



Optimized cyclones
in a test facility
Optimierte Zyklone
in einer Testanlage

Hurricane® and ReCyclone® systems for emission control and value added product recovery

Júlio Paiva¹, Romualdo Salcedo^{1,2}

¹ Advanced Cyclone Systems, SA., Porto/Portugal, www.acsystems.pt; ² LEPAE, Laboratory for Process, Environmental and Energy Engineering, Faculty of Engineering of the University of Porto, Porto/Portugal

Summary: The development of the high-efficiency Hurricane® and ReCyclone® systems allows their application either for emission control or value-added product recovery. The purpose of this paper is to present not only the performance of these systems, but also a model to predict in a more realistic way the collection efficiency of a gas cyclone with or without partial recirculation. Some experimental results obtained in emission control and value-added product recovery are also presented, together with the corresponding predictions on grade and global collection efficiencies.

Hurricane® und ReCyclone® Anlagen zur Emissionskontrolle und Wertstoffrückgewinnung

Zusammenfassung: Die Entwicklung der Hochleistungsanlagen Hurricane® und ReCyclone® gestattet deren Einsatz in der Emissionsminderung oder Wertstoffrückgewinnung. Im nachfolgenden Beitrag wird nicht nur die Leistungsfähigkeit dieser Anlagen dargelegt, sondern auch ein Modell vorgestellt zur realistischeren Vorhersage der Abscheideleistung eines Gaszyklons mit oder ohne Teilrückführung. Darüber hinaus werden einige experimentelle Ergebnisse der Emissionsminderung und Rückgewinnung von Wertstoffen zusammen mit den entsprechenden Vorhersagen zum gestaffelten und pauschalen Abscheidegrad aufgeführt.

Hurricane® et système ReCyclone® pour contrôle des émissions et pour récupération de produits valables

Résumé: Le développement des installations de haute performance Hurricane® et ReCyclone® permet leur emploi pour la réduction des émissions ou la récupération des matières valorisables. Cet article ne présente pas seulement les performances de ces installations, mais également un modèle de prévision plus réaliste du rendement d'extraction d'un cyclone à gaz avec ou sans recyclage partiel. Des résultats expérimentaux sur la réduction des émissions et la récupération des matières valorisables sont également présentés dans cet article conjointement avec les prévisions correspondantes relatives au rendement d'extraction échelonné et forfaitaire.

Hurricane® y sistema ReCyclone® para el control de las emisiones y para la recuperación de productos con valor añadido

Resumen: El desarrollo de los sistemas de alto rendimiento Hurricane® y ReCyclone® permite su aplicación en el control de emisiones o en la recuperación de producto con valor añadido. El objetivo de este artículo es presentar el rendimiento de estos sistemas y un modelo para predecir de forma más realista la eficiencia en la recolección de un ciclón de gas con o sin recirculación parcial. También se presentan algunos resultados experimentales obtenidos en el control de emisiones y la recuperación de material, junto con las predicciones del grado de separación gradual y global.

1 Introduction

Cyclones are gas-solid separation devices used in a wide variety of industries, mainly for the recovery of raw or process materials, as collectors for compliance with particulate emission limits, and as primary collectors to decrease the burden on more expensive secondary collectors. Cyclones are essentially attractive for operation at high temperatures and/or pressure, and the development of highly efficient cyclones, especially for fine particles below 2–3 μm in diameter, could have a significant impact in the chemical processing industries.

Based on a numerically optimized cyclone geometry (referred to as Hurricane[®]) [1–4], partial recirculation of gases to the cyclone has been adapted [5, 6] to further improve system performance. Taking into account the three major options available to build such a system, Wysk et al. [7] have built a straight-through gas cyclone placed upstream of the reverse gas cyclone. Furthermore Salcedo et al. [5] have shown that by placing the reverse-flow cyclone (collector) upstream of the concentrator, higher efficiencies could be obtained. These types of systems have very high collection efficiencies at laboratory, pilot and industrial scales (the systems are referred to as ReCyclone[®] MH). These authors have also proposed a model to predict the overall collection efficiency of this system, derived from the Mothes and Löffler model [8] to predict isolated gas cyclone collection efficiency.

