

# Modellierung des Spritzfächers einer Pflanzenschutzdüse mit der Diskrete-Elemente-Methode

Lukas Poppa, Kerstin Palm, Florian Schramm, Ludger Frerichs, Magnus Tomforde, Christoph Kämpfer, Jens Karl Wegener

Die Prüfverfahren von Applikationstechnik für Pflanzenschutzmittel sind aufgrund der meist erforderlichen Praxisversuche sehr aufwendig. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Simulationsmethoden wünschenswert. Ein Gesamtmodell zur Abbildung einer Pflanzenschutzdüse und des zugehörigen Spritzfächers konnte bisher nicht entwickelt werden. Jedoch existieren für einzelne Teilprozesse zur Simulation der Abdrift in der CFD (Computational Fluid Dynamics) bereits Modelle, die aber oft nicht vollständig validiert sind. Für ein Gesamtmodell eignet sich die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) u. a. aufgrund der Analogie zwischen Tropfen und den simulierten Partikeln sowie der einfachen Kontakterkennung bei der Benetzung. Die Abbildung des Sprühkegels mit der DEM stellt die erste Herausforderung dar, ein Ansatz hierfür wird im vorliegenden Beitrag vorgestellt. Auf Messdaten basierend wird in der Simulation ein Tropfenspektrum 100 mm unterhalb der Düse erzeugt und zur Validierung das Spektrum sowie die Querverteilung 500 mm unterhalb der Düse gemessen. Das Tropfenspektrum zeigt eine hohe Übereinstimmung, während bei der Querverteilung leichte Abweichungen zur Messung vorliegen.

## Schlüsselwörter

Diskrete-Elemente-Methode, DEM, Pflanzenschutz, Tropfenspektrum, Düse, Simulation

Die Prüfung von Pflanzenschutzgeräten, z. B. in Fragen zum Abdriftverhalten oder zur Benetzung des Pflanzenbestandes während der Applikation, erfolgt aktuell in der Regel durch sehr zeit- und personalaufwendige Praxisversuche. Aufgrund des starken Einflusses meteorologischer Parameter auf den Prozess der Applikation weisen diese Versuche nur eine bedingte Reproduzierbarkeit auf, sodass zur statistischen Absicherung der Ergebnisse viele Versuchswiederholungen durchgeführt werden müssen. Zudem sind Abdriftversuche aufgrund der hohen Anforderungen an die Wetterbedingungen bei der Versuchsdurchführung (JULIUS KÜHN-INSTITUT 2013) nur bedingt planbar. Die Messung der Benetzung auf der Pflanzenoberfläche wird in der Regel mit wassersensitivem Indikatorpapier im Bestand durchgeführt. Dabei erschweren auch hier Effekte die Reproduzierbarkeit, wie z. B. die Abschattung durch die Pflanzenarchitektur, sodass diese Versuche ebenfalls nur mit hohem Aufwand durchgeführt werden können.

Die Herausforderung in der Entwicklung technischer Alternativen zur Messung von Eigenschaften bei der Applikation besteht in der Quantifizierbarkeit der Maßnahmen sowie deren Validierung anhand von Praxisdaten. Empirische Messungen einzelner Versuchsanordnungen werden bereits über analytische Modelle erweitert (GOLLA et al. 2011). Auch numerische Simulationen für die Trop-

fenbildung und die Strömung aus der Düse werden bereits erfolgreich eingesetzt. Die Kombination mit der Benetzung der Zielfläche auf den Pflanzen über geeignete Simulationen ist jedoch noch nicht Bestandteil der Forschung. Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) basiert auf der lagrangeschen Betrachtungsweise und bietet einen Ansatz zur Simulation einzelner Partikel und deren Interaktionen miteinander und mit der Umgebung. Kopplungen zu Strömungssimulationen mit dem komplementären eulerschen Ansatz sind zudem möglich. Die DEM eignet sich über den Kontaktalgorithmus zur Beschreibung der Tropfenverteilung und der Lokalisierung der applizierten Flüssigkeit auf der Zielfläche. Das übergeordnete Ziel ist die Abbildung des gesamten Applikationsvorgangs von der Tropfenentstehung bis zur Benetzung unter realitätsnahen Umgebungsbedingungen mithilfe der DEM. Über virtuelle Versuche können damit die aufwendigen realen Versuche ergänzt oder reduziert werden. Im ersten Schritt wird in diesem Beitrag die Erstellung des Spritzfächers in der Simulationsumgebung untersucht und zur Validierung mit Praxisdaten aus Labormessungen verglichen. Zur korrekten Abbildung des Tropfenspektrums und der Querverteilung in der Applikationsebene wird zunächst eine stationäre Düse ohne zusätzliche Luftströmung aus Fahrtwind oder Abdrift untersucht und modelliert. Wenn Tropfenspektrum und Querverteilung in der DEM-Simulation hinreichend genau abgebildet werden, kann im nächsten Schritt die Untersuchung der Düse mit zusätzlichen Luftströmungen erfolgen.

### Stand der Technik

Im Pflanzenschutz gibt es für jeden Einsatzzweck angepasste Düsen, die auf die Erfüllung unterschiedlicher Anforderungen ausgerichtet sind. Bei hydraulisch arbeitenden Düsenbauformen erfolgt die **Tropfenbildung** im Spritzfächer zunächst aus einer Flüssigkeitslamelle, die an der Austrittsöffnung der Düse entsteht (Abbildung 1). Diese zerfällt anschließend in einzelne Flüssigkeitsfäden, bevor sich diese wiederum in einzelne Tropfen unterschiedlicher Größen auflösen. Optische Messsysteme können die einzelnen **Tropfen innerhalb des Spritzfächers erfassen** und deren Anzahl und Größe statistisch wiedergeben (BISSELL et al. 2014, VULGARAKIS MINOV 2015, OXFORD LASERS 2021).

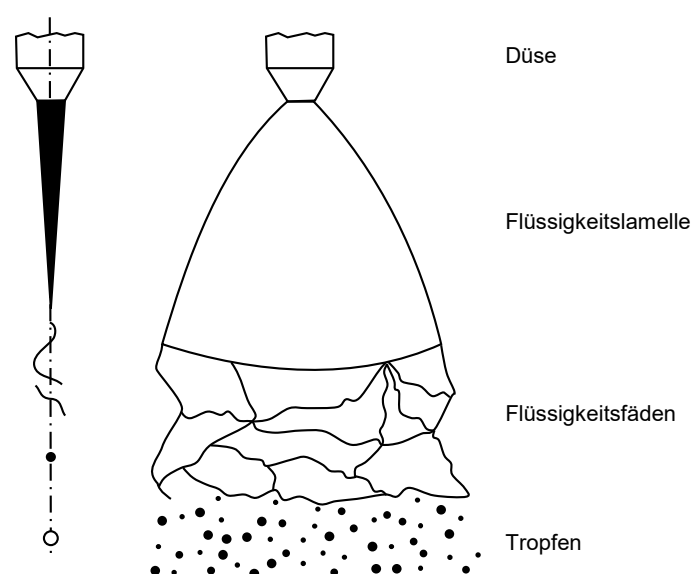


Abbildung 1: Tropfenbildung an einer Düse als ebene Darstellung nach SCHMIDT (1980)

Für die Überführung solcher Messungen in eine **Simulation** ergeben sich zwei Vorteile: Zum einen ist eine Validierung der Simulationsergebnisse möglich, zum anderen können der Gesamtprozess der Pflanzenschutzapplikation in einzelne Teilprozesse aufgliedert und einzelne Aspekte simulativ genauer untersucht werden. Die ersten beiden Teilprozesse sind die Tropfenentstehung und die Ausbildung des Spritzfächers aus den bewegten Tropfen. Der Spritzfächer wird durch äußere Einflüsse wie (Fahrt-)Wind oder Evaporation von einzelnen Tropfen beeinflusst. Den nächsten Teilprozess stellt der Tropfenaufprall auf der Pflanze und der Umgebung dar. Hierbei werden oft vereinfachende Annahmen getroffen und der Fokus auf die Gesamtmenge der applizierten Pflanzenschutzmittel gelegt, da die Abbildung der Verteilung auf der Oberfläche der Pflanze sehr komplex ist. Der letzte Teilprozess beschreibt die Benetzung der Pflanze. Zum einen kann es je nach Oberflächeneigenschaften, Aufprallwinkel, Tropfengeschwindigkeit und weiteren Parametern zu einer Benetzung oder einem Abprallen der Tropfen von der Oberfläche kommen (Abbildung 2). Zum anderen können Tropfen, die auf bereits benetzte Oberflächen treffen, von diesen abrollen oder abtropfen.

