt. Hierzu erfolgte ein Vor-Ort-Aufmaß der bestehenden Gießzelle, bei dem insbesondere die Bewegungsräume der eingesetzten Roboter, Wartungs- und Servicebereiche sowie Lagerbereiche für das Magnesium erfasst wurden. Ein besonderer Fokus lag auf arbeitssicherheitsrelevanten Aspekten: Da die vorgesehene Filtereinheit aus Platzgründen auf einem Podest installiert werden sollte und über einen integrierten Reinigungstank verfügt, musste sichergestellt werden, dass im Falle einer Leckage kein Wasser in Bereiche mit gelagertem Magnesium gelangen kann. Ergänzend wurde ein vorhandenes 3D-Modell der Druckgussmaschine übernommen und um die aufgenommenen Maße, Bewegungsräume und Wartungszonen erweitert. Dieses Modell bildete die Grundlage für alle weiteren konstruktiven und simulativen Arbeiten.

In AP5 (Konstruktion des Luftschleiers) erfolgte die konzeptionelle und konstruktive Ausarbeitung des Systems. Das Gesamtsystem wurde zunächst im Rahmen der Konzipierung in die folgenden funktionalen Teilbereiche gegliedert:

- Blaseinheit zur Erzeugung des Luftschleiers
- einer gegenüberliegenden Erfassungshaube zur Aufnahme der mitgerissenen Emissionen
- einer Rohrleitung zur Verbindung der Erfassung mit der Filtereinheit (Absaugkanal)
- sowie einer Elektrofiltereinheit zur Abscheidung der Emissionen und Rückführung der gereinigten Luft in die Umgebung.

Für den Filter wurde ein marktüblicher Elektrofilter der UV-III-Reihe aus dem Portfolio der KMA Umwelttechnik vorgesehen. Für die Blaseinheits- und Erfassungshauben-Komponenten waren hingegen Neuentwicklungen erforderlich. Hierzu wurden verschiedene konzeptionelle Varianten untersucht, darunter unterschiedliche Ausführungen der Erfassungseinheit (z. B. offene Geometrien, Düsen- oder Schlitzkonzepte) sowie verschiedene Blaseinheits-Anordnungen, wie nebeneinander angeordnete Axialventilatoren, Axialventilatoren mit schlitzförmiger Düse oder seitlich angeordnete Radialventilatoren an einem Gebläsegehäuse. Diese Varianten wurden zunächst als vereinfachte Volumenkörper im CAD modelliert und anschließend mithilfe von CFD-Simulationen analysiert, verglichen und bewertet. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurden die vielversprechendsten Konzepte iterativ weiterentwickelt und optimiert, bis ein zufriedenstellender funktionaler Stand erreicht war. Anschließend erfolgte die detaillierte Auskonstruktion der ausgewählten Komponenten.



Abbildung 14: Beispiele untersuchter Varianten der Erfassungshauben (v.l.: Düsenplatte, Wirbelhaube, Schlitze)

Im nächsten Schritt wurden die ausgearbeiteten CAD-Modelle im Rahmen von AP6 (Virtuelle Integration des Prototyps in die Gießzelle GTK) virtuell in das 3D-Modell der Gießzelle integriert. Neben Gebläse und Erfassungshaube wurden auch die Filtereinheit, das Podest sowie die Rohrleitung, die Erfassungshaube und Filter verbindet, vollständig in das Gesamtmodell eingebunden. Bereits in dieser Phase wurden Anschlüsse und Schnittstellen für spätere Messsysteme zur experimentellen Verifizierung des Prototyps berücksichtigt. Aufgrund des Prototyp-Charakters der Konstruktionen wurden zudem möglichst viele Einstellmöglichkeiten an den Komponenten angebracht. Beispielsweise kann die freie Erfassungsfläche der Erfassungshaube variiert werden, oder der Winkel des Gebläses angepasst werden. Um einen einfachen Werkzeugwechsel an der Druckgussmaschine zu ermöglichen, wurde der Schirm der Erfassungshaube mittels Linearführung beweglich ausgeführt. Ursprünglich war auch vorgesehen, das Gebläse beweglich zu gestalten, um es für Werkzeugwechsel auf einer Schiene aus der Gießzelle herausfahren zu können. Aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse wurde dieses Konzept im weiteren Verlauf verworfen und das Gebläse stattdessen fest auf der Spannplatte montiert, was sich für den Prototypenbetrieb als ausreichend erwies.

Die anschließende Ausarbeitungs- und Realisierungsphase (AP7 - Herstellung und Funktionstest des Prototyps) umfasste die vollständige Detaillierung aller Komponenten sowie die Erstellung sämtlicher fertigungsgerechter Unterlagen und aller CE-relevanten Dokumente. Die Bauteile wurden bei KMA gefertigt, montiert und vor dem Versand einem Funktionstest unterzogen, um die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Systems sicherzustellen. Nach Abschluss dieser Arbeiten erfolgte im Rahmen von AP9 die Montage des Prototyps im Technikum des Fachgebiets Gießereitechnik der Universität Kassel sowie dessen Inbetriebnahme, im Zuge derer weitere Parameter eingestellt und feinjustiert wurden. Anschließend war das System bereit für die nachfolgenden Versuche und Untersuchungen zur Erfassungsleistung und Emissionsminderung. In Abbildung 16 ist der montierte Prototyp des Luftschleiersystems dargestellt.



- |   |                          |    |                                     |
|---|--------------------------|----|-------------------------------------|
| 1 | KMA Ultravent III 15000  | 7  | Laser                               |
| 2 | Radialventilator         | 8  | Erfassungseinheit                   |
| 3 | Gießeinheit mit Schnecke | 9  | Absaugkanal                         |
| 4 | Sprühroboter             | 10 | HMD65 Feuchte- und Temperatursensor |
| 5 | Blaseinheit              | 11 | Fotowiderstände                     |
| 6 | Werkzeughälften          |    |                                     |

Abbildung 15: YIZUMI UN 1250MGII Thixomoldingmaschine mit installiertem Prototypen der Luftschleieranlage und Messmitteln

### 5.1.5 Entwicklung Versuchsplan & Beschaffung geeigneter Trennmittel (AP 8)

Auf Basis der Simulationen wurde ein Versuchsplan mit allen möglichen Kombinationen der in Tabelle 5 dargestellten Parameter erstellt. Für die Durchführung der Versuche wurden pro Einzelversuch Messdaten von über zehn Gießzyklen aufgezeichnet. Bei einer Zyklusdauer von etwa einer Minute ergibt sich daraus eine Messdauer von mehr als zehn Minuten pro Versuch.

Tabelle 5: Parameter mit zugehörigen Werten zur Erstellung eines Versuchsplans

Parameter	Wertebereich	Intervall	Stufenanzahl
Ventilatorleistung $P_{Blas}$	1 – 9%	2%	5
Erfassungsvolumenstrom $\dot{V}_{Erf}$	15.000 – 11.000 m <sup>3</sup> /h	2.000 m <sup>3</sup> /h	3
Luftspalthöhe $h_0$	5 – 10 mm	5 mm	2
Luftleitblechwinkel $\alpha$	0 – 10°	5°	3

Es wurden die Parameter variiert, die in den vorher durchgeführten Simulationen als relevant erkannt wurden. Hierzu zählen der Erfassungsvolumenstrom, die Luftspalthöhe am Düsenauslass der Blaseinheit sowie der Anstellwinkel des Luftleitblechs am Düsenauslass. Einen großen Einfluss hat außerdem der Blasvolumenstrom, der über die Ventilatorleistung eingestellt wurde. Die Ventilatoren waren so leistungsstark ausgelegt, dass eine maximale elektrische Leistung von 9 % erreicht werden konnte, bevor der Gegendruck in der Düse zu groß wurde. Je nach Düsenöffnung und Anstellwinkel des Luftleitblechs ergaben sich unterschiedliche Blasvolumenströme. Diese wurden manuell ermittelt und in der nachfolgenden Auswertung berücksichtigt.