Finally, the inclusion of an electrostatic field in the recirculation system will increase the amount of recirculated particles and consequently the global efficiency. Combining all these steps, the Recyclone[®] EH was developed and has been proven to be a good alternative to filters and electrostatic precipitators, achieving, at moderate loads, very high collection efficiency even for submicrometric particles.

Previous work [1, 4–6, 9–13] has shown at laboratory, pilot and industrial scales that these systems can have much higher collection efficiency for fine particles (below about 3 μm) than predicted by classical models, viz. grade efficiency curves show a minimum in collection at an intermediate particle size (ranging from about 0.8–2 μm). In spite of these hook-like curves not always occurring [5, 12], this abnormal behaviour for fine particles is attributed to agglomeration within the cyclone turbulent flow field, as initially postulated by Mothes and Löffler [14], much as it happens in recirculating fluidized beds [15, 16].

This phenomenon inside the isolated gas cyclone has been studied by Paiva et al. [17], culminating in the PACyc model. This model considers that on collision/agglomeration of fine particles with larger ones, the smaller particles will be captured as much larger particles, viz. with much higher collection efficiency than that predicted by any of the currently available models. This agglomeration effect is even more noticeable if the cyclone is highly efficient above about 2–3 μm , i.e., above 90–95 % collection, as it indeed happens with numerically optimized cyclones [1, 3, 4], and especially with recirculation systems – with or without an electric field [5, 6].

2 Modelling

Fig. 1 presents the system studied in this work, composed of a numerically optimized reverse-flow gas-cyclone and a straight-through cyclone (referred to here as the concentrator). To use the PACyc model to predict the collection efficiency of the system with partial recirculation, it is not only necessary to know

1 Einleitung

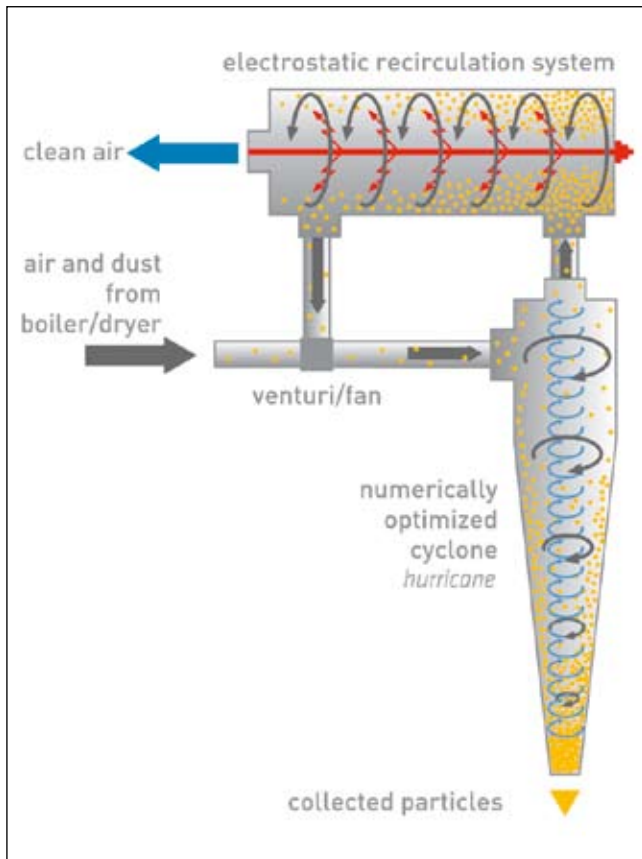
Zyklone sind Geräte zur Gas-Feststoff-Trennung, die in einer großen Anzahl von Industriezweigen eingesetzt werden. Sie werden hauptsächlich für die Rückgewinnung von Rohstoffen oder Prozessmaterial, als Abscheider zur Einhaltung von Grenzwerten bei der Teilchenemission und als Vorabscheider zur Minderung der Belastung der teureren Nachabscheider eingesetzt. Zyklone sind besonders attraktiv für den Betrieb mit hohen Temperaturen und/oder Drücken. Die Entwicklung von Hochleistungszyklonen, speziell für feine Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 2–3 μm , könnte sich als besonders wertvoll für die chemische Verarbeitungsindustrie erweisen.