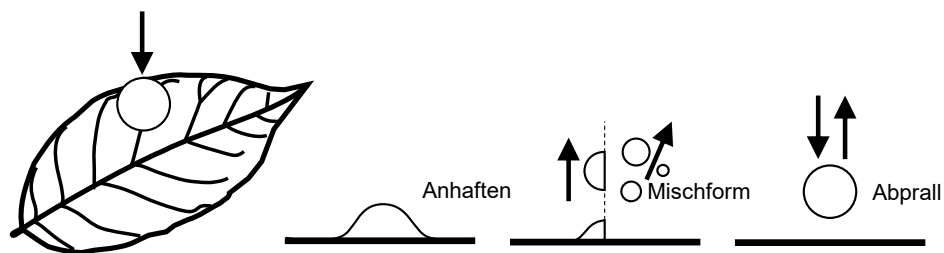


Abbildung 2: Benetzung von Pflanzen mit verschiedenen Aufprallverhalten

Die genannten Teilprozesse wurden für sich betrachtet bereits simulativ untersucht, wobei teilweise auch andere Anwendungen als die Pflanzenschutzmittelausbringung betrachtet wurden. Für die **Tropfenbildung** gibt es nur wenige Simulationsansätze, meist werden die Simulationen der folgenden Prozesse mit einem bestehenden Tropfenspektrum gestartet. SAEDIPOUR (2019) untersucht und modelliert die Tropfenbildung zweier aufeinandertreffender Strahlen in einem medizinischen Inhalator. Die Bestimmung der Tropfengröße findet jedoch erst nachgeschaltet im Post-Processing statt. Auch im Bereich der Farbsprühtechnik wurde die Bildung der Farbtropfen in Sprüheräten untersucht (SHEN et al. 2019).

Für die **Abbildung des Spritzfächers** und teilweise auch für die Berücksichtigung von Abdrift und Verdunstung werden meist mathematische Beschreibungen und empirische Modelle genutzt (HOBSON et al. 1993, HOLTERMAN et al. 1997, HOLTERMAN et al. 1998a, HOLTERMAN et al. 1998b, DORR et al. 2016, FUJIMOTO et al. 2016, COCK et al. 2017, KLUZA et al. 2019). Neben der Abdrift durch Fahrt- und Seitenwind wurden vor dem Hintergrund der Pflanzenschutzmittelausbringung durch Unmanned Aerial Vehicles (UAV) auch die Einflüsse durch den entstehenden Abwind der Rotoren berücksichtigt. Hierfür werden in der Regel Ansätze der CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) genutzt (OMAR et al. 2016, FENGBO et al. 2017, YANG et al. 2018, ZHANG et al. 2018, PARRA et al. 2019, GUO et al. 2020, NI et al. 2021).

Auch für den Teilprozess des **Tropfenaufpralls** auf der besprühten Oberfläche wird oftmals die CFD-Simulation verwendet. Neben der auch in diesem Beitrag betrachteten Anwendung des Aufpralls

von Tropfen auf Pflanzenblättern, bei der je nach Blattoberfläche verschiedene Aufprall- und Abtropfverhalten berücksichtigt wurden (DELELE et al. 2016), wurde beispielsweise auch das thermische Beschichten von Materialien abgebildet, bei dem sich die Tropfen beim Auftreffen auf der Oberfläche schnell verfestigen und dabei verformen können (BOBZIN et al. 2019). Unter Nutzung der DEM wurde das Aufprallverhalten in ein vergleichsweise loses Partikelbett (z. B. Sand) untersucht, was für applizierte Pflanzenschutzmittel interessant ist, die nicht auf Pflanzenoberflächen auftreffen (BÖRNER und TSOTSAS 2013, BÖRNER et al. 2017, LI et al. 2018). Für den Einfluss des Aufprallwinkels gibt es ferner einen Ansatz von MUKHERJEE und ZOHDI (2015), die u.a. das Anhaften der Tropfen auf einer schräg angestellten Platte untersuchten.

Die eigentliche **Benetzung der Oberfläche** wurde vor allem im Bereich der Beschichtungs- und Farbsprühtechnik simulativ untersucht. Zur Beschichtung von beispielsweise Tabletten oder Saatgut werden rotierende Trommeln eingesetzt, in die das Beschichtungsmaterial eingesprüht wird. Für die Abbildung der Partikel in der Trommel ist die DEM-Simulation prädestiniert. Die Abschätzung der Benetzung der Partikel erfolgt teilweise über die Detektion der Zeit, die die Partikel in der „Sprühzone“ verbringen (DUBEY et al. 2011, FREIREICH et al. 2011, KIECKHEFEN et al. 2019). In anderen Ansätzen werden die Tropfen als Partikel A abgebildet, die bei Kollision mit einem zu benetzenden Partikel B gelöscht und der Tropfenmasse des Partikels B als Beschichtungsmasse zugerechnet werden (PASHA et al. 2017). Auch die Übertragung der Feuchtigkeit von einem Partikel auf das andere während des Mischvorgangs kann simuliert werden (WASHINO et al. 2016, SCHMELZLE et al. 2018). Im Bereich der Farbsprühtechnik überwiegt, aufgrund der starren zu besprühenden Oberflächen und der Fokussierung auf die Abbildung des Sprühstrahls, die Nutzung von CFD-Simulationen oder formelbasierten numerischen Beschreibungen. Die Simulationen werden hier oft genutzt, um den Einfluss der Sprühwinkel auf die resultierende Schichtdicke, gerade auch bei komplexen Bauteilen, zu untersuchen (FOGLIATI et al. 2006, YE et al. 2015, CHEN et al. 2017, YE und PULLI 2017, WU et al. 2020). XIE und WANG (2019) betrachten darüber hinaus auch unterschiedliche Drücke der Sprühpistole. Aus dem Bereich der Pflanzenschutztechnik gibt es Ansätze zur mathematischen Beschreibung des Verhaltens der auftreffenden Tropfen auf dem Blatt (MAYO et al. 2015). Durch Zugabe von Chemikalien zur Reduzierung der Oberflächenspannung kann eine Tropfenbildung auf der Blattoberfläche vermieden und stattdessen eine eher flächige Benetzung erreicht werden. Einen etwas globaleren Ansatz verfolgen HONG et al. (2018), die mittels CFD die Ausbreitung von Pflanzenschutzmitteln bei der Applikation in Apfelplantagen abbilden. Die Benetzung der Einzelpflanzen ist darin aber nur vereinfacht enthalten. Einen gesamtheitlicheren Ansatz der Simulation haben DORR et al. im Jahr 2008 umgesetzt. Sie betrachten den Applikationsvorgang vom Düsenaustritt über die Berücksichtigung von Luftströmung, Verdunstung und Abdrift bis hin zur Benetzung unter Einsatz von Pflanzenmodellen. Die erzeugten Tropfen haben hier eine zufällige Größe sowie eine einheitliche, vorgegebene Geschwindigkeit, sodass sich eine theoretisch gleichverteilte Partikeldichte ergibt. Dieser Ansatz vernachlässigt die Inhomogenität innerhalb des Spritzfächers hinsichtlich der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten und wird daher den realen Spritzfächern der meisten Pflanzenschutzspritzdüsen nicht gerecht. Die mathematischen Zusammenhänge wurden in der Software L-studio implementiert (DORR et al. 2008, 2016).

Es wird deutlich, dass die einzelnen Teilprozesse zwar bereits simulativ abgebildet und teilweise mit zufriedenstellenden Ergebnissen validiert wurden, eine Gesamtsimulation zur Darstellung der Zusammenhänge unter Einbindung realer Versuchsdaten zum Tropfenspektrum jedoch noch fehlt. Für die Abbildung der einzelnen Teilprozesse werden verschiedene **Simulationsverfahren** einge-

setzt. In der Simulation des Sprühkegels wird häufig die CFD-Simulation genutzt, welche jedoch Nachteile bei der Kontakterkennung zwischen Tropfen und Pflanze sowie der Abbildung der Benetzung mit sich bringt. Beides kann dagegen gut durch die DEM abgebildet werden. Die DEM ist als Partikelsimulation in der Lage, die Verschiebung und Rotation diskreter Körper im Raum aufgrund der Newtonschen Bewegungsgleichungen zeitdiskret zu berechnen. Die diskreten Körper werden in der Regel als Sphären dargestellt und bieten sich daher für die Nachbildung von Tropfen in der Simulation an. Der wesentliche Vorteil der DEM ist die Abbildung der Tropfen als einzelne, unabhängig voneinander bewegliche Partikel. Somit ist eine ganzheitliche Abbildung des Spritzfächers ab dem Übergang von den Flüssigkeitsfäden zu Tropfen möglich. Durch die Interaktion zwischen Partikeln (Tropfen) und Geometrieelementen (Applikationskörpern) kann die Benetzung von Oberflächen untersucht werden. Gegenüber der CFD nachteilig ist, dass in der DEM durch die reine Interaktion zwischen Partikeln oder Partikeln und Geometrien Strömungen schlecht abzubilden sind. Zwar können äußere Kräfte, wie sie durch ein Strömungsfeld auftreten, auf die Partikel aufgeprägt werden; eine bidirektionale Interaktion zur Abbildung der Einflüsse der Partikel auf die Strömung ist jedoch nicht vorgesehen. Allerdings bestehen vielfältige Möglichkeiten zur Erweiterung der DEM sowie zur Kopplung mit anderen Simulationsmethoden wie der CFD. Die DEM bietet sich daher als Grundgerüst für die simulative Betrachtung der Applikation von Pflanzenschutzmittel an. Als erster Schritt hierzu soll der Sprühkegel mit realen Tropfengrößen und -geschwindigkeiten auch unter Berücksichtigung von äußeren Einflussfaktoren, die zur Abdrift führen können, in der DEM abgebildet werden.