Ein Ausschnitt des Versuchsplans ist in Tabelle 6 dargestellt. Der vollständige Versuchsplan ist im Anhang A.1 zu finden. Der Versuchsplan ist so angelegt, dass die Stillstandzeiten, die zur Anpassung der geometrischen Einstellungen der Blaseinheit nötig sind, verringert werden. Sollte eine Anpassung des Leitblechwinkels oder der Luftspalthöhe erforderlich sein, muss der Gießprozess unterbrochen werden. Die Einstellung des Erfassungsvolumenstroms und der Blasleistung kann dagegen im laufenden Betrieb der Druckgießmaschine über die zur Luftschleieranlage gehörende Bedieneinheit durchgeführt werden.

Tabelle 6: Ausschnitt des Versuchsplans

Versuch	$\dot{V}_{Erf}$ [m <sup>3</sup> /h]	$P_{Blas}$ [%]	$\alpha$ [°]	$h_0$ [mm]
...	...	...	...	...
47	15.000	9	0	5
48		7		
49		5		
50		3		
51		1		
52	13.000	9		
53		7		
54		5		
55		3		
56		1		
57	11.000	9		
58		7		
59		5		
60		3		
61		1		
62	15.000	9	5	
63		7	5	
64		5	5	
...	...	...	...	...

Das eingesetzte Sprühmittel bestand aus dem für den Thixomolding-Prozess zugelassenen Trennmittel Isolat 4007 GF-N von TriboChemie und Wasser im Verhältnis 1:30. Da das Trennmittel selbst überwiegend aus Wasser besteht, wird in den Auswertungen der gemessene Volumenstrom des Wasser-Trennmittel-Gemischs mit dem Massenstrom von reinem Wasser verglichen. Dies ist auf den für Wasser bei Raumtemperatur geltenden Zusammenhang

$$1 \text{ l} \approx 1 \text{ kg}$$

zurückzuführen.

### 5.1.6 Parameterstudie in praktischen Gießversuchen (AP 11)

Entsprechend dem Versuchsplan wurden praktische Versuche an der Thixomoldingmaschine Yizumi UN1250Mg II am Fachgebiet für Gießereitechnik der Universität Kassel durchgeführt. Dabei wurden je Parametereinstellung die Sensorwerte von zehn Gießzyklen aufgezeichnet und ausgewertet.

Es sind die zeitlichen Verläufe der Massenströme des Trennmitteldurchflusses und des Wasserdampfanteils in der Erfassungsluft ermittelt worden. Der Verlauf eines Versuchs ist in Abbildung 16 dargestellt. In Rot ist der Trennmitteldurchfluss dargestellt. Dieser zeigt regelmäßige Sprünge zu den Zeitpunkten, zu denen das Werkzeug besprüht wird. In Blau ist der Verlauf des aus Feuchte und Temperatur im Absaugkanal berechneten Wasserdampfmassenstroms dargestellt. Nach einem Sprühvorgang steigt dieser an und fällt nach einiger Zeit wieder ab. Da dieser Massenstrom auch den fortwährend abgesaugten Anteil der Umgebungsluftfeuchtigkeit enthält, wird als konservativer Ansatz ein gleitendes Minimum berechnet. Dieses entspricht dem Minimalwert der blauen Kurve innerhalb eines Gießzyklus. Der aus dem Sprühprozess stammende Wasserdampfmassenstrom entspricht somit der Differenz zwischen blauer und grüner Kurve.

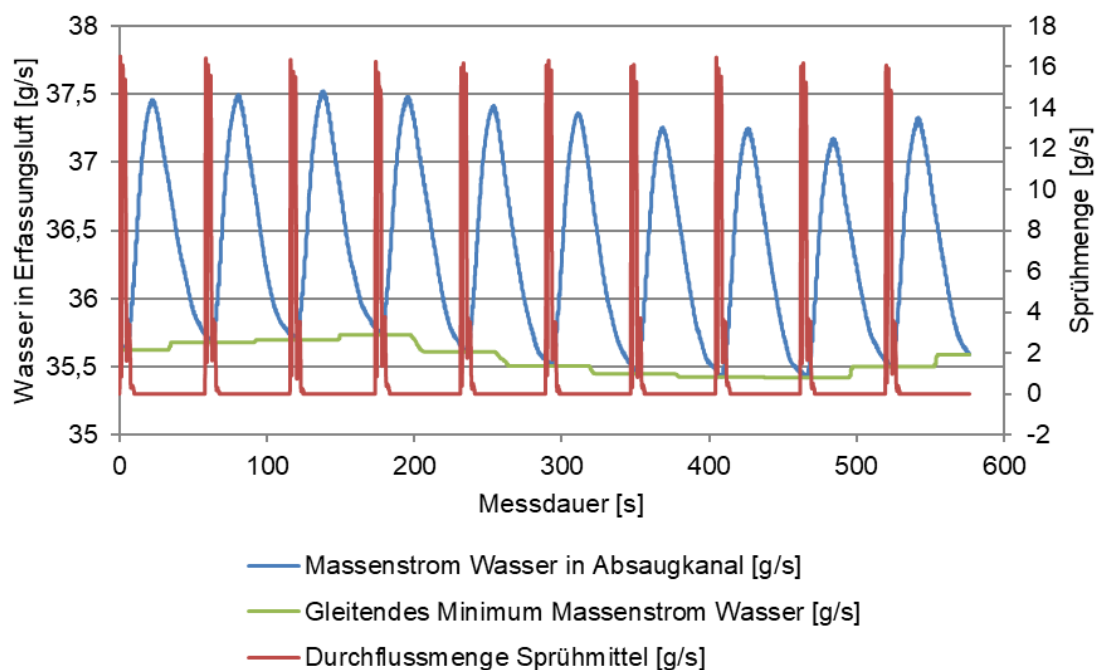


Abbildung 16: Über zehn Gießzyklen aufgezeichnete Massenströme des Trennmittels und des berechneten Wasserdampfmassenstrom im Absaugkanal. Versuchseinstellung: 15.000 m<sup>3</sup>/h Erfassungsvolumenstrom, 3% Blasleistung, 5° Leitblechwinkelanstellung, 5 mm Spalthöhe am Blasdüsenausgang

Daraus abgeleitet ergibt sich für jeden Einzelversuch eine Erfassungsrate, die die Güte der Versuchseinstellung darstellt. Die berechneten Erfassungsraten der durchgeführten Versuche sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Versuche mit einer Luftspalthöhe von 5 mm sind in Tabelle 7, die Versuche mit einer Luftspalthöhe von 10 mm in Tabelle 8 dargestellt. Wie bei den durchgeführten Simulationen zeigt sich auch hier, dass die Erfassungsrate bei höheren Erfassungsvolumenströmen höher ausfällt. Aus diesem Grund wurden die Versuchsreihen mit einem Erfassungsvolumenstrom von 11.000 m<sup>3</sup>/h und einer Luftspalthöhe von 10 mm nicht durchgeführt. Die angegebenen Blasvolumenströme wurden einmalig in der zur Blaseinheit führenden Rohrleitung gemessen. Sie gelten für die aufgeführte Variation der Blasleistungen der Ventilatoren. Aufgrund des veränderten Gegendrucks unterscheiden sich die Blasvolumenströme für unterschiedliche Luftspalthöhen trotz konstanter Blasleistung.

