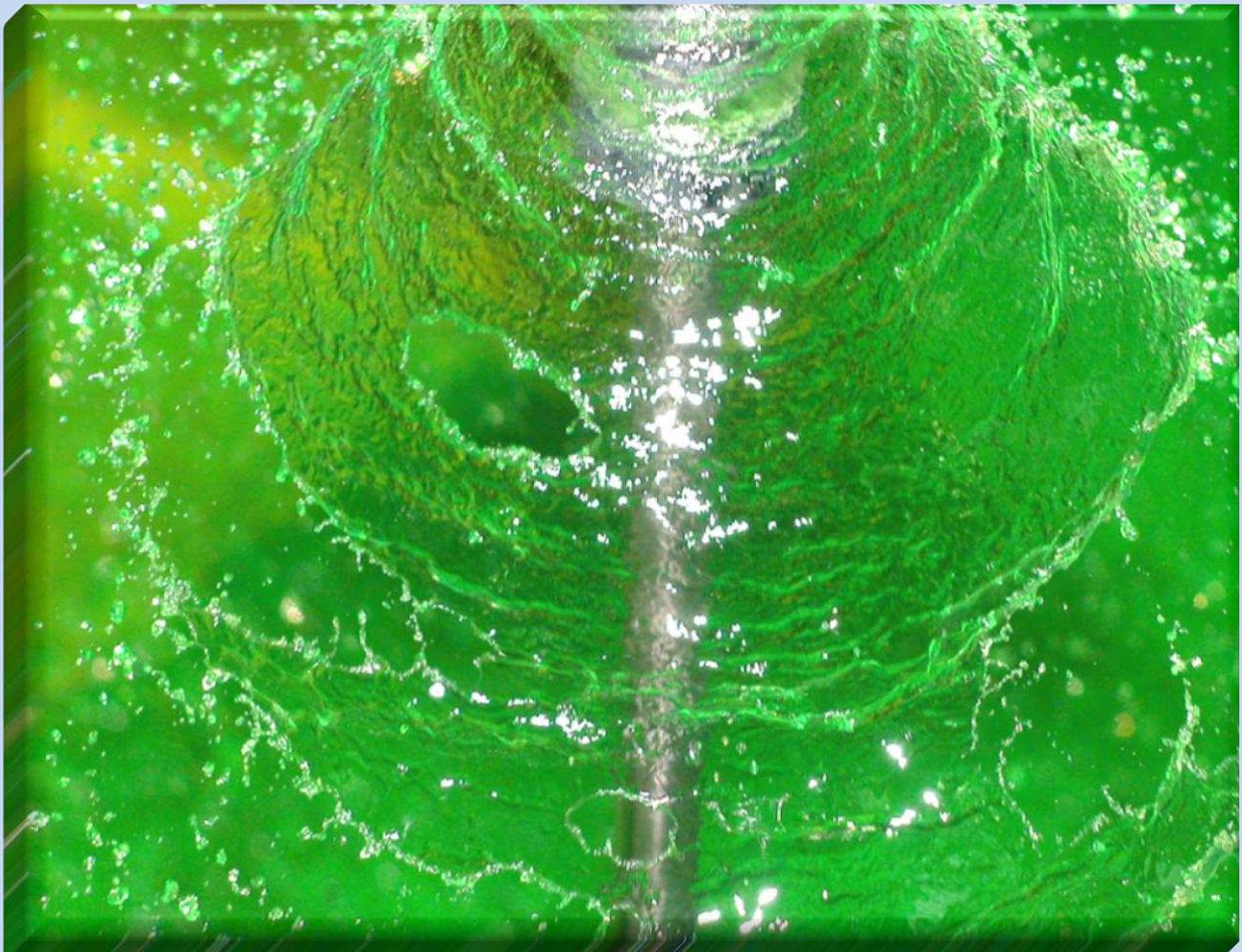


# IBR<sup>®</sup>

Zerstäubungstechnik GmbH

## Special: Einstoff-Druckdüsen in Theorie und Praxis



## 1. Vorwort

Eine vorgegebene Flüssigkeit ist zu einem Spray zu zerstäuben.

Dieses klingt zunächst sehr trivial und einfach.