Zur weiteren Erhöhung der Anlagenleistung mit Hilfe einer numerisch optimierten Zyklongeometrie (als Hurricane[®] bezeichnet) [1–4] wurde eine teilweise Rückführung von Gasen zum Zyklon vorgenommen [5, 6]. Unter Berücksichtigung der drei Hauptoptionen, die für eine solche Anlage zur Verfügung stehen, haben Wysk et al. [7] einen Durchgangszyklon entwickelt, der dem Gegenstromzyklon vorgeschaltet ist. Darüber hinaus haben Salcedo et al. [5] gezeigt, dass durch die Anordnung des Gegenstromzyklons (Abscheiders) vor dem Konzentrator eine höhere Leistungsfähigkeit erzielt werden kann. Mit diesen Anlagen, die als ReCyclone[®] MH bezeichnet werden, wurde ein sehr hoher Abscheidegrad im Labor, in Pilotanlagen und in der Industrie erreicht. Zusätzlich haben die genannten Autoren ein Modell zur Vorhersage des Gesamtabseidegrads der Anlage vorgeschlagen, welches von dem Modell von Mothes und Löffler [8] zur Vorhersage des Abscheidegrads abgeschlossener Gaszyklone abgeleitet wurde.

Schließlich wird die Anordnung eines elektrostatischen Felds im Rückführungssystem die Menge von zurückgeführten Teilchen, und damit auch die gesamte Leistungsfähigkeit, erhöhen. Der Recyclone[®] EH wurde aus einer Kombination all dieser Schritte entwickelt, und er hat sich als gute Alternative zu Filtern und E-Filtern erwiesen. Mit ihm werden bei einer moderaten Belastung sehr hohe Abscheidegrade sogar bei Teilchen im Submikrometerbereich erreicht.

Vorangegangene Arbeiten [1, 4–6, 9–13] haben gezeigt, dass diese Anlagen im Labor, in Pilotanlagen und in der Industrie eine viel höhere Abscheidung feiner Teilchen (kleiner als ca. 3 μm) erreichen können, als mit klassischen Modellen vorhergesagt wird, denn die Trenngradkurven zeigen ein Minimum an Abscheidung bei Zwischenteilchengrößen (von etwa 0,8–2 μm). Obwohl diese hakenartigen Kurven nicht immer anzutreffen sind [5, 12], wird das abnormale Verhalten bei feinen Teilchen der Agglomeration im Wirbelströmungsfeld des Zyklons zugeschrieben, wie es zuerst von Mothes und Löffler [14] postuliert wurde, und wie es häufig in umlaufenden Fließbetten anzutreffen ist [15, 16].

Diese Erscheinung innerhalb eines abgeschlossenen Gaszyklons wurde von Paiva et al. [17] untersucht, was schließlich zum Modell PACyc führte. Dieses Modell berücksichtigt, dass nach der Kollision/Agglomeration feiner Teilchen mit größeren Teilchen, die kleineren Teilchen als viel größere eingefangen werden und damit ein viel höherer Abscheidegrad vorliegt, als durch die derzeit verfügbaren Modelle vorhergesagt wird. Der Agglomerationseffekt ist noch auffälliger, wenn der Zyklon besonders leistungstark im Bereich über ca. 2–3 μm ist, d.h. eine Abscheidung



1 System studied in this work
Die für diese Arbeit untersuchte Anlage

the geometrical parameters of the system but also the operating conditions and several simulation parameters. To predict the efficiency for each system, several models are used.

2.1 Estimating the efficiency of reverse flow cyclones

There are several models available to predict the collection efficiency in reverse flow gas-cyclones. As mentioned earlier, previous work [9, 18, 19] has shown that the Mothes and Löffler model [8] gives, on average, the best agreement with available data. Thus, this model was retained as the model used to predict grade efficiency in isolated cyclones, in the absence of particle collision/agglomeration. In order to determine the collection efficiency, a mass balance is established between the region of escaping particles (upstream flow) and the entry area.