Die höchsten Erfassungsraten wurden bei einem Erfassungsvolumenstrom von 15.000 m<sup>3</sup>/h, einer Luftspalt-Höhe von 10 mm, einem Blasvolumenstrom von 2.160 m<sup>3</sup>/h und einem leicht nach oben angestellten Luftleitblech erzielt. Diese Einstellungsparameter sollten im Betrieb der Luftschleieranlage gewählt werden, um eine bestmögliche Erfassung der auftretenden Emissionen zu erreichen. Ein zu hoher Blasvolumenstrom verschlechtert die Erfassungsrate und sollte vermieden werden. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen der durchgeführten Simulationen.

In Abbildung 17 und Abbildung 18 sind die ermittelten Erfassungsraten noch einmal grafisch dargestellt.

Tabelle 7: Versuchsergebnisse der durchgeführten Versuche mit einer Luftspalthöhe von 5 mm

Erfassungsraten [%]		0° Leitblechwinkel			5° Leitblechwinkel			10° Leitblechwinkel		
Erfassungsvolumenstrom $\dot{V}_{Erf}$ [m <sup>3</sup> /h]		11.000	13.000	15.000	11.000	13.000	15.000	11.000	13.000	15.000
Blasvolumenstrom $\dot{V}_{Blas}$ [m <sup>3</sup> /h]	420	43,42	54,61	64,07	39,63	48,95	63,94	40,77	49,53	59,41
	1.640	64,99	68,15	69,49	66,91	71,22	74,82	67,21	69,99	80,64
	2.800	65,16	65,08	69,25	61,82	68,79	70,95	73,28	72,51	81,10
	4.060	54,44	57,46	58,74	59,15	68,15	73,80	60,00	63,68	65,43
	5.240	38,68	35,58	55,07	59,58	42,98	50,04	31,54	34,31	43,80

Tabelle 8: Versuchsergebnisse der durchgeführten Versuche mit einer Luftspalthöhe von 10 mm

Erfassungsraten [%]		0° Leitblechwinkel		5° Leitblechwinkel		10° Leitblechwinkel	
Erfassungsvolumenstrom $\dot{V}_{Erf}$ [m <sup>3</sup> /h]		13.000	15.000	13.000	15.000	13.000	15.000
Blasvolumenstrom $\dot{V}_{Blas}$ [m <sup>3</sup> /h]	730	58,01	65,69	58,02	75,86	53,75	67,63
	2.160	73,81	78,19	87,33	95,37	83,79	93,04
	3.590	61,10	63,77	75,23	81,07	86,10	91,45
	5.030	51,52	54,62	69,79	76,80	82,74	90,32
	6.880	51,26	57,82	73,99	86,41	69,25	80,12

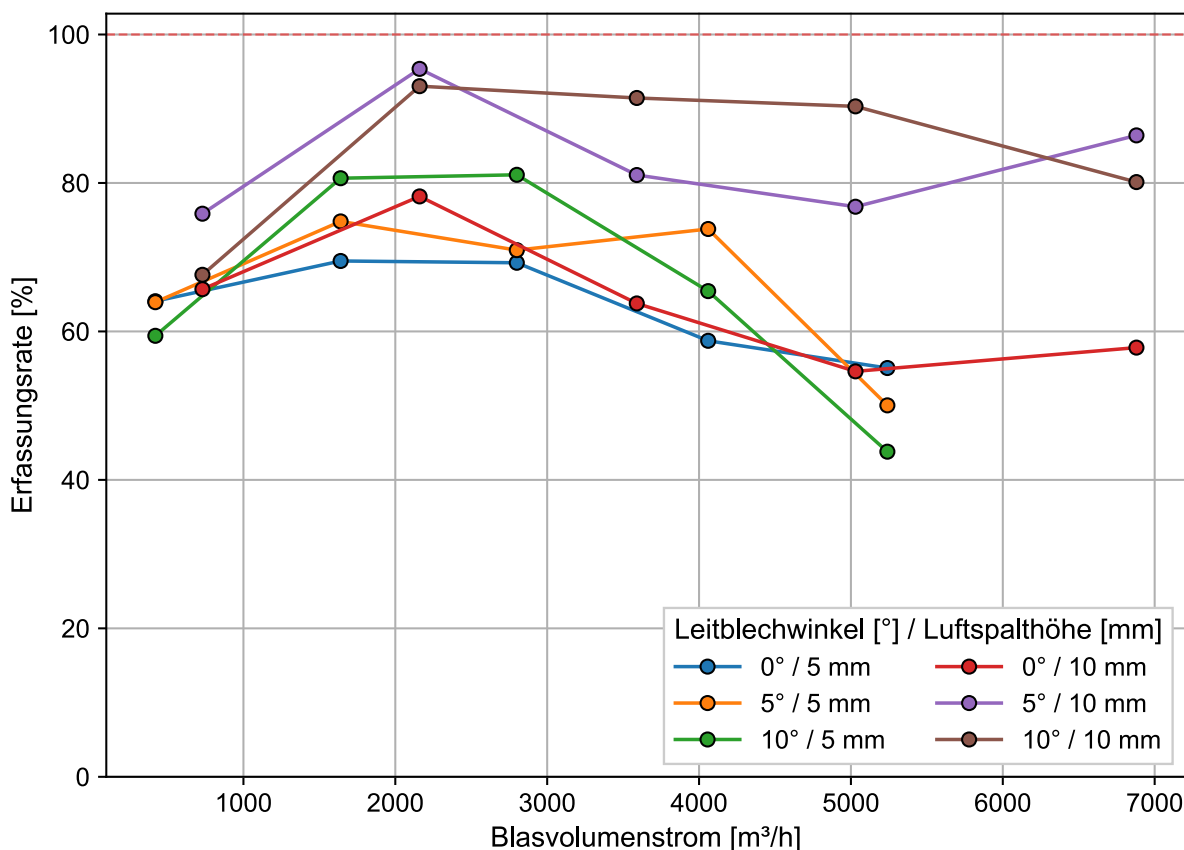


Abbildung 17: Grafische Darstellung der ermittelten Erfassungsraten der praktischen Versuche für einem Erfassungsvolumenstrom von 15.000 m³/h

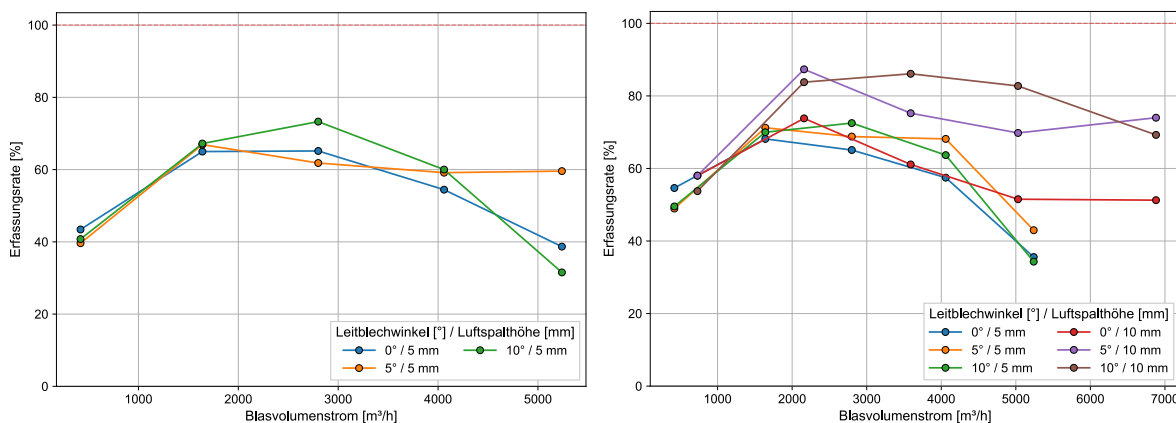


Abbildung 18: Vergleich der Erfassungsraten der praktischen Versuche für Erfassungsvolumenströme von 11.000 m³/h (links) und 13.000 m³/h (rechts)

Wie zuvor in Abschnitt 5.1.3 bereits beschrieben, lieferten die Messdaten der Laser und Fotowiderstände keine verwertbaren Ergebnisse über die Erfassungsqualität bei verschiedenen Blasvolumenströmen.