Befasst man sich jedoch etwas eingehender mit der Aufgabenstellung oder hat bereits Versuche durchgeführt, welche nicht das gewünschte Ergebnis zeigten, wird rasch deutlich, dass komplexe und wechselwirkende Zusammenhänge eine Rolle spielen.

Nicht nur die Wahl des grundsätzlichen Düsen- beziehungsweise Zerstäubersystems ist von großer Bedeutung für den gesamten verfahrenstechnischen Prozess. Vielmehr sind die spezifische Vor- und Nachteile der verschiedenen Düsenausführungen gegeneinander abzuwägen.

Und von besonderer Bedeutung ist natürlich die Fragestellung, ob eine Zerstäubung mit der gewünschten

Düsentechologie überhaupt zu realisieren ist!

Zur Beantwortung dieser fundamental wichtigen Frage und der nachfolgend erforderlichen Auswahl sowie der Optimierung des geeigneten Zerstäubersystems ist es daher erforderlich, die physikalischen Grundlagen der Zerstäubungstechnik zu beherrschen.

Mit diesem Special möchten wir Ihnen einen ersten wissenschaftlich fundierten Überblick zu den Grundlagen der Zerstäubung mit Einstoff-Druckdüsen an die Hand geben. Nicht kompliziert sondern verständlich und in aufgelockerter Form. Dieses Special kann und soll auch ausdrücklich nicht eine umfassende Beratung zu speziellen Aufgabenstellungen ersetzen.

**Hierzu steht Ihnen das Team der IBR Zerstäubungstechnik GmbH selbstverständlich jederzeit gerne zur Verfügung!**

## 2. Kann das überhaupt funktionieren?

Eine erste, aber enorm wichtige Frage, die es gilt zu beantworten! Bereits die Vorstellung und Erfahrung lehrt, dass sich beispielsweise hochviskoser Honig mit geringem Differenzdruck durch eine einfache Düse nicht zu einem Spray zerstäuben lässt. Aber ist diese Aussage eigentlich richtig? Welche Rolle spielt genau genommen der Volumen- oder Massenstrom? Dieses triviale Beispiel zeigt bereits deutlich, dass offensichtlich eine ganze Reihe von Randbedingungen zu berücksichtigen sind, um eine reproduzierbare Aussage treffen zu können.

Hierzu ist es erforderlich, die relevanten Randbedingungen möglichst exakt zu definieren. Nur so kann eine verlässliche Abschätzung erfolgen, ob eine Zerstäubung mit Einstoff-Druckdüsen zur Lösung der Aufgabenstellung überhaupt in Betracht kommt.



- ? Kenne ich die Viskosität meiner Flüssigkeit?
- ? Zeigt meine Flüssigkeit ein newtonsches Fließverhalten?
- ? Sind Feststoffe oder Verunreinigungen in der Flüssigkeit vorhanden?
- ? Sind Daten für die Dichte und Oberflächenspannung bekannt?
- ? Welchen Volumen- bzw. Massenstrom muss ich zerstäuben?
- ? Welche Anforderungen habe ich an das Tropfengrößenspektrum?
- ? Was ist hinsichtlich des Sprayimpulses und der Spraykontur zu berücksichtigen?
- ? Wie integriere ich die Zerstäubungstechnik in meinen Prozess?



Glückstreffer kommen vor und das Problem lässt sich durch einen Versuch mit Standard-Düsen lösen. Das ist natürlich der Idealfall und auch der kostengünstigste Weg.

In der Praxis funktioniert dieses aber nicht immer. Dann kommt man um das Beantworten der gestellten Fragen nicht herum und muss individuelle Lösungen erarbeiten.

### 3. Der Volumenstrom als möglicher Schlüssel zur Lösung

Sie fragen jetzt vermutlich: Wieso, ich dachte die Viskosität spielt eine ganz wichtige Rolle? Sie haben auch grundsätzlich recht, aber wie wir noch sehen werden, darf man die Viskosität und den

Volumenstrom nicht getrennt voneinander betrachten.

Hierzu ein einfaches Beispiel.