## Material und Methoden

Um den Sprühkegel einer Pflanzenschutzdüse simulativ abbilden und die erzielten Ergebnisse anschließend validieren zu können, muss der Kegel zunächst messtechnisch erfasst werden. Die verwendeten Messmethoden werden im folgenden Abschnitt vorgestellt. Für die DEM-Simulation wird das Tool EDEM 2021 (Altair Engineering, Troy (MI), USA) genutzt.

## Messtechnische Erfassung des Spritzfächers

Zur Untersuchung des Spritzfächers wurden an verschiedenen Messpunkten unterhalb der Düse die Durchmesser- und Tropfengeschwindigkeitsverteilung der Tropfen sowie die Tropfengeschwindigkeit und der Flugwinkel in Abhängigkeit vom Durchmesser bestimmt. Das Tropfenspektrum wurde 100 mm sowie 500 mm unterhalb der Düse untersucht. In einer Entfernung von 100 mm zur Düsenöffnung hat sich die Flüssigkeitslamelle bei der verwendeten Düse visuell vollständig in einzelne Tropfen aufgeteilt. Untersucht wurde die Flachstrahldüse TP 11003 SS von Teejet bei einem Druckniveau von 3 bar im stationären Zustand ohne aufgeprägte Luftströmung. Es wurde das Oxford-Laser System (Oxford Lasers Ltd., Didcot, UK) des Julius Kühn-Institut (JKI) verwendet, welches einzelne Tropfen hinsichtlich Durchmesser (ab 10 µm), Geschwindigkeit und Flugwinkel in einem Messvolumen von ca. 4 x 3 x 15 mm aufzeichnen kann. Das Lasersystem besteht aus der VisiSize N60 Serie mit der Laser-Power-Unit (LPU) Typ 450, einem Laserkopf der Nano-PIV-Serie und der dazugehörigen Kamera.

Die zu untersuchenden Tropfen im Strahl der Pflanzenschutzdüse werden in den Bereich zwischen der Lichtquelle (Laserkopf) und der Kamera eingebracht und als Schattenbilder aufgenommen. Mit der zugehörigen Software „VisiSize 6“ werden in diesen Einzelbildern die Tropfen erkannt und die Durchmesser berechnet. Die Berechnung der Geschwindigkeit und des Flugwinkels erfolgt aus zwei Aufnahmen mit einem bekannten geringen Zeitversatz.

Die Pflanzenschutzdüse ist während der Messungen an einem in der X-Y-Ebene verschiebbaren Gestell aufgehängt und kann über Stellmotoren an verschiedene Punkte gefahren werden. Die Anpassung der Höhe (Z-Richtung) erfolgt manuell. Die Messungen wurden an diskreten Punkten durchgeführt. Die Abbildung 3 zeigt den Spritzfächer sowie die Messpunkte eines Quadranten in der X-Y-Ebene. Die Volumenanteile an den entsprechenden Punkten resultieren aus einer Messung der absoluten Längsverteilung in Y-Richtung sowie den Messungen von Tropfendurchmesser und -anzahl an den diskreten Punkten. Die Messungen wurden in allen Quadranten mit identischen Einstellungen durchgeführt und dann auf einen Quadranten gemittelt, um Symmetrieabweichungen der Düse zu eliminieren.

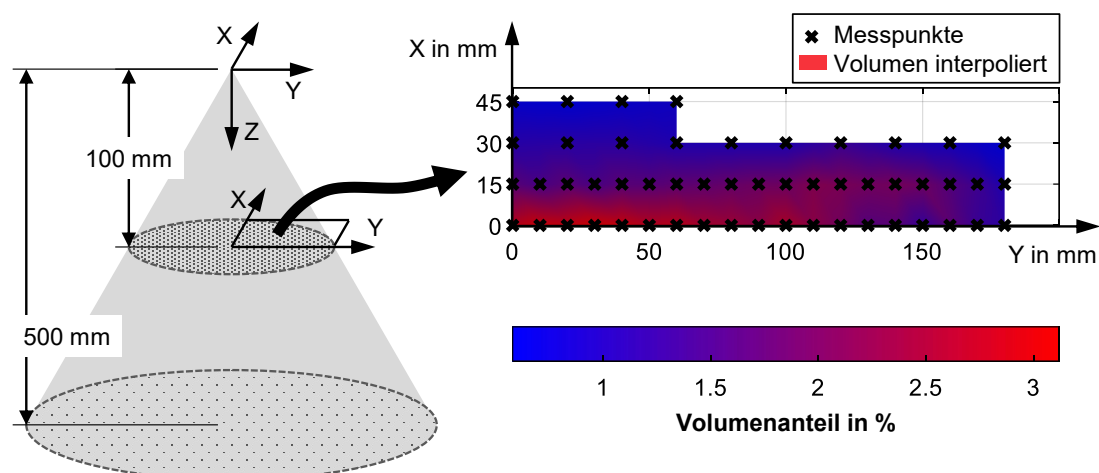


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Messpunkte in einem Quadranten 100 mm unterhalb der Düse

Die Verarbeitung der gewonnenen Tropfendaten (Durchmesser, Geschwindigkeit und Flugwinkel) erfolgte in MATLAB (The MathWorks Inc., Natick (MA), USA). Für jeden Messpunkt wurden die Durchmesser- sowie die einzelnen Verteilungen für Flugwinkel und Fluggeschwindigkeit in Bezug auf den Durchmesser bestimmt. Für die Durchmesser-Verteilung wurde aus 20 Verteilungsfunktionen die mit den geringsten Abweichungen zu den Messdaten ausgewählt. Für Flugwinkel und -geschwindigkeit wurden Normalverteilungen angenommen. Die Verteilungsparameter werden über die Methode der größten Dichte automatisiert bestimmt.

Zusätzlich zur Untersuchung der Tropfenzusammensetzung wurde die Querverteilung der Düse auf dem Einzeldüsen-Rinnenprüfstand des JKI mit 25 mm Auflösung unter gleichen Einstellungen und Randbedingungen bestimmt (JULIUS KÜHN-INSTITUT 2021). In jeder Rinne des Prüfstands wird das applizierte Volumen über die Messdauer gesammelt und kann nach dem Versuch bestimmt werden. Die Querverteilung der Düse wird als Normalverteilung angenommen und kann aus den Messdaten abgeleitet werden. Aus dem Verhältnis der summierten Einzelvolumina zur Zeitdauer der Prüfung lässt sich mit dem Prüfstand zusätzlich der absolute Volumenstrom der Düse bestimmen. Die Untersuchung der Querverteilung auf dem Einzeldüsen-Rinnenprüfstand wurde analog zur Messung des Tropfenspektrums bei Düsenhöhen von 100 und 500 mm durchgeführt. Zur Modellbildung werden die Messergebnisse zum Tropfenspektrum sowie zur gemessenen Querverteilung in der 100-mm-Ebene verwendet. In der Validierung wird das simulierte Tropfenspektrum sowie die Querverteilung in der 500-mm-Ebene mit den Versuchsdaten verglichen.

## Verwendete Simulationstools

Zur Abbildung des Spritzfächers in einer DEM-Umgebung wird die kommerzielle Software EDEM 2021 (Altair Engineering, Troy (MI), USA) verwendet. Diese bietet durch vordefinierte programmierbare Schnittstellen (API) die nötige Flexibilität und gleichzeitig die notwendige Rechenleistung zur Abbildung großer Partikelzahlen. Ein zusätzliches **API-Modell zur Partikelerzeugung** wird einmalig zu Simulationsbeginn aufgerufen und liest eine Liste mit Partikeldaten zur Erstellung ein. Diese Partikelliste wird vorab mit MATLAB erzeugt und beinhaltet eine vordefinierte Anzahl an Partikeln mit entsprechenden Durchmessern, Anfangsgeschwindigkeiten und Flugwinkeln auf Grundlage der gemessenen Verteilungskurven sowie einen Erstellzeitpunkt für jedes Partikel auf Grundlage der vorgegebenen Flussrate.