## 5.1.7 Iterative Validierung (AP 12 - 13)

Zum Vergleich des Simulationsmodells mit den Ergebnissen der realen Versuche wird eine weitere parametrische Studie in SolidWorks FlowSimulation erstellt. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 9 aufgeführt. Bei dieser werden die Simulationsparameter an die realen Versuche angepasst. Die eingestellte Wurfweite von 1680 mm entspricht für die gesamte parametrische Studie, dem an der realen Anlage herrschenden Abstand zwischen Blas- und Erfassungseinheit. Die Blasvolumenströme werden in Abhängigkeit der Luftspalthöhe entsprechend der Messdaten angepasst.

Tabelle 9: Parameter der parametrischen Studie zum Vergleich mit durchgeführten Versuchen

Parameter	Werte	Stufenanzahl
Blasvolumenstrom $\dot{V}_{Blas}$ [m <sup>3</sup> /h] bei $h_0 = 5 \text{ mm}$	420, 1.640, 2.800, 4.060, 5.260	5
Blasvolumenstrom $\dot{V}_{Blas}$ [m <sup>3</sup> /h] bei $h_0 = 10 \text{ mm}$	730, 2.160, 3.590, 5.030, 6.880	5
Erfassungsvolumenstrom $\dot{V}_{Erf}$ [m <sup>3</sup> /h]	15.000	1
Luftspalthöhe $h_0$ [mm]	5 und 10	2
Luftleitblechwinkel $\alpha$ [°]	10	1
Wasserdampf Massenstrom $\dot{m}_D$ [kg/s]	0,016 und 0,5	2

Für den Wasserdampfmassenstrom werden zwei Werte berechnet. Dabei entspricht 0,5 kg/s dem in anderen Simulationen genutzten Massenstrom, während 0,016 kg/s dem gemessenen maximalen Massenstrom während des Sprühprozesses entspricht.

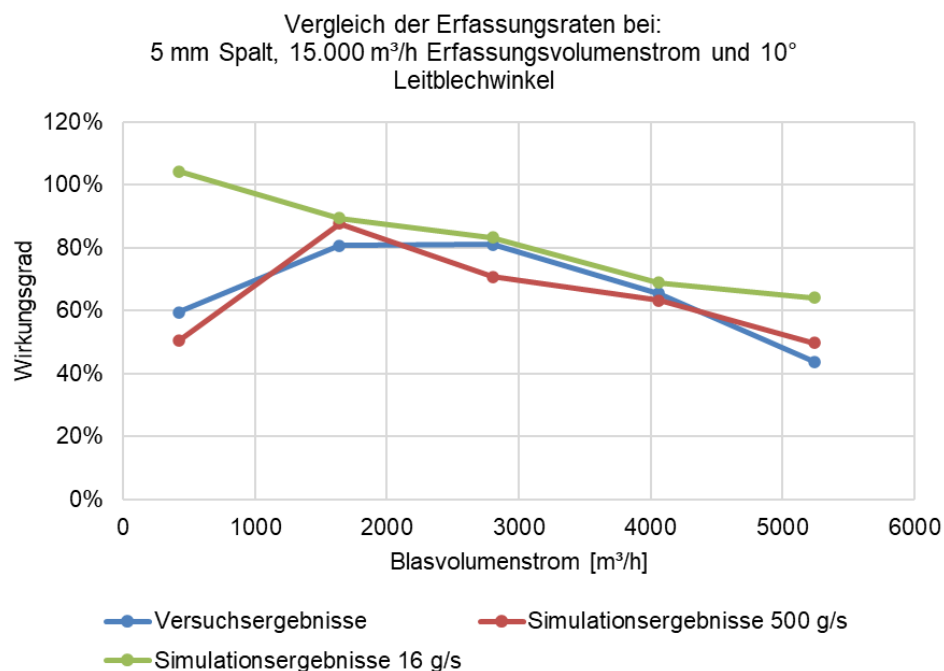


Abbildung 19: Vergleich von Versuchs- mit Simulationsergebnissen bei einer Luftspalthöhe von 5 mm

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Simulationsergebnissen ist in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt. Die Verläufe der Daten sehen besonders beim 5 mm hohen Luftspalt ähnlich aus, beim 10 mm Spalt unterscheiden sich diese Verläufe stärker. Des Weiteren weicht in beiden Simulationsreihen mit dem geringen Wasserdampfmassenstrom von 16 g/s und dem niedrigsten Blasvolumenstrom die Erfassungsrate stark ab und liegt bei unphysikalischen Werten von über 100 %. Der Grund dafür sind vermutlich Rundungsfehler aufgrund der sehr niedrigen Wasserdampfkonzentrationen in der Simulation.

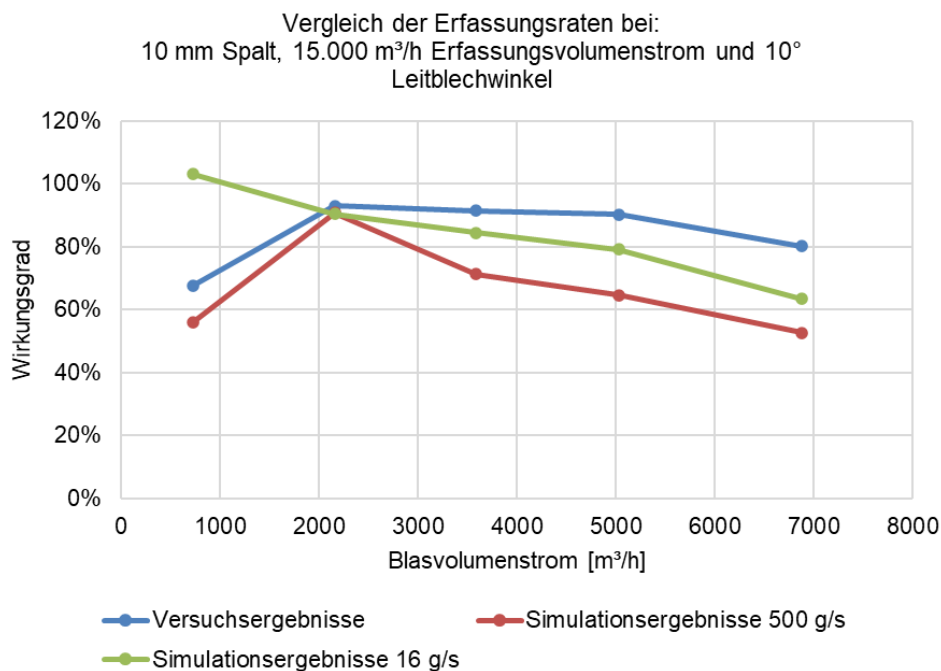


Abbildung 20: Vergleich von Versuchs- mit Simulationsergebnissen bei einer Luftspalthöhe von 10 mm

Zur weiteren Verbesserung der Anlage wurden unterhalb der Erfassungseinheit auf beiden Seiten der Anlage Bleche angebracht, welche verhindern sollen, dass mit Emissionen belastete Luft vom Luftschleier an der Erfassungseinheit vorbeigedrückt wird. Eines dieser Bleche ist in Abbildung 21 dargestellt. Wie in optischen Untersuchungen festgestellt wurde, sorgen die Bleche insbesondere bei höheren Blasvolumina dafür, dass weniger Luft an der Erfassungseinheit vorbeigedrückt wird. Eventuell kann sogar mit geringeren Blas- und Erfassungsvolumenströmen gearbeitet werden, da insgesamt gerichteter erfasst wird. Damit kann angenommen werden, dass sich das Betriebsfenster des Luftschleierprototyps vergrößert.