Wasser, also ein nieder viskoses Fluid, soll aus einer Düsenbohrung mit einem Durchmesser von  $D=1$  mm zerstäubt werden. Der Volumenstrom sei 1 l/min. Die mittlere Austrittsgeschwindigkeit beträgt dann

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2} = 21,2 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right].$$

Die Reynoldszahl  $Re$  gibt an, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist. Rohrströmungen, als solche betrachten wir einmal etwas vereinfachend auch unsere Strömung in der Düsenmündung, werden ab einer  $Re$ -Zahl von mehr als 2330 turbulent.

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\eta} \Rightarrow \frac{21,2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1000}{1 \cdot 10^{-3}} = 21,2 \cdot 10^4 [-]$$

Turbulent, vermutlich ein Spray.

Jetzt nehmen wir anstelle von Wasser eine andere Flüssigkeit, welche eine Viskosität von zum Beispiel  $\eta = 0,5 \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$  aufweist. Die Dichte  $\rho$  soll sich nicht ändern.

$$\text{Re} = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\eta}$$

$$\Rightarrow \frac{21,2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1000}{500 \cdot 10^{-3}} = 42,4 \text{ [-]}$$

Die Strömung ist nun eindeutig laminar!

Hier ist kaum zu erwarten, dass wir ein Spray sehen. Hinzu kommt, dass wir den Differenzdruck  $\Delta p$  erhöhen müssen, um überhaupt noch unseren Volumenstrom zu erreichen. Die höhere Viskosität ist hierfür verantwortlich.

Vergrößern wir die Düsenmündung und damit den Volumenstrom (bei ansonsten gleichen Bedingungen), wird auch die Re-Zahl wieder größer und ein Spray kann auch beim höher viskosen Fluid erzielt werden.

Hieraus resultiert eine erste wichtige Erkenntnis.

Das Zerstäuben kleiner Volumenströme höher viskoser Flüssigkeiten bereitet mit einfachen Einstoff-Druckdüsen oftmals Probleme. Aber auch hier gibt es einige strömungs- und zerstäubungstechnische Möglichkeiten, um das Problem vielleicht doch noch zu lösen.



### Tipp:

Die Ausströmgeschwindigkeit und somit der Volumenstrom als Funktion des Differenzdruckes für **nieder viskose** Flüssigkeiten lassen sich gut abschätzen!

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

In der Praxis spielen noch weitere Einflussgrößen eine Rolle, um beurteilen zu können, ob es zu einer Zerstäubung kommt oder nicht.

Sind Einbauten in der Düse vorhanden, wie groß ist das Verhältnis zwischen Bohrungslänge und Durchmesser etc.? Dieses umfassender zu beantworten würde den Rahmen dieses Specials sprengen.

Im Anhang finden Sie einen Verweis auf Fachbücher. Diese beantworten natürlich auch andere Fragen in ausführlicher Art.

#### **4. Gleichgroße Tropfen, geht das überhaupt?**

In einigen verfahrenstechnischen Anwendungen ist es gewünscht, gleichgroße (monodisperse) Tropfen zu erzeugen. Auch dieses lässt sich unter bestimmten Umständen mit Düsen realisieren.

Im einfachsten Fall erzeugt man in zeitlichen Abständen einzelne Tropfen, welche sich von einer Düsenmündung lösen.

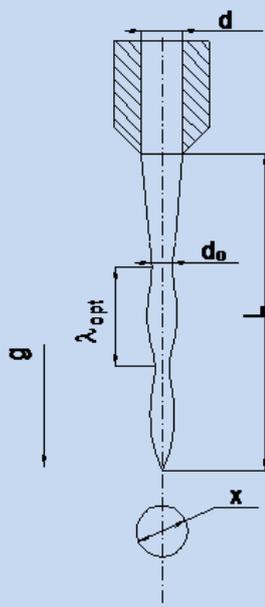
Tropfflaschen für Medikamente (Augentropfen) funktionieren nach diesem Prinzip. Die Flüssigkeit strömt mit sehr geringer Geschwindigkeit aus der Düse und bildet einen anhaftenden Tropfen, welcher sukzessive größer wird. Erreicht dieser eine kritische Größe, löst er sich von der Mündung ab.

Mit diesem „**Abtropfen**“ genannten Verfahren lassen sich jedoch nur relativ grobe Tropfen bei sehr geringen Volumenströmen erzeugen. Daher nutzt man dieses „Zerstäubungsverfahren“ in erster Linie für Dosieraufgaben.