Das Modell zur Partikelerstellung verarbeitet die Liste und übergibt zum angegebenen Erstellzeitpunkt die Partikel an die Simulationsumgebung. Zur vereinfachten Abbildung des Luftwiderstands der Partikel wird ein zusätzliches **API-Modell zur Beeinflussung der Partikelkraft** genutzt. Dieses Modell wird für jedes Partikel in jedem Rechenschritt aufgerufen. Aus der Partikelgeschwindigkeit und Flugrichtung lässt sich eine Widerstandskraft berechnen, die an die Simulationsumgebung zurückgegeben wird. Zur Benetzung von Oberflächen wird ein zusätzliches **API-Modell für Kontaktkräfte** verwendet. Dieses dient üblicherweise zur Modellierung spezifischer Kontaktmodelle und kann für Partikel-Partikel-Kontakte wie auch für Partikel-Geometrie-Kontakte implementiert werden. Das Modell wird für jeden Kontakt in jedem Rechenschritt aufgerufen. Zur Benetzung der Oberflächen wird der Kontakt zwischen Partikel und Geometrieelementen erkannt und das Volumen der Partikel auf das Geometrieelement übertragen. Das Partikel wird anschließend aus der Simulationsumgebung entfernt. Kontaktkräfte zwischen Partikeln und zwischen Partikel und Geometrieelementen werden nicht berechnet. Die API-Modelle werden in C++ geschrieben und als „dynamische Programmbibliothek“ (DLL) in die Simulationsumgebung integriert.

## Resultate

Das wesentliche Ergebnis der durchgeführten Arbeiten ist die entwickelte Methode zur Simulation des Spritzfächers, die im folgenden Abschnitt vorgestellt wird. Mit dem entwickelten Modell wurden die Validierungsversuche nachgestellt sowie darüber hinausgehende Simulationsergebnisse erzeugt.

## Entwickelte Methode zur Simulation des Spritzfächers

Die erarbeitete Methode zur Abbildung des Spritzfächers in der Simulation mit einem generischen Düsenmodell in der DEM zeigt Abbildung 4. Mit dem generischen Düsenmodell können die Tropfen in Form von Partikeln in der Simulationsumgebung erstellt werden. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden erläutert.

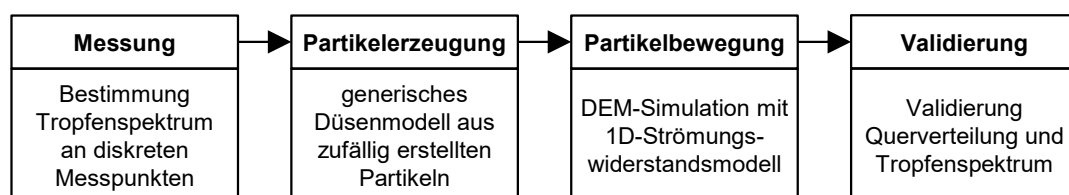


Abbildung 4: Vorgehensweise zur simulativen Abbildung eines Spritzfächers

Die **Partikelerzeugung** im generischen Düsenmodell basiert auf den aus Messdaten abgeleiteten Verteilungsfunktionen. Zunächst wird gemäß der Querverteilung  $\sigma_{y0}$  der Düse eine zufällige Y-Koordinate  $y$  aus dem Bereich  $[0, y_{max}]$  gewählt (Gleichung 1), an der das jeweilige Partikel zur Abbildung des Tropfens erstellt wird.

$$y = \sigma_{y0} \cdot U(0,1) \tag{Gl. 1}$$

Die Grundform der Düse wird dabei als ideale Ellipse angenommen. Zur Erzeugung der elliptischen Form wird anschließend die Längsverteilung in X-Richtung anhand der Y-Koordinate in Abhängigkeit der maximalen Ausdehnung  $y_{max}$  skaliert. Die maximale Längsverteilung  $\sigma_{x0}$  wird für die Position mittig unter der Düse angegeben (Gleichung 2).

$$\sigma_x(y) = \sqrt{\left(1 - \frac{y^2}{y_{max}^2}\right) \cdot \sigma_{x0}^2} \tag{Gl. 2}$$

Aus der Längsverteilung  $\sigma_x(y)$  an der Y-Position wird analog zur Gleichung 1 eine zufällige X-Koordinate  $x$  ermittelt. In Abbildung 5 sind die resultierenden Startpunkte der Tropfenpartikel in der Simulation zu sehen. Dargestellt ist die auf die Gesamtanzahl normalisierte Partikelhäufigkeit der einzelnen Flächenelemente. Erkennbar ist die erhöhte Menge an Partikeln nahe der Düsenmitte, welche in X- und Y-Richtung kontinuierlich abnimmt.

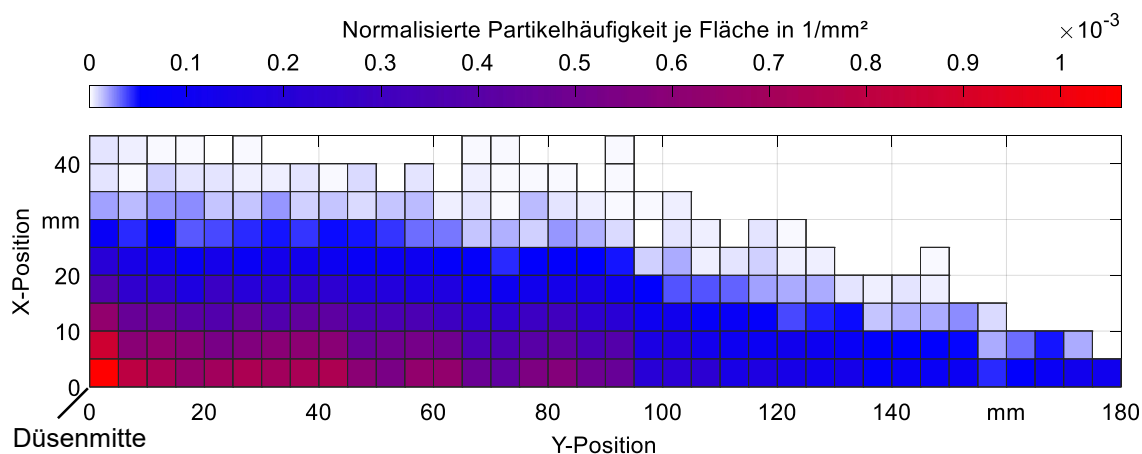


Abbildung 5: Partikelhäufigkeit in der 100 mm Ebene der Simulation einer 1/4 Düse

Nach Bestimmung der X- und Y-Position des Tropfenpartikels werden die zwei nächstgelegenen Messpunkte als Stützstellen  $S_1$  und  $S_2$  herangezogen (Abbildung 6). Gemäß den beiden Durchmesserverteilungen an den Stützpunkten werden zwei zufällige Durchmesser  $d_1$  und  $d_2$  bestimmt. Die Abstände  $l_1$  und  $l_2$  zwischen der Partikelposition und den Stützstellen werden als Gewichte verwendet, um einen mittleren Durchmesser  $d$  als endgültigen Partikeldurchmesser zu ermitteln. Zu diesem Durchmesser werden dann aus den entsprechenden Verteilungen beider Stützpunkte die Fluggeschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  sowie die Flugwinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  bestimmt. Analog zur Bestimmung des



Durchmessers werden die Abstände zum Stützpunkt als Gewichte zur Berechnung der Partikelgeschwindigkeit  $v$  und dem Flugwinkel  $\alpha$  verwendet. Somit sind die Tropfeneigenschaften vollständig bestimmt und es wird der nächste Tropfen aus den Verteilungen ermittelt. In der Simulation wurde eine Tropfenanzahl von 20.000 Partikel gewählt, die eine qualitative Abbildung des Tropfenspektrums unter akzeptablen Berechnungszeiten erlaubt.