Abbildung 21: Blech zur Verbesserung der Erfassung

### 5.1.8 Energetische Systembewertung & Beurteilung der Umweltwirkung (AP 14)

#### Energiebedarf und Betriebskostenbewertung

Im Rahmen der Versuchsreihen an der Pilotanlage wurden mittels kontinuierlicher Energiemessungen sowohl die elektrische Leistungsaufnahme der Filteranlage als auch die Leistungsaufnahmen der Zuluftventilatoren des Luftschleiers erfasst. Dabei erfolgt zunächst der Vergleich zur Haubenlösung, da diese in ähnlichen Größenordnungen betrieben werden. Da jedoch die Luftschleierteknologie nicht als direkter Vergleich oder gar als Konkurrenz zur Haubentechnologie gesehen wird, erfolgt anschließend der Vergleich zu Installationen mit zentraler Filteranlage in der Hallenabluft.

Wie bereits im Förderantrag dargestellt, wurde anstelle einer für diese Gießzellengröße üblichen ULTRAVENT-Filteranlage für 10.000 m<sup>3</sup>/h eine Anlage mit einer Auslegung von 15.000 m<sup>3</sup>/h installiert. Die Differenz in der elektrischen Leistungsaufnahme zwischen diesen beiden Anlagengrößen beträgt aufgrund größer dimensionierter Abluftventilatoren und weiterer Einbauten etwa 1 kW.

Während der Versuchsreihen lag die Leistungsaufnahme der Zuluftventilatoren des Luftschleiers in einem Bereich von 0,1 kW bis 5,6 kW. Bei einem mittleren Blasvolumenstrom von ca. 2.000 m<sup>3</sup>/h wurde eine Leistungsaufnahme von rund 0,8 kW gemessen.

In Summe ergibt sich somit gegenüber einer klassischen Haubenlösung eine um etwa 1,8 kW erhöhte elektrische Leistungsaufnahme. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Leistungsaufnahme ventilatorgestützter Systeme kubisch vom geförderten Volumenstrom abhängt. Der tatsächliche Energiebedarf ist daher stark vom jeweiligen Betriebspunkt der Filter- und Luftschleieranlage abhängig. Auf Grundlage veröffentlichter Berechnungen zu Einsparpotenzialen durch Umluft-Lüftungskonzepte in der Gießereipraxis, [KMA22], ist beim Einsatz einer Luftschleieranlage im Vergleich zur klassischen Haubenlösung mit einem zusätzlichen jährlichen Energiebedarf von etwa 9.000 kWh zu rechnen. Daraus ergeben sich Mehrkosten von ca. 1.800 € pro Jahr.

Dies entspricht einer Steigerung der reinen Ventilatorenergiekosten um rund 75 %. Bezogen auf die Gesamtbetriebskosten der Anlage resultiert jedoch lediglich eine Erhöhung um ca. 21 %. Die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen steigen um etwa 13 % gegenüber der Haubenlösung.

Im Vergleich zu einer zentralen Abluftanlage ohne lokale Raucherfassung ergibt sich jedoch weiterhin ein deutlich positiver Effekt: Der Luftschleier ermöglicht eine Reduktion der Betriebskosten um etwa 89 % bei gleichzeitig nahezu 90 % geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der Vergleich zur etablierten Haubenlösung ist somit zwar leicht nachteilig für die Luftschleiertechologie, allerdings zielt diese Entwicklung auf die Schaffung von Möglichkeiten zur Luftreinhaltung und Emissionsminderung in Anwendungsfeldern, in denen für Hauben keine Möglichkeit bestehen.

Im weiteren Verlauf der Produktentwicklung ist vorgesehen, die Leistungsaufnahme der Luftschleiergebläse durch konstruktive Optimierungen weiter zu reduzieren. Ebenso ist durch die Synchronisierung der Luftschleier- und Erfassungseinheit auf den Sprühzyklus (siehe 37) bereits eine Energieeinsparung von ca. 40% möglich.

#### Materialeinsatz und Herstellungsbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen

Für die Realisierung der Installation an der DGM der Universität Kassel wurden folgende Materialmengen eingesetzt:

Luftschleierlösung:

1.994 kg Edelstahl

152 kg Aluminium

1.312 kg Schwarzstahl (davon 564 kg Rohrleitung aufgrund der gewählten Filterposition)

Gesamtmasse: 3.458 kg

Vergleichslösung (Standardlayout mit Haube):

1.663 kg Edelstahl

101 kg Aluminium

3.015 kg Schwarzstahl

Gesamtmasse: 4.779 kg

Unter Annahme typischer Emissionsfaktoren für die Herstellung (Edelstahl: 6 kg CO<sub>2</sub>/kg; Schwarzstahl: 2 kg CO<sub>2</sub>/kg, vgl. Branchenangaben u. a. Edelstahl Aktuell, Aluminium: 11 kg CO<sub>2</sub>/kg) ergeben sich folgende herstellungsbedingte CO<sub>2</sub>-Äquivalente:

Produkt	Gesamtgewicht	CO <sub>2</sub> Herstellung
Luftschleier	3.458 kg	~16,3 t CO <sub>2</sub> e
Erfassungshaube	4.779 kg	~17,1 t CO <sub>2</sub> e

Damit liegt die herstellungsbedingte CO<sub>2</sub>-Belastung des Luftschleiers trotz höheren Edelstahlanteils unter der der etablierten Haubenlösungen, was primär auf die deutlich geringere Gesamtmasse zurückzuführen ist. Diese Mengenangaben beziehen sich rein auf den an der Uni Kassel errichteten Prototypen. Bei größeren Druckgussmaschinen sind die Haubengrößen noch weit dominierender und somit ist im fast schon dem Stand der Technik entsprechenden Mega-/Gigacasting mit einer wesentlich deutlicheren Reduzierung der herstellungsbedingten CO<sub>2</sub>-Belastung durch die Luftschleiertechologie zu rechnen.

Zu berücksichtigen ist, dass rund 7 % der herstellungsbedingten Emissionen des Luftschleiers auf die Rohrleitung entfallen. Diese ist im Fall der Installation in Kassel aufgrund der räumlichen Gegebenheiten außergewöhnlich lang ausgeführt. In industriellen Anwendungen würde die Filteranlage üblicherweise direkt oberhalb der DGM positioniert, wodurch Rohrleitungsmaterial eingespart und die CO<sub>2</sub>-Bilanz weiter verbessert würde.

Erste Hochrechnungen auf Basis des Material- und Geräteeinsatzes für die Luftschleiertechologie haben ergeben, dass mit zunehmender Anlagengröße das Investitionsvolumen gegenüber der Erfassungshaube deutlich abnimmt. Somit ist die Luftschleiertechologie besonders für große DGM nicht nur in Bezug auf den Platzbedarf, sondern auch aus Investitionssicht interessant.

### 5.1.9 Übertragung der Erkenntnisse auf andere Anwendungsszenarien, insb. Großanlagen (AP 16)

Zur Abschätzung der zu erwartenden Erfassungsraten bei größeren Anlagen wird eine weitere parametrische Studie in SolidWorks FlowSimulation durchgeführt. Bei dieser wird nur die Anlagengröße skaliert. Die Werte der Volumenströme bleiben zu den vorherigen Simulationen identisch. In Abbildung 22 sind die Ergebnisse dargestellt. Während für eine um 20% vergrößerte Anlage die Erfassungsraten sich nur geringfügig von der originalen Anlagengröße unterscheiden, sind die Unterschiede beim um 40% vergrößerten Modell deutlich größer. Bei diesem liegt die maximale Erfassungsrate bei 75% und wird erst bei einem höheren Blasvolumenstrom erreicht.