Weitaus interessanter ist der sogenannte laminare Strahlzerfall, auch Rayleigh-Zerfall genannt.

Dieser tritt auf, wenn die Strömungsgeschwindigkeit so groß ist, dass das Gebiet des Abtropfens verlassen wird.

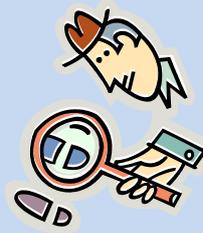
Es entsteht ein Flüssigkeitsstrahl, der zunächst im Nahbereich der Düsenmündung kompakt bleibt, dann unruhig wird und anschließend zu monodispersen Tropfen zerfällt. Das Prinzip ist schematisch hier dargestellt, [1].



Typische Gartenbrausen mit Lochblechen nutzen dieses Verfahren, um nahezu monodisperse Tropfen zu erzeugen und natürliche Regenereignisse abzubilden.

Beim Zerteilen nieder viskoser Flüssigkeiten entstehen Tropfendurchmesser in der Größe von

$$x \approx 1,89 \cdot d$$



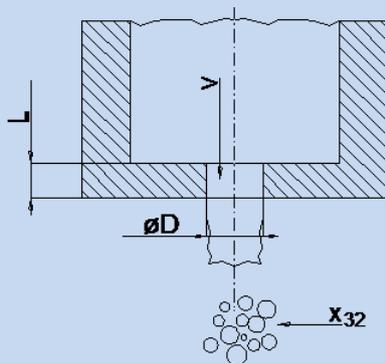
Auf den ersten Blick etwas ungewöhnlich! Je höher die Viskosität der Flüssigkeit ist, umso kleiner werden die Tropfen! Ursache hierfür ist die sogenannte Strahlversteckung.

Die Erdbeschleunigung  $g$  führt zur erhöhten Geschwindigkeit des Strahls. Hieraus resultiert, dass er aus Gründen der Kontinuität dünner wird. Ein kleiner Strahldurchmesser am Ort des Zerfalls führt somit zu kleineren Tropfendurchmessern.

Der laminare Strahlzerfall wird unter anderem industriell eingesetzt, um nahezu monodisperse Feststoffpartikeln herzustellen. Ebenso zur gleichförmigen Beaufschlagung von Oberflächen eignet sich dieses Verfahren.

## 5. Hier wird es turbulent

Das typische Zerstäuben von Flüssigkeiten findet statt, wenn in Abhängigkeit der relevanten Einflussgrößen eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit überschritten wird. Resultat ist ein Spray, welches verschiedene Tropfendurchmesser aufweist. Im einfachsten Fall sieht eine Einstoff-Druckdüse so aus:



Konstruktiv sehr einfach, strömungs- und zerstäubungstechnisch jedoch schon recht komplex. So existieren bis heute keine allgemeingültigen Rechenvorschriften, um die Sprayeigenschaften und Tropfengrößen verlässlich zu berechnen. Hinzu kommt, dass man es nun mit einer Tropfengrößen-

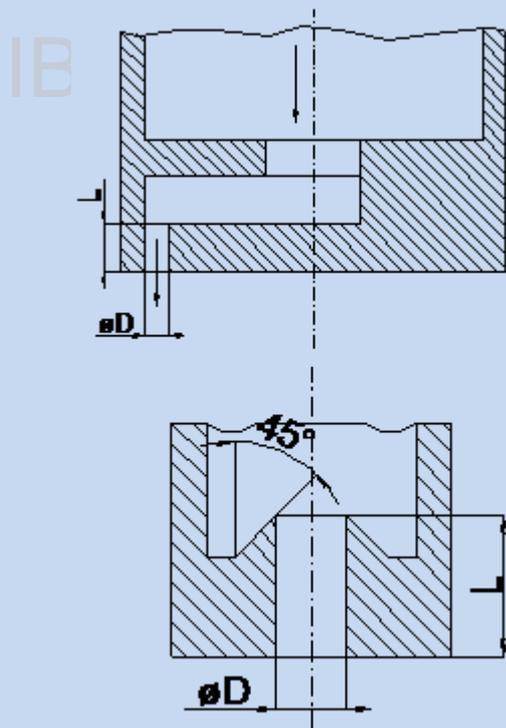
Verteilung zu tun hat. Das wiederum bedeutet, dass sowohl feinere als auch gröbere Tropfen im Spray vorhanden sind.