2.2 Straight-through cyclone (concentrator)

In order to predict the behaviour of the system with recirculation, the model developed by Salcedo et al. [5] is considered. The main hypotheses assumed are adapted from the Mothes and Löffler [8] model, considering also that the processed particle size distribution (PSD) is updated in an interactive procedure, until the change in the particle size distribution is less than a specified error. This process is shown in Fig. 2. Finally, and similarly to isolated cyclones, in order to determine the collection efficiency of a system with recirculation, a mass balance is established between the inlet and outlet of the recirculator.

2.3 Particle charging and collection in electric fields

Concerning this subject, several authors have proposed different approaches to this matter, but the combination of classical models [20–22] leads to a good enough approximation of the reality

von mehr als 90–95 % hat, wie es tatsächlich bei numerisch optimierten Zyklonen der Fall ist [1, 3, 4] sowie besonders bei Anlagen mit Rückführung mit oder ohne ein elektrisches Feld [5, 6].

2 Modellierung

Bild 1 zeigt die für diese Arbeit untersuchte Anlage, die aus einem numerisch optimierten Gegenstromgaszyklon und einem Durchgangszyklon (hier als Konzentrator bezeichnet) besteht. Um das Modell PACyc zur Vorhersage des Abscheidegrads der Anlage mit teilweiser Rückführung einzusetzen, ist es nicht nur erforderlich, die geometrischen Parameter der Anlage zu kennen, sondern auch die Betriebsbedingungen sowie verschiedene Simulationsparameter. Zur Vorhersage einer jeden Anlageneistung werden verschiedene Modelle eingesetzt.

2.1 Einschätzung der Leistungsfähigkeit von Gegenstromzyklonen

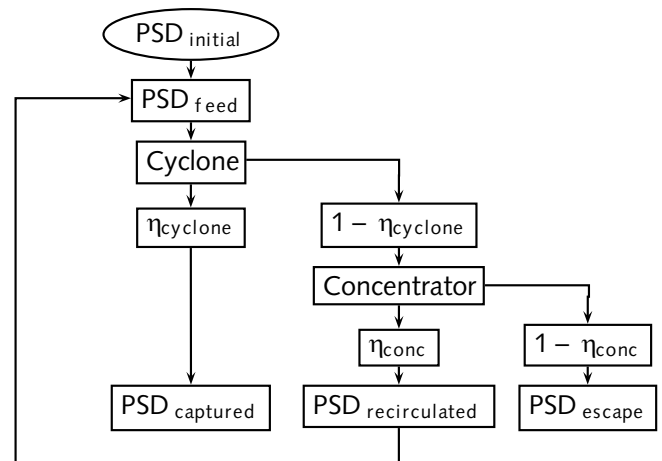
Es gibt verschiedene Modelle zur Vorhersage des Abscheidegrads in Gegenstromgaszyklonen. Wie bereits erwähnt, zeigen vorangegangene Arbeiten [9, 18, 19], dass das Modell von Mothes und Löffler [8] im Durchschnitt die beste Übereinstimmung mit verfügbaren Daten aufweist. Daher wurde dieses Modell zur Vorhersage der Klassierleistung in abgeschlossenen Zyklonen verwendet, wenn keine Teilchenkollision bzw. -agglomeration stattfindet. Um den Abscheidegrad zu bestimmen, wird eine Massenbilanz zwischen dem Bereich der austretenden Teilchen (Aufwärtsstrom) und dem Eintrittsbereich aufgestellt.