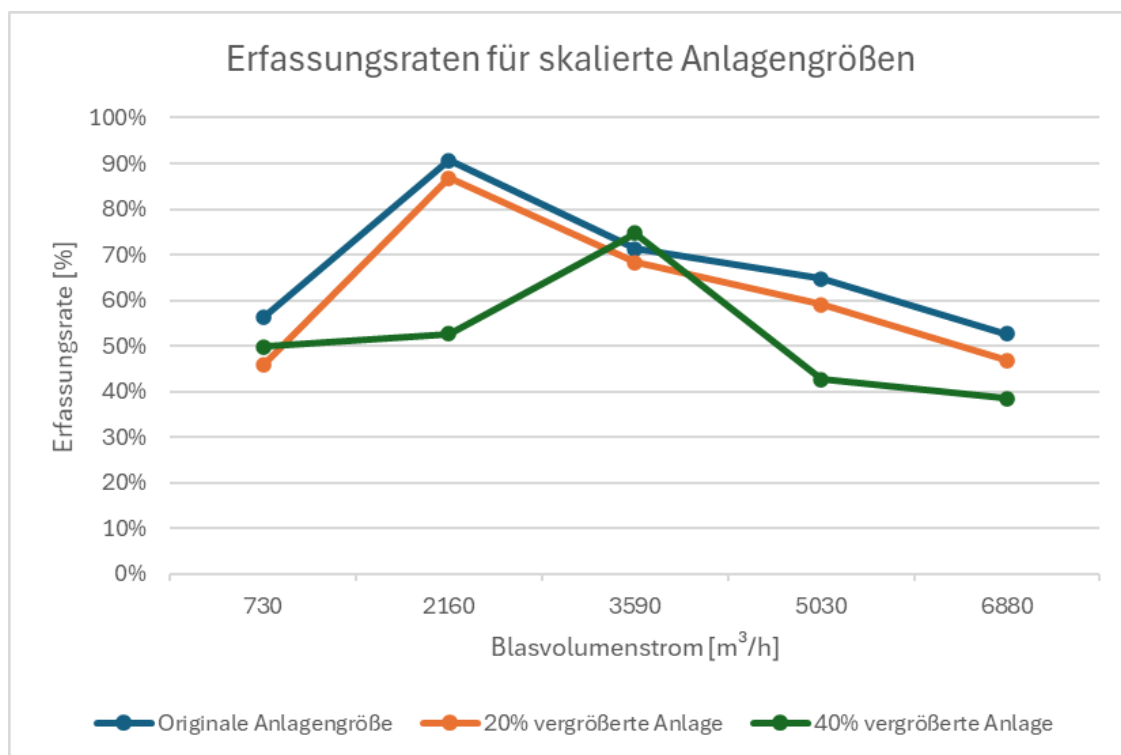


Abbildung 22: Simulationsergebnisse für vergrößerte Anlagengrößen bei gleichbleibendem Erfassungsvolumenstrom von 15.000 m<sup>3</sup>/h, 10 mm Luftspalthöhe und einen Wasserdampfmassenstrom von 0,5 kg/s

Mit zunehmender Anlagengröße wird eine weiter sinkende Erfassungsrate erwartet. Um diesen Rückgang auszugleichen, sind höhere Blas- und insbesondere höhere Erfassungsvolumenströme sowie ein größerer Luftspalt erforderlich, was eine Anpassung der Blaseinheit an größere Anlagen notwendig macht. Aufgrund der Abweichungen zwischen Simulation und praktischen Versuchen kann eine ausreichende Auslegung für größere Anlagen nicht allein auf Basis der Simulation erfolgen. Für eine qualitative Auslegung sind weitere Versuche an einer größeren Anlage erforderlich, die in einem Folgeprojekt durchgeführt werden können.

## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

Mit dem Projekt sollten die erforderlichen methodischen und technischen Grundlagen geschaffen werden, um Luftschleieranlagen systematisch und wirksam für die Erfassung von Emissionen an Druckgießanlagen von weniger als 400 t bis hin zu mehr als 5.000 t Schließkraft anwendbar zu machen. Anhand folgender drei Teilaufgaben zum Erreichen der Zielsetzung sollen die Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung diskutiert werden.

### 5.2.1 Entwicklung eines zuverlässigen Auslegungs- und Simulationsmodells für die wirksame und bedarfsgerechte Gestaltung eines Raucherfassungssystems mit Luftschleier für DGM unterschiedlicher Größen

Die praktischen Versuche zeigten eine hohe Übereinstimmung mit dem aufgebauten Simulationsmodell für die idealen Betriebszustände mit optimalen Blasvolumenströmen. Die Simulationen leisteten einen wichtigen Beitrag zur Auslegung der Luftschleieranlage. Aufgrund einiger Modellannahmen lassen sich die Simulationsergebnisse allerdings nicht exakt auf die Realität übertragen. So zeigte die Simulation beispielsweise für den im realen Sprühprozess herrschenden Massenstrom des Wasser-Trennmittel-Gemischs eine unrealistisch hohe Erfassungsrate. Dies liegt unter anderem an folgenden Modellannahmen: Es wird ausschließlich gasförmiger Wasserdampf betrachtet, ohne dass Aerosole berücksichtigt werden. Phasenübergänge des auf die heiße Werkzeugoberfläche auftreffenden Wasser-Trennmittel-Gemischs, die Druckluft des Sprühprozesses sowie komplexe Vorgänge im Sprühprozess können nicht abgebildet werden. Zudem ist das Modell nicht zeitabhängig. Das Modell erlaubt keine qualitativen Aussagen über die Einflüsse der genauen Trennmittelmenge, der Zykluszeit oder der Formtemperatur. Es stellt vielmehr eine Orientierungshilfe für die Auslegung weiterer Luftschleieranlagen dar. Insbesondere bei größeren Anlagen sollte mit höheren Volumenströmen kalkuliert werden. Zur weiteren Validierung sollten vergleichbare Versuche an einer großen Maschine durchgeführt werden, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Simulationsmodellen zu identifizieren und die Modelle zu verbessern.

In den praktischen Versuchen konnte die angestrebte Erfassungsrate von 95 % erreicht werden. Die Messtechnik zur Ermittlung der Erfassungsrate lässt sich in zukünftige Konzepte von Luftschleieranlagen und deren Regelung integrieren.

### 5.2.2 Entwicklung einer technischen Umsetzung, die eine Ausstattung von DGM mit einem Raucherfassungssystem mit Luftschleier gemäß dem Auslegungsmodell in möglichst wirtschaftlicher Weise ermöglicht

Ziel der Entwicklungsarbeiten war die Realisierung eines technisch wirksamen und zugleich wirtschaftlich rentablen Luftschleiersystems zur Emissionserfassung an bestehenden Druckgussmaschinen (DGM). Grundlage bildete das zuvor erarbeitete Auslegungsmodell. Die Konstruktion wurde modular in vier Hauptkomponenten gegliedert (Siehe Abschnitt 5.1.4), wodurch sowohl die Anpassung an unterschiedliche Maschinengrößen als auch eine wirtschaftliche Übertragbarkeit auf weitere Anwendungen ermöglicht wird. Auch eine einfache Nachrüstung an bestehenden Maschinen ist dadurch gegeben.

Im Gegensatz zu konventionellen Haubenlösungen basiert das entwickelte System auf einem gerichteten Luftschleierprinzip und kommt ohne großvolumige Einhausungen aus. Dadurch werden Materialeinsatz, Montageaufwand und Eingriffe in bestehende Produktionslayouts reduziert (siehe Abschnitt 5.1.8).