Es hat sich in der Zerstäubungs- und Verfahrenstechnik bewährt, charakteristische Tropfendurchmesser wie beispielsweise den mittleren- oder Sauterdurchmesser zu verwenden. Dieses ist sicherlich praktikabel, aber leider auch sehr problematisch! Man erhält keinerlei Informationen über die realen Eigenschaften des Sprühs, also über den Anteil an groben und feinen Tropfen. Wir raten dazu, im Bedarfsfall Messungen des vollständigen Tropfengrößenspektrums durchzuführen.

Eine grobe Abschätzung des Sauterdurchmessers kann nach [2] erfolgen,

$$\frac{x_{32}}{D} = \frac{47}{v} \cdot \left( \frac{\sigma}{\rho_G} \right)^{0,25} \cdot (1 + 331 \cdot Oh)$$

Einbauten und Strömungsumlenkungen in Düsen unterstützen das Aufbrechen des austretenden Flüssigkeitsstrahls und somit das Entstehen von Tropfen. Mögliche konstruktive Ausgestaltungen zeigen die folgenden Abbildungen. Dargestellt ist eine „Kniedüse“ mit Querschnittsänderungen und Umlenkungen sowie eine Bordamündung zum Erzeugen von Rezirkulationsgebieten.



Änderungen an der Düsengeometrie und den Betriebsbedingungen führen natürlich jeweils zu veränderten Sprayeigenschaften!

Daher raten wir grundsätzlich dazu, Düsen- und Zerstäubungssysteme für spezielle Anwendungen individuell auszulegen und den jeweiligen vollständigen Randbedingungen anzupassen! Hierzu zählt natürlich auch das Ermitteln der vollständigen Tropfengrößenspektren!

## 6. Der Umweg: Die Lamelle als möglicher Retter aus der Not

Stellt sich bei der Analyse der Aufgabenstellung heraus, dass Strahl bildende Einstoff-Druckdüsen nicht geeignet sind, gibt es vielleicht doch noch eine Möglichkeit zur Lösung des Problems. Wir gehen einen 'Umweg'.

Entweder formen wir aus dem Strahl eine Flüssigkeitslamelle oder erzeugen diese durch geeignete Düsen direkt.

Hierzu ein einfaches Experiment.  
Halten Sie einen Löffel unter den  
laufenden Wasserhahn.

**Achtung:** Sie und Ihre Küche oder  
das Badezimmer werden nass!

Sie stellen aber Folgendes fest.  
Aus dem kompakten Strahl wird  
eine dünne Flüssigkeitslamelle und  
aus dieser bilden sich in einer ge-  
wissen Entfernung relativ feine  
Tropfen. Der Strahl hingegen wür-  
de sehr lange kompakt bleiben.



Hieraus resultiert  
eine erste wichtige  
Erkenntnis! Versa-  
gen Strahl bildende  
Düsen, kommen ge-

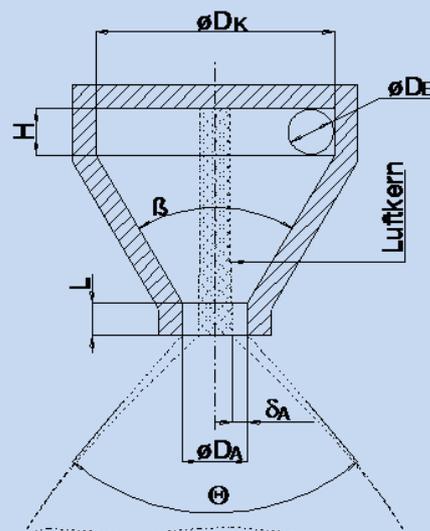
gebenenfalls die Lamellen bildende  
Zerstäuber in Betracht.

Achten Sie in der Waschstraße für  
Ihren PKW einmal darauf, welche  
Düsentypen das Fahrzeug besprü-  
hen. Sie werden vermutlich eine  
Flachstrahldüse entdecken. Es  
geht ja schließlich darum, Ihren

PKW vor der mechanischen Reini-  
gung durch Bürsten oder Lappen  
hinreichend zu benetzen und keine  
Beulen durch Wasserstrahlen im  
Blech zu erzeugen.