2.2 Durchgangszyklon (Konzentrator)

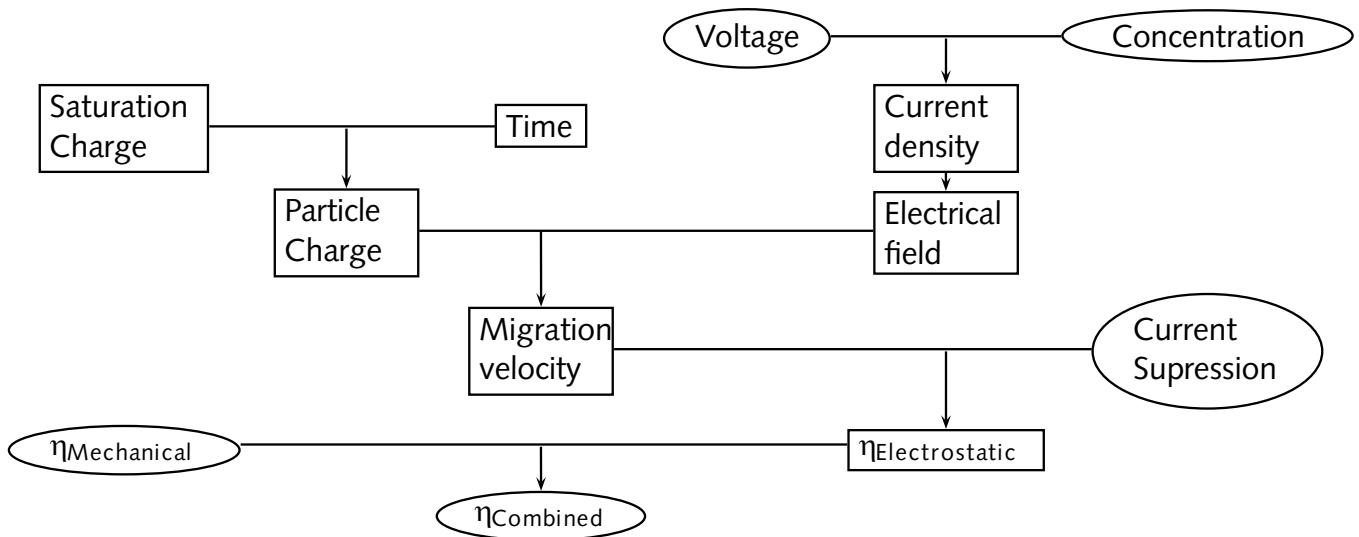
Um das Verhalten der Anlage mit Rückführung vorherzusagen, wurde das von Salcedo et al. [5] entwickelte Modell berücksichtigt. Die angenommenen Haupthypothesen wurden von Mothes und Löffler [8] übernommen, wobei auch berücksichtigt wurde, dass die Teilchengrößenverteilung bei einem interaktiven Verfahren aktualisiert wird, bis die Veränderung der Teilchengrößenverteilung geringer ist als ein spezifizierter Fehler. Dieser Prozess wird in Bild 2 dargestellt. Schließlich wird, ähnlich wie bei abgeschlossenen Zyklonen, eine Massenbilanz zwischen Einlauf und Auslauf des Umwälzlers aufgestellt.

2.3 Teilchenaufladung und -abscheidung in elektrischen Feldern

Zu diesem Thema haben verschiedene Autoren unterschiedliche Methoden vorgeschlagen, aber die Kombination klas-



2 Iterative process concerning the processed particle size distribution
Iterativer Prozess der Korngrößenverteilung



3 Information flow diagram to illustrate the internal operations of the electrical model
Informatives Flussdiagramm zur Illustration der internen Abläufe des elektrischen Modells

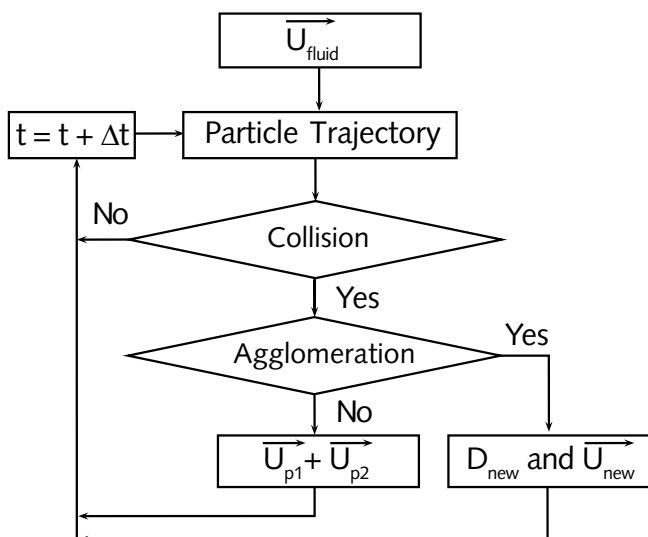
occurring in the electrostatic recirculator. **Fig. 3** is a visual representation of the major steps involved in this procedure, where the circles stand for input/output to/from the model, while the boxes stand for mathematical operations.