Zur Sicherstellung einer wirtschaftlichen Betriebsweise wurden verstellbare Komponenten vorgesehen, die eine Anpassung an unterschiedliche Prozessbedingungen ohne konstruktive Änderungen erlauben. Bereits in der virtuellen Integrationsphase des Prototyps wurden Messvorrichtungen zur Bestimmung des Erfassungsgrades berücksichtigt, sodass im industriellen Einsatz eine volumenstromoptimierte und energieeffiziente Betriebsweise bei ausreichender Erfassungsleistung gewährleistet werden kann.

Insgesamt stellt das entwickelte Luftschleiersystem eine konstruktiv schlanke und integrationsfähige Lösung dar, die eine wirtschaftlich vertretbare Nachrüstung bestehender Druckgussmaschinen ermöglicht und auch bei Neu-Installationen (von DGMs) erhebliche, potenzielle Vorteile in Bezug auf Investitionskosten gegenüber der Haubenlösung besitzt.

### 5.2.3 Konzept zur Steuerung und Regelung des Raucherfassungssystems im Zusammenspiel mit der Druckgießanlage sowie einem nachfolgenden Abluftfilter, um Wirksamkeit und Ressourceneffizienz bestmöglich aufeinander abstimmen zu können

Gängige Praxis bei der Auslegung und Programmierung von Haubenlösungen sind energiesparende Maßnahmen wie zum Beispiel die Möglichkeit zur Synchronisierung von Sprühzyklus und Absaugung der Haube. Aufgrund des niedrigen Energieverbrauchs von Elektrofiltern ist die zur Förderung der Abluft benötigte Energie ein wesentlicher Bestandteil der Betriebskosten. Durch die Synchronisierung von Abluftventilator zu Sprühvorgang kann dieser Anteil um bis zu 40% reduziert werden.

Das Luftschleierkonzept soll weiterhin diese Möglichkeit bieten. Dies hat Einfluss auf die Auswahl von Ventilatoren, den Einbau von Messmitteln und die Möglichkeit zur Verschaltung der Programme von DGM und Luftschleier und Filter. Alle Anlagenteile wurden entsprechend ausgewählt und die Schnittstelle der Steuerung erlaubt somit weiterhin die Synchronisierung der Absaugung auf den Sprühzyklus.

### 5.3 Publikationen

Die Projektpartner hatten bereits die Gelegenheit, dass die Arbeit am Projekt sowie die derzeitigen Erkenntnisse an Gießereien und Druckgießmaschinenhersteller auf internationalen Fachmessen vorzustellen und zu diskutieren, insbesondere

- NADCA Die Casting Congress & Exposition, 30.09.-02.10.2024
- EUROGUSS Mexiko, 15.-17.10.2025
- EUROGUSS Nürnberg, 13.-15.01.2026.

Weitere Messeauftritte sind geplant. Darüber hinaus gab und gibt es vertiefende Vorstellungen und Gespräche mit ausgewählten internationalen Gießereien und Druckgießmaschinenherstellern.

Die Projektpartner streben Publikationen in Fachmedien wie der GIESSEREI sowie wissenschaftliche Ausarbeitungen als Reviewed Paper an.

## 6 Fazit

Im Projektverlauf wurden methodische und technische Grundlagen für Luftschleiersysteme zur lokalen Raucherfassung an Druckgießmaschinen erarbeitet. Zentraler Projektinhalt ist die Entwicklung einer CFD-basierten Simulations- und Auslegungsmethodik sowie deren Abgleich mit praktischen Versuchen an einer Thixomoldingmaschine (Yizumi UN1250MgII). In den Simulationen wurden insbesondere Erfassungsvolumenstrom und Luftspalthöhe als dominante Einflussgrößen auf die Erfassungsrate identifiziert; diese Tendenzen bestätigten sich in den praktischen Versuchen. Der installierte Prototyp erreichte unter geeigneten Parametern Erfassungsraten von über 95 % (u. a. bei 15.000 m<sup>3</sup>/h Erfassungsvolumenstrom, 10 mm Luftspalthöhe und leicht nach oben angestelltem Luftleitblech an der Blaseinheit) und erfüllte damit die qualitative Zielvorgabe, die aus Erfahrungen mit Erfassungshauben resultiert.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse Grenzen der aktuellen Übertragbarkeit: Das Simulationsmodell bildet ausschließlich gasförmigen Wasserdampf ab, berücksichtigt keine Aerosole und keine Phasenübergänge des Wasser-Trennmittel-Gemischs, ist nicht zeitabhängig und kann damit wesentliche Aspekte des Sprühprozesses (z. B. Druckluftanteile, zyklische Vorgänge) nur eingeschränkt repräsentieren. Dies spiegelt sich u. a. in unphysikalischen Simulationsergebnissen (>100 % Erfassungsrate) bei sehr niedrigen Wasserdampfkonzentrationen wider, die als Rundungseffekte interpretiert werden. Zudem weisen Skalierungssimulationen für größere Anlagen bei unveränderten Volumenströmen einen deutlichen Rückgang der maximalen Erfassungsrate auf (bei 40 % Vergrößerung bis ca. 75 %), sodass eine ausreichende Auslegung für Großanlagen nicht allein auf Basis des entwickelten Simulationsmodells als gesichert gelten kann.

Energetisch wurde gegenüber einer klassischen Haubenlösung eine um etwa 1,8 kW erhöhte elektrische Leistungsaufnahme ausgewiesen; als zusätzlicher jährlicher Energiebedarf werden etwa 9.000 kWh genannt. Dem steht einer zentralen Abluftanlage ohne lokale Raucherfassung ein deutlich positiver Effekt gegenüber: Die Betriebskostenreduktion beläuft sich auf etwa 89 % bei gleichzeitig nahezu 90 % geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen. Herstellersseitig liegt die CO<sub>2</sub>-Belastung des realisierten Luftschleier-Prototyps aufgrund der geringeren Gesamtmasse trotz höheren Edelstahlanteils unter der einer Vergleichslösung mit Haube. Dieser Unterschied wird sich bei größeren Anlagen noch deutlicher zu Gunsten der Luftschleiertechnologie ausprägen.

### Feststellungen zu künftig nötigen Arbeiten

- Analyse an einer Giga-Casting-Anlage als nächste Skalierungsstufe: Es soll ein Folgeprojekt durchgeführt werden, in dem eine Luftschleieranlage an einer Großguss-Anlage systematisch untersucht wird. Ziel ist, zusätzlich zum bereits untersuchten Prototypen eine weitere belastbare Referenz für sehr große Maschinen zu gewinnen, damit zwischen unterschiedlichen Maschinengrößen eine nachvollziehbare Übertragung bzw. Interpolation der Auslegungsparameter möglich wird.
- Validierung und Auslegung für Großanlagen durch reale Versuche: Da bei skalierten Geometrie sinkende Erfassungsraten erwartet werden und zugleich Abweichungen zwischen Simulation und Praxis bestehen, sind Versuche an einer größeren Anlage erforderlich, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu identifizieren und das Modell zu verbessern.

- Weiterentwicklung von Simulationsmodell und Messmethodik im Rahmen der im Bericht benannten Grenzen: Aus den dokumentierten Modellannahmen (nur Wasserdampf, keine Zeitabhängigkeit, keine Aerosole/Phasenübergänge) sowie den nicht verwertbaren Ergebnissen der Laser-/Fotowiderstands-Messung ergibt sich die Notwendigkeit, die methodischen Grundlagen für eine robustere Bewertung der Erfassung (insbesondere sichtbar/aerosolartig) weiter zu stärken.
- Weitere Reduktion der Betriebskosten: Diese können beispielsweise durch Strömungsoptimierungen von Erfassungseinheit und Blaseinheit optimiert werden. Zudem besteht die Möglichkeit durch geschickte Anordnung der Komponenten die aufgenommene Ventilatorleistung zu reduzieren.