Die Kegel-Düse erzeugt eine der-  
artige Flüssigkeitslamelle. Der  
Sprühwinkel kann zudem leicht  
eingestellt werden.

Aus praktischen Gründen kommt  
oftmals die Hohlkegel-Druckdüse,  
kurz HKD genannt, zum Einsatz.  
Besonders häufig die sogenannte  
Tangential-HKD.



Eine HKD kann natürlich einen oder mehrere tangentielle Eintrittsöffnungen aufweisen!



**Tipp:**

Beobachten Sie einmal Ihre Sprühfläche, welche Sie zum Besprühen Ihrer Pflanzen benutzen. Wenn Sie genau hinsehen stellen Sie fest, dass ein Lamelle ausgebildet wird. In den Sprühköpfen befinden sich fast ausschließlich Tangential-HKD!

Das Auslegen und Berechnen von HKD ist leider nicht trivial. Geschuldet ist dieses den komplizierten Zusammenhängen zwischen dem Strömungsfeld in der Düse und dem Zerfall der Lamelle zu Tropfen.

Bereits die Berechnung des Volumenstroms gestaltet sich etwas aufwendiger. Wir möchten Sie nicht erschrecken, daher nur zur

Betrachtung des formalen Zusammenhanges nach [3]:

$$\dot{V} = u \cdot \left[ 1 - 0,638 \cdot \left( \frac{D_E}{D_A} \right)^{-1,83} \cdot \left( \frac{D_K}{D_A} \right)^{1,71} \cdot Re_p^{-0,34} \right] \cdot \pi \cdot (D_A \cdot \delta_A - \delta_A^2) \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Auf die Darstellung und Erläuterungen der einzelnen Größen verzichten wir an dieser Stelle. Eine detaillierte Erläuterung findet sich in unserer Fachliteratur [1].



**Gefahr!**

Besonders die

Tangential-HKD weist eine Besonderheit auf!

**HKD-Paradoxon!**

Im Gegensatz zu allen anderen Einstoff-Druckdüsen nimmt zunächst bei identischen Betriebsbedingungen der Volumenstrom mit steigender Viskosität ab bzw. nimmt mit sinkender Viskosität zu! Vorsicht beim Vorwärmen von Öl in Brenneranlagen!

Zwar verfeinert sich das Tropfengrößenspektrum beim Vorwärmen des Öls, -niedrigere Viskosität, kleinere Tropfen, tendenziell besser für die Verbrennung-, der Volumenstrom nimmt aber je nach Düsengeometrie deutlich ab!



## 7. Fazit

Der Einsatz von speziellen Einstoff-Druckdüsen in verfahrenstechnischen Anwendungen ist selbstverständlich sinnvoll und zielführend.

Die Wahl des geeigneten Düsen- und Zerstäubersystems ist an eine Reihe technischer Vorgaben geknüpft.

Dieses betrifft selbstverständlich auch die optimale Integration des Düsensystems in die gesamte verfahrenstechnische Anwendung.

Hierunter ist nicht nur die Beurteilung und Beschaffung der erforderlichen Peripherie zu verstehen, sondern auch die sachverständige Analyse der Aufgabenstellung im Kontext mit anstehenden Verfahrensentwicklung oder Produktions-erweiterungen!

Eine Düse oder ein Zerstäuber stellt im gesamten verfahrenstechnischen Prozess oftmals nur ein nahezu verschwindend kleines Bauteil dar; von den Investitionskosten einmal ganz abgesehen.

Leider stellen wir fest, dass innovative häufig Projekte scheitern, weil die ursprünglich angedachte Düsentechnologie nicht geeignet ist.

**Und genau hier setzen wir an!**

## 8. In eigener Sache: Unser Dienstleistungsangebot und unsere Kompetenzen

Die IBR Zerstäubungstechnik GmbH versteht sich in erster Linie als Engineering-Unternehmen, welches primär keine eigenen Interessen daran hat, Düsen und Zerstäuber in größeren Stückzahlen zu verkaufen. Dieses bedeutet natürlich nicht, dass wir Ihnen auch auf Wunsch Standard-Düsen beschaffen. Nur zählt dieses nicht zu unserem Kerngeschäft.