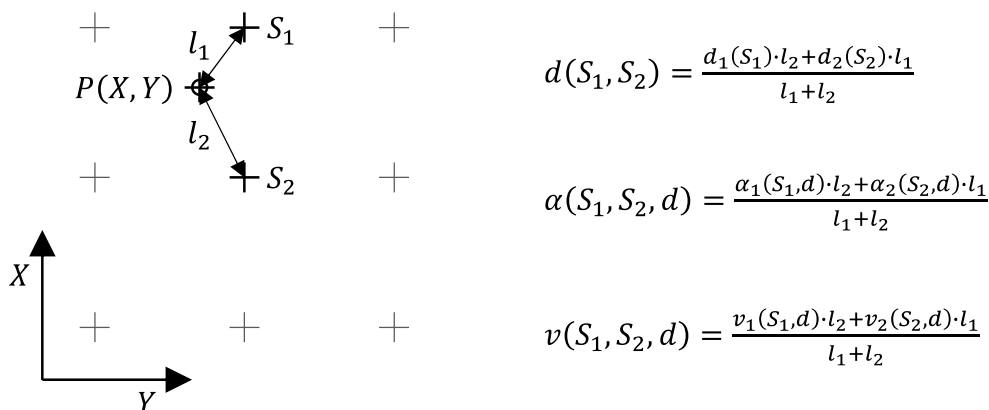


Abbildung 6: Bestimmung der Partikeleigenschaften über Stützstellen

Im Folgenden wird das Bewegungsmodell in der DEM beschrieben. Die **Partikelbewegung** kann durch eine Gravitationskraft und durch ein eindimensionales Strömungswiderstandsmodell beeinflusst werden, wodurch ein realitätsnahes Verhalten in der umgebenden Luft der einzelnen Partikel ermöglicht wird. Die Gravitation wirkt als kontinuierliche Beschleunigung in Z-Richtung auf die Partikel (Partikelmasse  $m_p$ , Beschleunigungskraft  $F_z$ , Gleichung 3).

$$F_z = m_p \cdot g \tag{Gl. 3}$$

Das Strömungsmodell wurde hierzu von HOLTERMAN et al. (1997) übernommen. Dieses basiert auf der empirischen Berechnung des Luftwiderstandsbeiwerts  $c_w$  auf Basis der Reynolds-Zahl  $Re$  der Tropfen. Diese berechnet sich aus der Relativgeschwindigkeit  $v_r$ , der Luftdichte  $\rho_L$  sowie dem Partikeldurchmesser  $d_p$  (Gleichung 5).

$$Re = |\vec{v}_r| \cdot \rho_L \cdot \frac{r_p}{18.2 \cdot 10^{-6}} \tag{Gl. 4}$$

$$c_w = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^{0.52} + 0.553 \right]^{1.923} \tag{Gl. 5}$$

Die Strömungswiderstandskraft  $F_s$  berechnet sich dann aus der Relativgeschwindigkeit, dem Luftwiderstandsbeiwert, dem Partikelradius sowie der Luftdichte. Als strömungswirksame Fläche wird eine Kreisfläche mit dem Partikelradius angenommen (Gleichung 6).

$$\vec{F}_S = 0.5 \cdot \vec{v}_r \cdot |\vec{v}_r| \cdot c_w \cdot \pi \cdot r_p^2 \cdot \rho_L \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Relativgeschwindigkeit setzt sich aus der Partikelgeschwindigkeit  $\vec{v}_p$  und einem einstellbaren, aufgeprägten Luftstrom  $\vec{v}_S$  zusammen, durch den eine vereinfachte Abbildung des Fahrtwindes oder einer Abdrift ermöglicht wird (Gleichung 7).

$$\vec{v}_r = \vec{v}_S - \vec{v}_p \quad (\text{Gl. 7})$$

Im neu entwickelten, speziellen Kontaktmodell zur Darstellung der Benetzung werden keine Kontaktkräfte zwischen den Partikeln sowie zwischen Partikeln und Geometrieelementen berechnet. Stattdessen wird bei Kontakt von Partikeln und Geometrieelementen die äquivalente Schichtdicke auf der Geometrie bestimmt. Das Partikelvolumen wird gleichmäßig und vollständig auf der Geometrie fläche verteilt und das Partikel direkt im Anschluss aus der Simulation entfernt. Bei mehrfachem Auftreffen von Partikeln auf demselben Geometrieelement addieren sich die Schichtdicken. Die Implementierung eines Abprallens von Tropfen (Abbildung 2) ist prinzipiell möglich, muss hierfür aber vorab detailliert untersucht werden.

Zur Verifikation und **Validierung** des Düsenmodells wird analog zum Versuch eine stationäre Düse ohne Fahrtwind und Seitenwind nachgebildet. Die Partikelgenerierung wird nur einmalig zum Zeitpunkt  $t = 0,0 \text{ s}$  in der Erstellebene 100 mm unterhalb der Düse durchgeführt und bildet nur ein Viertel der Düse ab. Zur Verifikation der Partikelgenerierung werden die in der Simulation erzeugten Partikel mit den Messungen des Tropfenspektrums (Partikelanzahl und -durchmesser) und der Querverteilung (Partikelvolumen) 100 mm unterhalb der Düse verglichen. Das Ziel der Simulation ist die korrekte Abbildung des Spritzfächers, welcher über das Tropfenspektrum und die Querverteilung in einer Ebene 500 mm unterhalb der Düse charakterisiert werden kann. Die Partikelanzahl-/ Durchmesser- bzw. Volumenverteilungen in dieser Ebene werden daher zur Validierung der Simulation des Spritzfächers genutzt. Die Auswertung der Querverteilung findet nach dem Absinken aller Partikel auf die Applikationsebene statt.

### Simulationsergebnisse

Das Simulationsmodell besteht aus dem entwickelten Düsenmodell, welches 400 mm oberhalb einer Platte zur Abbildung der Applikationsfläche die Partikel erzeugt, und entspricht damit den Versuchsaufbauten. Abbildung 7 zeigt vier Zeitpunkte der Simulation des Validierungsversuchs. Es ist zu erkennen, dass 0,1 s nach Partikelerstellung die großen und schnellen Partikel bereits die Applikationsfläche erreicht und damit auch den wesentlichen Anteil des Gesamtvolumens aufgebracht haben. Die kleinsten und vom Luftwiderstand stärker beeinflussten Partikel benötigen jedoch über 40 s, um die Applikationsebene zu erreichen. Die Ermittlung der Querverteilung erfolgt über die simulierte Benetzung der Platte, zur Verifikation wurde diese in die Erstellebene verschoben.

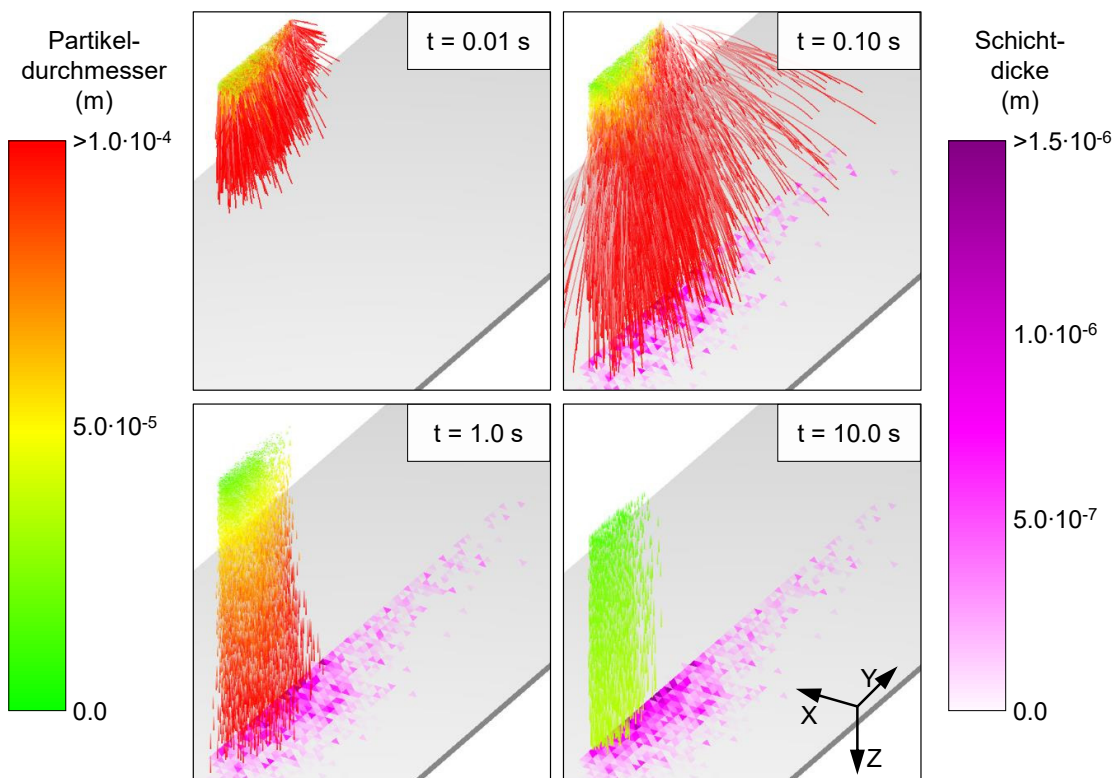


Abbildung 7: Simulation 1/4 Düse zur Benetzung der Applikationsebene

In Abbildung 8 sind die Querverteilungen von Versuch und Simulation in der Erstellebene ( $Z = 100 \text{ mm}$ ) sowie in der Applikationsebene ( $Z = 500 \text{ mm}$ ) gegenübergestellt. In der Erstellebene zeigt die Simulation eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. In der Applikationsebene erreicht das Modell in der Simulation annähernd dieselbe halbe Sprühbreite von ca. 750 mm. Direkt unter der Düse ist das applizierte Volumen in der Simulation jedoch höher und dafür im Abstand von 250 bis 750 mm der Düsenmitte geringer als im Versuch.