Insgesamt zeigt sich, dass der Einsatz einer Luftschleiertechologie eine gute Möglichkeit der Erfassung von Emissionen im Druckgießprozess bietet. Insbesondere für Gießereien, in denen der Einsatz einer Haubenlösung betriebsbedingt nicht möglich ist, bietet die Luftschleiertechologie eine gute Alternative.

## 7 Literaturverzeichnis

- [Chi22] CHIA-HSIANG, L., YI-CHUN, C.: Adverse pulmonary impacts of environmental concentrations of oil mist particulate matter in normal human bronchial epithelial cell. Science of The Total Environment, Volume 809, 2022.
- [DGU20] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV): DGUV Regel 109-608 - Branche Gießereien, 2020.
- [Fra19] FRANKE, S.(Herausgeber): Lexikon-Gießerei, Schiele & Schön, 20. Auflage, 2019.
- [Jav12] JAVADIAM NAMIN, P.: Kostenersparnis durch energieeffiziente Abluftfiltersysteme, Giesserei, 11, S.76–78, 2012.
- [VDI01] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI-Richtlinie 2221, 2019.
- [VDI02] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI Richtlinie 2262 Blatt 4, 2006.
- [VDI03] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI Richtlinie 3514 Blatt 1, 2016.
- [Sam92] SAMUEL, A.M., SAMUEL, F.H.: Various aspects involved in the production of low-hydrogen aluminium castings, Journal of Material Science, 27, Seiten 6533–6563, 1992.
- [Sie17] SIEBERTZ, K., VAN BEBBER, D.: Statistische Versuchsplanung : Design of Experiments (DoE), Springer Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2017.
- [KMA22] GIESSEREI-PRAXIS 3–4/2022, S. 4.

## 8 Anhang

### A.1 Versuchsplan und ermittelte Ergebnisse

	$\dot{V}_{Erf}$ [m <sup>3</sup> /h]	$P_{Blas}$ [%]	$\alpha$ [°]	$h_0$ [mm]	Wirkungs- grad $\eta$
1	15000	9	0	10	57,82%
2	15000	7	0	10	54,62%
3	15000	5	0	10	63,77%
4	15000	3	0	10	78,19%
5	15000	1	0	10	65,69%
6	13000	9	0	10	51,26%
7	13000	7	0	10	51,52%
8	13000	5	0	10	61,10%
9	13000	3	0	10	73,81%
10	13000	1	0	10	58,01%
11	11000	9	0	10	-
12	11000	7	0	10	-
13	11000	5	0	10	-
14	11000	3	0	10	-
15	11000	1	0	10	-
16	15000	9	5	10	86,41%
17	15000	7	5	10	76,80%
18	15000	5	5	10	81,07%
19	15000	3	5	10	95,37%
20	15000	1	5	10	75,86%
21	13000	9	5	10	73,99%
22	13000	7	5	10	69,79%
23	13000	5	5	10	75,23%
24	13000	3	5	10	87,33%
25	13000	1	5	10	58,02%
26	11000	9	5	10	-
27	11000	7	5	10	-
28	11000	5	5	10	-
29	11000	3	5	10	-
30	11000	1	5	10	-
31	15000	9	10	10	80,12%
32	15000	7	10	10	90,32%
33	15000	5	10	10	91,45%
34	15000	3	10	10	93,04%
35	15000	1	10	10	67,63%
36	13000	9	10	10	69,25%
37	13000	7	10	10	82,74%
38	13000	5	10	10	86,10%
39	13000	3	10	10	83,79%

	$\dot{V}_{Erf}$ [m <sup>3</sup> /h]	$P_{Blas}$ [%]	$\alpha$ [°]	$h_0$ [mm]	Wirkungs- grad $\eta$
40	13000	1	10	10	53,75%
41	11000	9	10	10	-
42	11000	7	10	10	-
43	11000	5	10	10	-
44	11000	3	10	10	-
45	11000	1	10	10	-
46	15000	9	0	5	Siehe V47
47	15000	9	0	5	67,61%
48	15000	7	0	5	58,74%
49	15000	5	0	5	69,25%
50	15000	3	0	5	69,49%
51	15000	1	0	5	64,07%
52	13000	9	0	5	35,58%
53	13000	7	0	5	57,46%
54	13000	5	0	5	65,08%
55	13000	3	0	5	68,15%
56	13000	1	0	5	54,61%
57	11000	9	0	5	50,46%
58	11000	7	0	5	54,44%
59	11000	5	0	5	61,06%
60	11000	3	0	5	64,99%
61	11000	1	0	5	43,42%
62	15000	9	5	5	87,90%
63	15000	7	5	5	73,80%
64	15000	5	5	5	Siehe V99
65	15000	3	5	5	74,82%
66	15000	1	5	5	63,94%
67	13000	9	5	5	76,74%
68	13000	7	5	5	68,15%
69	13000	5	5	5	68,79%
70	13000	3	5	5	71,22%
71	13000	1	5	5	48,95%
72	11000	9	5	5	59,58%
73	11000	7	5	5	59,15%
74	11000	5	5	5	61,82%
75	11000	3	5	5	66,91%
76	11000	1	5	5	39,63%
77	15000	9	10	5	42,57%
78	15000	7	10	5	65,43%

	$\dot{V}_{Erf}$ [m <sup>3</sup> /h]	$P_{Blas}$ [%]	$\alpha$ [°]	$h_0$ [mm]	Wirkungs- grad $\eta$
79	15000	5	10	5	81,10%
80	15000	3	10	5	80,64%
81	15000	1	10	5	64,64%
82	13000	9	10	5	41,30%
83	13000	7	10	5	63,68%
84	13000	5	10	5	75,46%
85	13000	3	10	5	76,52%
86	13000	1	10	5	49,53%
87	11000	9	10	5	35,78%
88	11000	7	10	5	60,00%
89	11000	5	10	5	73,28%
90	11000	3	10	5	67,21%
91	11000	1	10	5	40,77%
92	11000	9	10	5	31,54%
93	13000	9	10	5	34,31%
94	13000	5	10	5	72,51%
95	13000	3	10	5	69,99%
96	15000	9	10	5	43,80%
97	15000	1	10	5	59,41%
98	15000	9	5	5	50,04%
99	15000	5	5	5	70,95%
100	13000	9	5	5	42,98%
101	15000	9	0	5	55,07%
102	11000	9	0	5	38,68%
103	11000	5	0	5	65,16%
104	15000	9	5	10	84,03%
105	15000	2	5	10	63,90%
106	15000	4	5	10	81,49%
107	15000	6	5	10	82,20%
108	15000	8	5	10	86,10%

	$\dot{V}_{Erf}$ [m <sup>3</sup> /h]	$P_{Blas}$ [%]	$\alpha$ [°]	$h_0$ [mm]	Wirkungs- grad $\eta$
201	15000	9	0	10	44,11%
202	15000	7	0	10	45,42%
203	15000	5	0	10	63,66%
204	15000	3	0	10	76,29%
205	15000	1	0	10	75,31%
206	15000	9	5	10	50,01%
207	15000	7	5	10	56,93%
208	15000	5	5	10	67,51%
209	15000	3	5	10	76,77%
210	15000	1	5	10	75,26%
211	15000	9	10	10	50,73%
212	15000	7	10	10	60,49%
213	15000	5	10	10	69,87%
214	15000	3	10	10	76,70%
215	15000	1	10	10	72,36%
216	15000	9	10	10	51,42%
217	15000	8	10	10	56,16%
218	15000	7	10	10	61,17%
219	15000	6	10	10	65,27%
220	15000	5	10	10	70,71%
221	15000	4	10	10	77,87%
222	15000	3	10	10	80,70%
223	15000	2	10	10	78,83%
224	15000	1	10	10	75,81%
225	15000	0	10	10	72,91%