2.4 Interparticle agglomeration highlights

The agglomeration effect taken into account in PACyc [17] is based on the Sommerfeld model [15, 23] of particle agglomeration in turbulent flows. The intrinsic procedures of the PACyc model are shown in **Fig. 4**. The model starts by calculating the fluid velocity in the control volume, and next the trajectories of each individual particle injected in this control volume. Using a probabilistic criterion, the model defines if particles collide, and in case of collision, using an energetic criterion it defines if the collision results in agglomeration.

2.5 Model integration

In order to easily understand integration of the various models, **Fig. 5** shows a simple representative outline of the connections



4 Representation of the interparticle agglomeration model
Darstellung des Modells zur Teilchenagglomeration

sischer Modelle [20–22] führt zu einer genügend guten Annäherung an die Realität, wie sie in einem elektrostatischen Umwälzer zu finden ist. **Bild 3** zeigt die wesentlichen Schritte bei diesem Verfahren. Dabei bedeuten die Kreise den Eingang zum bzw. den Austritt vom Modell, während die Kästen für mathematische Operationen stehen.

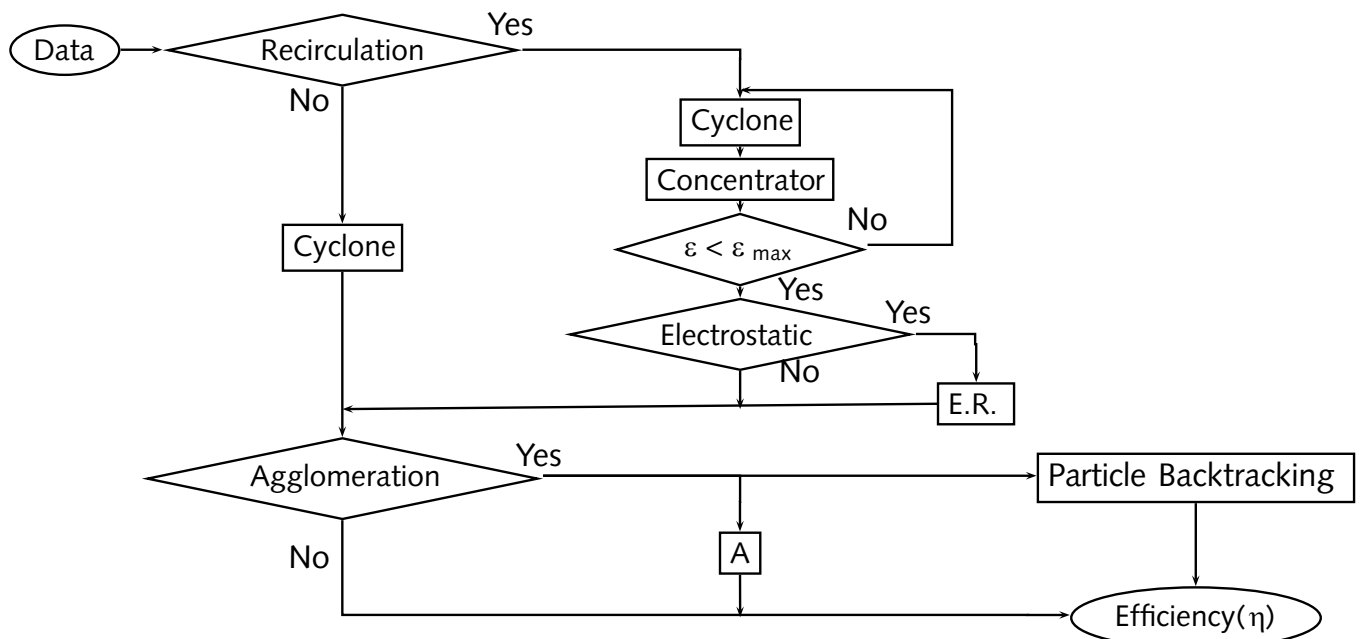
2.4 Zur Agglomeration von Teilchen

Der im PACyc [17] berücksichtigte Agglomerationseffekt basiert auf dem Modell von Sommerfeld [15, 23] zur Teilchenagglomeration in Wirbelströmungen. Die wesentlichen Abläufe des PACyc-Modells werden in **Bild 4** gezeigt. Das Modell beginnt mit der Berechnung der Fließgeschwindigkeit im Kontrollvolumen nahe der Bewegungsbahnen eines jeden einzelnen Teilchens, das in dieses Kontrollvolumen injiziert wird. Mit Hilfe eines Wahrscheinlichkeitskriteriums definiert das Modell, ob Teilchen kollidieren, und wenn ja, definiert es mit Hilfe eines energetischen Kriteriums, ob die Kollision zu einer Agglomeration führt.

2.5 Modellintegration

Zum besseren Verständnis der Integration der einzelnen Modelle zeigt **Bild 5** eine einfache, repräsentative Darstellung der Verbindung der wesentlichen Bestandteile des PACyc zu Anlagen mit Rückführung, wie sie in dieser Arbeit untersucht werden. Es sind vier unterschiedliche Entscheidungszonen zu sehen (durch Rauten gekennzeichnet), und jedes der Gesamtverfahren wird in den Rechtecken assembliert. Bei dieser Konfiguration kann man Folgendes erhalten: den Zyklon, den Zyklon mit Rückführung (mit oder ohne elektrisches Feld), und in allen Fällen ist es möglich, die Teilchenagglomeration zu berücksichtigen oder zu vernachlässigen.