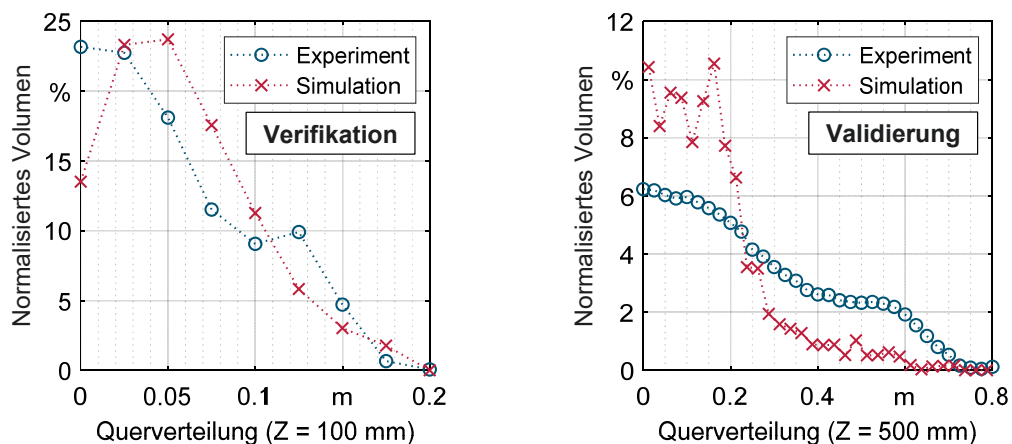


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Querverteilungen in Y-Richtung zwischen Experiment und Simulation

Neben der Querverteilung kann auch das Tropfenspektrum mittig unterhalb der Düse als Validierungsparameter untersucht werden (Abbildung 9). In der Erstellebene wird das Tropfenspektrum mit einem leichten Trend zu kleineren Tropfen hinreichend gut abgebildet. In der Applikationsebene ist der Anteil kleinster Partikel mit einem Durchmesser von 0 bis 50  $\mu\text{m}$  in der Simulation deutlich höher als im Versuch. Entsprechend geringer ist die Häufigkeit von Partikeln mit einem Durchmesser von 50 bis 200  $\mu\text{m}$ .

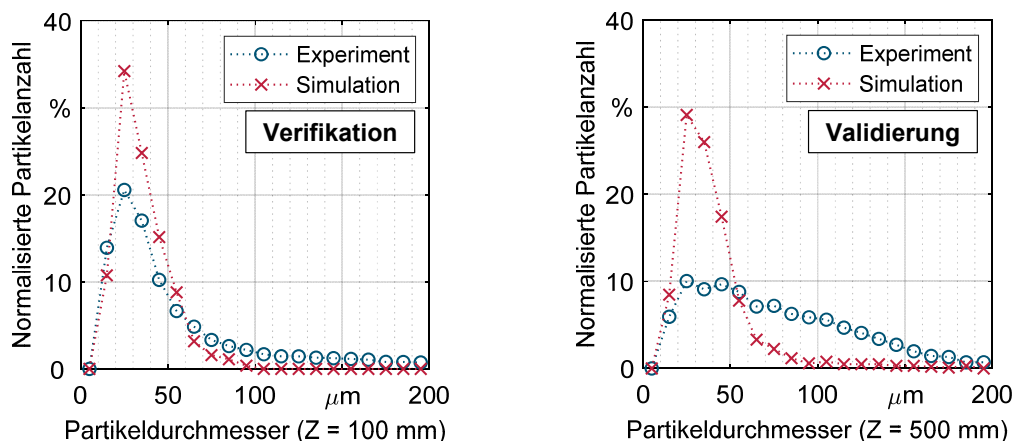


Abbildung 9: Vergleich des Tropfenspektrums mittig unterhalb der Düse zwischen Experiment und Simulation

Ergänzend zu den Validierungssimulationen wurde eine Gesamtsimulation des Applikationsvorgangs unter Berücksichtigung von Abdrift und Benetzung durchgeführt (Abbildung 10). Dargestellt ist hier die Tropfenbewegung bei einem uniformen Fahrtwind von 2 m/s. Der Fahrtwind wird über einen zusätzlichen Vektor in X-Richtung im Luftwiderstandsmodell implementiert. Die Pflanzen werden als feste Geometriemodelle in die Simulationsumgebung übertragen. Somit kann die Benetzung der Pflanzen als virtuelle Schichtdicke mit dem speziellen Kontaktmodell untersucht werden.

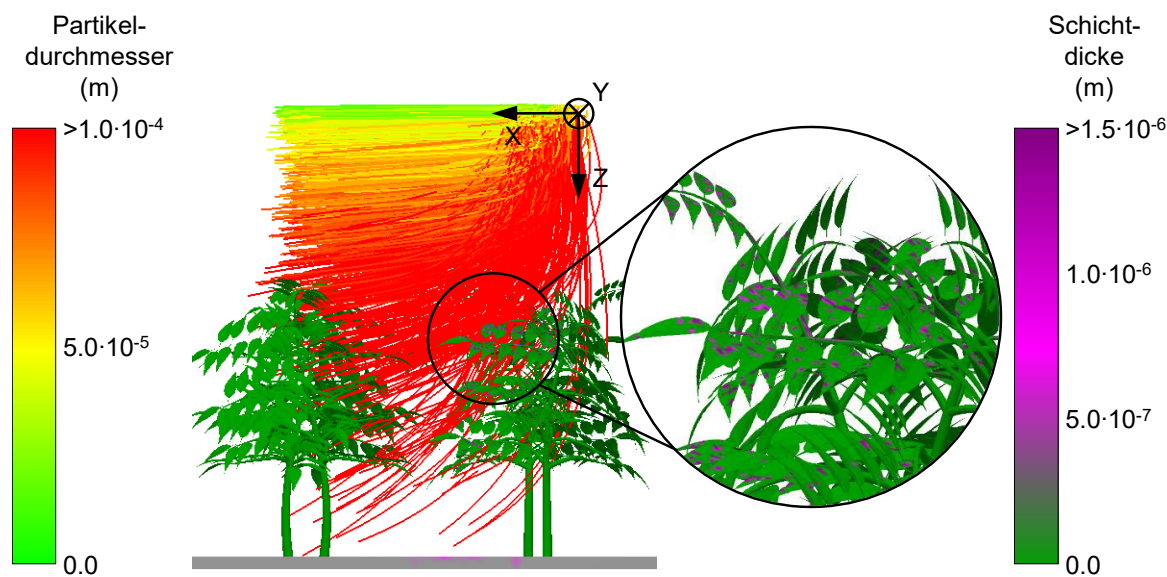


Abbildung 10: Anwendung des Simulationsmodells zur Untersuchung von Abdrift und Benetzung

## Diskussion

Das Ziel der durchgeführten Arbeiten lag in der Erstellung des Spritzfächers einer Pflanzenschutz-spritzdüse in der DEM-Simulationsumgebung auf Basis von Messdaten und einer anschließenden Validierung. Für die abschließende Bewertung der entwickelten Methode werden die erzielten Simulationsergebnisse im Folgenden diskutiert. Im Anschluss werden Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Modells aufgezeigt.