Vielmehr bieten wir im Sinne einer umfassenden und wissenschaftlich fundierten Dienstleistung die Begleitung Ihres Projektes von der Idee-Findung bis hin zur technischen Realisierung an.

Dank des etablierten und bewährten langjährigen Netzwerkes zu Experten und Spezialisten aus verschiedenen ingenieurwissen-

schaftlichen Disziplinen sind wir in der Lage, komplexe Fragestellungen effizient und somit kostengünstig zu lösen.

Sehr hilfreich in diesem Zusammenhang, dass einige Mitarbeiter der IBR Zerstäubungstechnik GmbH zudem an Universitäten und Fachhochschulen als Professor und Dozent tätig sind. Eben Wissen und Know-how aus erster Hand.

Ferner verfügen wir über modernste Verfahren zur laseroptischen Messung von Sprayeigenschaften in eigenen Laboratorien.

**All-Inclusive in der Düsen- und Zerstäubungstechnik, der Strömungsmechanik und der perfekten Integration in Ihren Prozess!**

Anhang:

## Literaturhinweise:



- [1] Richter, Th.: Zerstäuben von Flüssigkeiten, -Düsen und Zerstäuber in Theorie und Praxis-. expert-Verlag, ISBN-13: 978-3-8169-2815-7. Dritte Auflage in Druck.
- [2] Tanasawa, Y., Toyoda, S.: On the Atomization of a Liquid Jet Issuing from a Cylindrical Nozzle. Tech. Report of Tohoku University No. 19-2, p. 135, 1955
- [3] Richter, T., Walzel, P.: Atomization of Newtonian Fluids with Hollow Cone Nozzles. Proc. 5th. Annual Conf. On Liquid Atomization and Spray Systems, Univ. Bremen, pp. III.-6, 1989

Weiterer Hinweis,

Buch von Prof. Dr. Wozniak:



Wozniak, G.: Zerstäubungstechnik: Prinzipien, Verfahren, Geräte,  
Verlag Springer,  
ISBN-10: 9783540411703

## Wichtige Hinweise zum Copyright und der Verwendung dieses Dokumentes

© Copyright Juli 2011

IBR® Zerstäubungstechnik GmbH  
Auf der Horst 10  
D-48147 Münster  
[info@duesen.biz](mailto:info@duesen.biz)  
[www.duesen.biz](http://www.duesen.biz)

Die verwendeten technischen Abbildungen stammen aus dem Fachbuch gemäß Quelle [1].

Lizenzierung Titelbild siehe:

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.de>

Das Copyright der Buchabbildungen liegen beim Verlag „expert-Verlag“ und dem „Verlag Springer“.

Die IBR® Zerstäubungstechnik GmbH gestattet ausdrücklich eine Verlinkung auf diesen Fachbeitrag unter folgenden Bedingungen:

- Für die nicht-kommerzielle Verwendung: Privat-Personen, Hochschulen und öffentliche Forschungseinrichtungen dürfen ohne Rückfrage Internet-Links zu diesem Special der IBR Zerstäubungstechnik in ihren Websites setzen. Die Quelle dieser Information ist hierbei deutlich zu machen. Änderungen, Ergänzungen und/oder das Entfernen der Copyright Vermerkes ist nicht gestattet.
- Für die kommerzielle Verwendung: Die Verwendung von Texten und Abbildungen, auch in Teilen, sowie das Verlinken auf die URL ist nur nach vorhergehender Einverständniserklärung der IBR Zerstäubungstechnik GmbH gestattet.

Irrtümer und Fehler vorbehalten. Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

**Impressum :**

IBR® Zerstäubungstechnik GmbH  
Auf der Horst 10  
D-45721 Münster

Tel.: +49 (0) 251 – 2 87 99 53 -0

[www.duesen.biz](http://www.duesen.biz)

[info@duesen.biz](mailto:info@duesen.biz)

Rechtsregister :

Münster

HRB 12937

Ust-IdNr.: DE813432012

Geschäftsführer:

Dipl. Ing. Thomas Richter

Kontakt:

Wie oben angegeben

IBR® Zerstäubungstechnik GmbH  
ist eingetragenes und geschütztes  
Markenzeichen der IBR Zerstäubungstechnik GmbH,  
Deutschland

IBR Zerstäubungstechnik GmbH