Die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen in der Ebene der Tropfenerstellung zeigt sowohl in der Querverteilung als auch im Tropfenspektrum eine gute Übereinstimmung (Abbildung 8, Abbildung 9 links). Die Tropfengenerierung ist damit verifiziert. Für die Validierung werden die Ergebnisse aus beiden Versuchen und aus der Simulation auf der Applikationsebene 500 mm unterhalb der Düse ausgewertet. Im Gegensatz zur Erstellebene zeigen sich hier Abweichungen in der Querverteilung wie auch im Tropfenspektrum. Die Ursache für die Abweichungen können selbstinduzierte Luftströmungen sein, die durch die schnelle Bewegung der großen Tropfen erzeugt wird. Durch das Auftreffen der Strömung auf die Zielebene und aufgrund des Geschwindigkeitsgradienten der Strömung zwischen Spritzfächer und umgebender Luft entstehen Wirbel innerhalb des Spritzfächers, die im Versuch die mittleren und kleinen Tropfen weiter nach außen tragen. Dies würde die Abweichungen im Tropfenspektrum mittig unterhalb der Düse (Abbildung 9) erklären. Im Randbereich lässt sich diese These aufgrund der geringen absoluten Partikelanzahl mit den bisherigen Messungen allerdings nicht bestätigen. Die für die Versuche verwendete Düse TP11003 von TeeJet ist mit einem feinen Tropfenspektrum angegeben und diente am JKI als Referenzdüse für Abdriftmessungen. Aufgrund des Tropfenspektrums ist eine Simulation dieser Düse herausfordernder als die einer Düse mit größeren Tropfen, da wie in den Messungen zu sehen größere Tropfen weniger durch Luftreibungen beeinflusst werden.

## Schlussfolgerungen

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass das Simulationsmodell bereits zur Darstellung und vereinfachten Untersuchung der Abdrift und Benetzung eingesetzt werden kann (Abbildung 10). Aufgrund der vorliegenden Abweichungen zu den Versuchen ist das Modell noch nicht vollständig validiert, hierfür müssen die Strömungen im Spritzfächer genauer untersucht und in das Modell implementiert werden. Mit der erfolgreichen Erzeugung des Spritzfächers ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg hin zu einem Gesamtmodell zur Simulation von Pflanzenschutzdüsen getan, wenn auch noch Weiterentwicklungen erforderlich sind. Die Tropfengenerierung, die aktuell 100 mm unterhalb der Düse erfolgt, soll auf den Düsenaustrittspunkt zurückgerechnet werden. Damit sollen äußere Einflüsse wie Fahrt- und Seitenwind, die auch schon in den ersten 100 mm unterhalb der Düse auf die Flüssigkeitslamelle und -fäden wirken können, berücksichtigt werden. Für die Abbildung selbst-induzierter Strömungen im Spritzfächer ist eine klassische DEM-Simulation nicht das geeignete Werkzeug, weshalb im nächsten Schritt eine Kopplung mit einer CFD-Simulation erfolgen soll.

Weiterhin kann der Prozess der Abdrift differenzierter untersucht und implementiert werden, indem eine lateral wirkende Kraft direkt in der DEM-Umgebung aufgeprägt wird. Gegebenenfalls kann die für die selbstinduzierten Strömungen genutzte CFD-Kopplung auch für die Abbildung der Abdrift verwendet werden. Weitere Herausforderungen bei der Simulation der Abdrift stellen die durch die äußeren Kräfte vermehrt auftretenden Effekte des Tropfenzerfalls, der Tropfenagglomeration sowie der Evaporation dar. Die weiterentwickelten Modelle sollen anhand empirisch gewonnener Mess-

daten validiert werden. Die Abdrift beeinflusst vor allem die kleineren Tropfen, was Vergleichsmessungen aufwendig macht. Geeignete Messmethoden sind zu identifizieren und umzusetzen. Hierzu steht mit dem Windkanal am JKI eine Möglichkeit für reproduzierbare Versuche zum Abdriftverhalten von Düsen zur Verfügung. Mit einer erfolgreichen Validierung des Abdriftverhaltens kann davon ausgegangen werden, dass das Simulationsmodell den Spritzfächer für weitere Untersuchungen hinreichend genau abbildet. Anschließend kann die sukzessive Erweiterung des Modells um die übrigen Prozessschritte, insbesondere den Aufprall auf den Pflanzen bzw. der Umgebung und die daraus resultierende Benetzung erfolgen. Schließlich soll damit ein Gesamtmodell entstehen, mit dem die aufwendigen Feldversuche mit Pflanzenschutzdüsen reduziert und die gewonnenen Erkenntnisse erweitert werden können.

## Literatur

- Bissell, D.; Lai, W.; Stegmeir, M.; Troolin, D.R.; Pothos, S.; Lengsfeld, C.S. (2014): An Approach to Spray Characterization by Combination of Measurement Techniques. In: ILASS Americas 26<sup>th</sup> Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Mai 2014, Portland
- Bobzin, K.; Öte, M.; Knoch, M.A.; Alkhasli, I.; Dokhanchi, S.R. (2019): Modelling of particle impact using modified momentum source method in thermal spraying. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 480, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/480/1/012003>
- Börner, M.; Bück, A.; Tsotsas, E. (2017): DEM-CFD investigation of particle residence time distribution in top-spray fluidised bed granulation. *Chemical Engineering Science* 161, pp. 187–197, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.12.020>
- Börner, M.; Tsotsas, E. (2013): Spray zone demarcation in top-spray fluidised bed granulation by droplet detection methods. In: 6th International Granulation Workshop, June 2013, Sheffield, UK
- Chen, Y.; Chen, W.; Li, B.; Zhang, G.; Zhang, W. (2017): Paint thickness simulation for painting robot trajectory planning: a review. *Industrial Robot: An International Journal* 44(5), pp. 629–638, <https://doi.org/10.1108/IR-07-2016-0205>
- Cock, N. de; Massinon, M.; Salah, S.O.; Lebeau, F. (2017): Investigation on optimal spray properties for ground based agricultural applications using deposition and retention models. *Biosystems Engineering* 162, pp. 99–111, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.001>
- Delele, M.A.; Nuyttens, D.; Duga, A.T.; Ambaw, A.; Lebeau, F.; Nicolai, B.M.; Verboven, P. (2016): Predicting the dynamic impact behaviour of spray droplets on flat plant surfaces. *Soft matter* 12(34), pp. 7195–7211, <https://doi.org/10.1039/c6sm00933f>
- Dorr, G.; Hanan, J.; Adkins, S.; Hewitt, A.; O'Donnell, C.; Noller, B. (2008): Spray deposition on plant surfaces: a modelling approach. *Functional plant biology : FPB* 35(10), pp. 988–996, <https://doi.org/10.1071/FP08056>
- Dorr, G.J.; Forster, W.A.; Mayo, L.C.; McCue, S.W.; Kempthorne, D.M.; Hanan, J.; Turner, I.W.; Belward, J.A.; Young, J.; Zabkiewicz, J.A. (2016): Spray retention on whole plants: modelling, simulations and experiments. *Crop Protection* 88, pp. 118–130, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.06.003>
- Dubey, A.; Hsia, R.; Saranteas, K.; Brone, D.; Misra, T.; Muzzio, F.J. (2011): Effect of speed, loading and spray pattern on coating variability in a pan coater. *Chemical Engineering Science* 66(21), pp. 5107–5115, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.010>
- Fengbo, Y.; Xinyu, X.; Ling, Z.; Zhu, S. (2017): Numerical simulation and experimental verification on downwash air flow of six-rotor agricultural unmanned aerial vehicle in hover. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 10(4), pp. 41–53, <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171004.3077>
- Fogliati, M.; Fontana, D.; Garbero, M.; Vanni, M.; Baldi, G.; Dondè, R. (2006): CFD simulation of paint deposition in an air spray process. *Journal of Coatings Technology and Research* 3(2), pp. 117–125, <https://doi.org/10.1007/s11998-006-0014-5>

- Freireich, B.; Li, J.; Litster, J.; Wassgren, C. (2011): Incorporating particle flow information from discrete element simulations in population balance models of mixer-coaters. *Chemical Engineering Science* 66(16), pp. 3592–3604, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.04.015>
- Fujimoto, A.; Satow, T.; Kishimoto, T. (2016): Simulation of spray distribution with boom sprayer considering effect of wind for agricultural cloud computing analysis. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 9(4), pp. 305–310, <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.04.001>
- Golla, B.; Strassemeyer, J.; Koch, H.; Rautmann, D. (2011): Eine Methode zur stochastischen Simulation von Abdriftwerten als Grundlage für eine georeferenzierte probabilistische Expositionsabschätzung von Pflanzenschutzmitteln. 33-44 Pages / *Journal für Kulturpflanzen*, Vol. 63 No. 2 (2011), <https://doi.org/10.5073/JfK.2011.02.02>
- Guo, Q.; Zhu, Y.; Tang, Y.; Hou, C.; He, Y.; Zhuang, J.; Zheng, Y.; Luo, S. (2020): CFD simulation and experimental verification of the spatial and temporal distributions of the downwash airflow of a quad-rotor agricultural UAV in hover. *Computers and Electronics in Agriculture* 172, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105343>
- Hobson, P.A.; Miller, P.; Walklate, P.J.; Tuck, C.R.; Western, N.M. (1993): Spray Drift from Hydraulic Spray Nozzles: the Use of a Computer Simulation Model to Examine Factors Influencing Drift. *Journal of Agricultural Engineering Research* 54(4), pp. 293–305, <https://doi.org/10.1006/jaer.1993.1022>
- Holterman, H.J.; Michielsen, J.; van de Zande, J.C. (1998a): Spray drift in crop protection: validation and usage of a drift model. Paper no. 98-A-012, 24.–28.08.1998, Oslo
- Holterman, H.J.; van de Zande, J.C.; Porskamp H.A.J.; Huijsmans, J. (1997): Modelling spray drift from boom sprayers. *Computers and Electronics in Agriculture* 19, pp. 1–22
- Holterman, H.J.; van de Zande, J.C.; Porskamp H.A.J.; Michielsen, J. (1998b): IDEFICS: a physical model of spray drift from boom sprayers in agriculture. In: ILASS Europe, Institute for Liquid Atomization and SpraySystems; The Atomization and Sprays Research Group UMIST, 6.–8.7.1998, Manchester, pp. 493–498
- Hong, S.-W.; Zhao, L.; Zhu, H. (2018): CFD simulation of pesticide spray from air-assisted sprayers in an apple orchard: Tree deposition and off-target losses. *Atmospheric Environment* 175, pp. 109–119, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.12.001>
- Julius Kühn-Institut (2013): JKI-Richtlinie 7-1.5 für die Prüfung von Pflanzenschutzgeräten. Messung der direkten Abdrift beim Ausbringen von flüssigen Pflanzenschutzmitteln im Freiland, Braunschweig
- Julius Kühn-Institut (2021): Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz. Geräte und Ausstattungen. <https://www.julius-kuehn.de/at/geraete-und-ausstattungen/>, Zugriff am 15.07.2021
- Kieckhefen, P.; Lichtenegger, T.; Pietsch, S.; Pirker, S.; Heinrich, S. (2019): Simulation of spray coating in a spouted bed using recurrence CFD. *Particuology* 42, pp. 92–103, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.01.008>
- Kluza, P.A.; Kuna-Broniowska, I.; Parafiniuk, S. (2019): Modeling and Prediction of the Uniformity of Spray Liquid Coverage from Flat Fan Spray Nozzles. *Sustainability* 11(23), <https://doi.org/10.3390/su11236716>
- Li, Y.; Li, D.; Bie, S.; Wang, Z.; Zhang, H.; Tang, X.; Zhen, Z. (2018): Numerical simulation for fluid droplet impact on discrete particles with coupled SPH-DEM method. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 28(11), pp. 2581–2605, <https://doi.org/10.1108/HFF-11-2017-0464>
- Mayo, L.C.; McCue, S.W.; Moroney, T.J.; Forster, W.A.; Kempthorne, D.M.; Belward, J.A.; Turner, I.W. (2015): Simulating droplet motion on virtual leaf surfaces. *Royal Society open science* 2(5), p. 140528, <https://doi.org/10.1098/rsos.140528>
- Mukherjee, D.; Zohdi, T.I. (2015): A discrete element based simulation framework to investigate particulate spray deposition processes. *Journal of Computational Physics* 290, pp. 298–317, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2015.02.034>
- Ni, M.; Wang, H.; Liu, X.; Liao, Y.; Fu, L.; Wu, Q.; Mu, J.; Chen, X.; Li, J. (2021): Design of Variable Spray System for Plant Protection UAV Based on CFD Simulation and Regression Analysis. *Sensors (Basel, Switzerland)* 21(2), <https://doi.org/10.3390/s21020638>
- Omar, Z.; Qiang, K.Y.; Mohd, S.; Rosly, N. (2016): CFD Simulation of Aerial Crop Spraying. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 160, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/160/1/012028>
- Oxford Lasers (2021): VisiSize N60 - Spray Characterisation Tool | Oxford Lasers. <https://www.oxfordlasers.com/laser-imaging/visisize-n60>, Zugriff am 21.07.2021

- Parra, H.G.; Morales, V.D.A.; Garcia, E.E.G. (2019): Multiphase CFD Simulation of Photogrammetry 3D Model for UAV Crop Spraying. In: *New Knowledge in Information Systems and Technologies*. Hg. Rocha, Á.; Adeli, H. et al., Cham, Springer International Publishing, pp. 812–822
- Pasha, M.; Hare, C.; Ghadiri, M.; Gunadi, A.; Piccione, P.M. (2017): Inter-particle coating variability in a rotary batch seed coater. *Chemical Engineering Research and Design* 120, pp. 92–101, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.033>
- Saeedipour, M. (2019): Atomization of two colliding micro liquid jets in a respiratory inhaler: A computational study. In: *29th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2–4.09.2019, Paris
- Schmelzle, S.; Asylbekov, E.; Radel, B.; Nirschl, H. (2018): Modelling of partially wet particles in DEM simulations of a solid mixing process. *Powder Technology* (338), pp. 354–364
- Schmidt, M. (1980): Einfluß physikalischer Flüssigkeitseigenschaften auf die Zerstäubung im Pflanzenschutz. *Grundlagen der Landtechnik* 30(4), S. 126–134, <https://440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/Grundlagen/article/view/398>
- Shen, B.; Ye, Q.; Tiedje, O.; Domnick, J. (2019): Simulation of the primary breakup of non-Newtonian liquids at a high-speed rotary bell atomizer for spray painting processes using a VOF-Lagrangian hybrid model. In: *29th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2–4.09.2019, Paris
- Vulgarakis Minov, S. (2015): Integration of imaging techniques for the quantitative characterization of pesticide sprays. Dissertation, Ghent University
- Washino, K.; Miyazaki, K.; Tsuji, T.; Tanaka, T. (2016): A new contact liquid dispersion model for discrete particle simulation. *Chemical Engineering Research and Design* 110, pp. 123–130, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.022>
- Wu, H.; Xie, X.; Liu, M.; Chen, C.; Liao, H.; Zhang, Y.; Deng, S. (2020): A new approach to simulate coating thickness in cold spray. *Surface and Coatings Technology* 382, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125151>
- Xie, X.; Wang, Y. (2019): Research on Distribution Properties of Coating Film Thickness from Air Spraying Gun-Based on Numerical Simulation. *Coatings* 9(11), <https://doi.org/10.3390/coatings9110721>
- Yang, F.; Xue, X.; Cai, C.; Sun, Z.; Zhou, Q. (2018): Numerical Simulation and Analysis on Spray Drift Movement of Multi-rotor Plant Protection Unmanned Aerial Vehicle. *Energies* 11(9), <https://doi.org/10.3390/en11092399>
- Ye, Q.; Pulli, K. (2017): Numerical and Experimental Investigation on the Spray Coating Process Using a Pneumatic Atomizer: Influences of Operating Conditions and Target Geometries. *Coatings* 7(1), <https://doi.org/10.3390/coatings7010013>
- Ye, Q.; Shen, B.; Tiedje, O.; Bauernhansl, T.; Domnick, J. (2015): Numerical and Experimental Study of Spray Coating Using Air-Assisted High-Pressure Atomizers. *Atomization and Sprays* 25(8), pp. 643–656, <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2015010791>
- Zhang, B.; Tang, Q.; Chen, L.; Zhang, R.; Xu, M. (2018): Numerical simulation of spray drift and deposition from a crop spraying aircraft using a CFD approach. *Biosystems Engineering* 166, pp. 184–199, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.11.017>



## Autoren

**Dipl.-Ing. Lukas Poppa**

wissenschaftlicher Mitarbeiter<sup>1</sup>

E-Mail: l.poppa@tu-braunschweig.de

**M. Sc. Kerstin Palm**

ehem. wissenschaftliche Mitarbeiterin<sup>1</sup>

**Dr.-Ing. Florian Schramm**

ehem. wissenschaftlicher Mitarbeiter<sup>1</sup>

**Prof. Dr. Ludger Frerichs**

Institutsleiter<sup>1</sup>

**M. Sc. Magnus Tomforde**

wissenschaftlicher Mitarbeiter<sup>2</sup>

**M. Sc. Christoph Kämpfer**

wissenschaftlicher Mitarbeiter<sup>3</sup>

**Prof. Dr. Jens Karl Wegener**

Institutsleiter<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge,  
Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig

<sup>2</sup> Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz,  
Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig

<sup>3</sup> Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland,  
Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig

## Danksagungen

Die Autoren danken den Mitarbeitern des Julius Kühn-Instituts für die Unterstützung bei den Untersuchungen, sowohl durch ihre fachlich-theoretische Expertise als auch durch die Bereitstellung von Prüfständen und Messtechnik, und freuen sich auf eine weiterhin gute Zusammenarbeit.