Es ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass PACyc mehr ist als eine Modellintegration, denn PACyc kann die Trenngradkurven der einzelnen Anlagenkonfigurationen wiederherstellen unter Berücksichtigung der Teilchenagglomeration und der entsprechenden Rückverfolgung zu den ursprünglich injizierten Teilchen (Wiederherstellung des Ablaufs). Paiva et al. [17] behandeln dieses Thema ausführlich bei Fällen mit abgeschlossenen Zyklonen.



5 Representation of the integration of different models • Darstellung der Integration unterschiedlicher Modelle

between the major constituents of PACyc applied to systems with recirculation, as presented in this work. It is possible to see four different decision zones (marked by diamonds) and each of the global procedures is assembled in the rectangles. With this configuration, it is possible to obtain: cyclone, cyclone with recirculation (with or without electric field) and in all cases, it is possible to consider or neglect particle agglomeration.

However, it is important to mention that PACyc is more than a model integration, since PACyc can rebuild the grade efficiency curves of the several systems configurations, considering particle agglomeration and respective backtracking to the originally injected particles (history rebuild). This aspect is discussed extensively for cases with isolated cyclones in Paiva et al. [17].

3 Experimental results and model prediction

In this section four case studies are presented, one for emissions control from a vertical lime furnace for cement production. For the first two cases, a pilot-scale numerically optimized cyclone [19, 20] with internal diameter of 450 mm without partial recirculation of gases and particles is used. For the third case (experimental with mechanical recirculation), a similar cyclone was fitted to a concentrator of the same diameter at the industrial site, and particles were fed directly from the industrial process. For the last case (with electrically enhanced separation in the concentrator), a set of cyclones with internal diameter of 1850 mm and concentrators of 800 mm was simulated by PACyc. For a more direct and valid comparison, in all cases, the cyclone inlet mean velocity was $\approx 15\text{--}20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Finally, as a reference, the experimental grade-efficiency curves were obtained with simultaneous inlet/outlet isokinetic sampling using constant volume samplers (Techora Bravo), in GFA glass fiber filters.

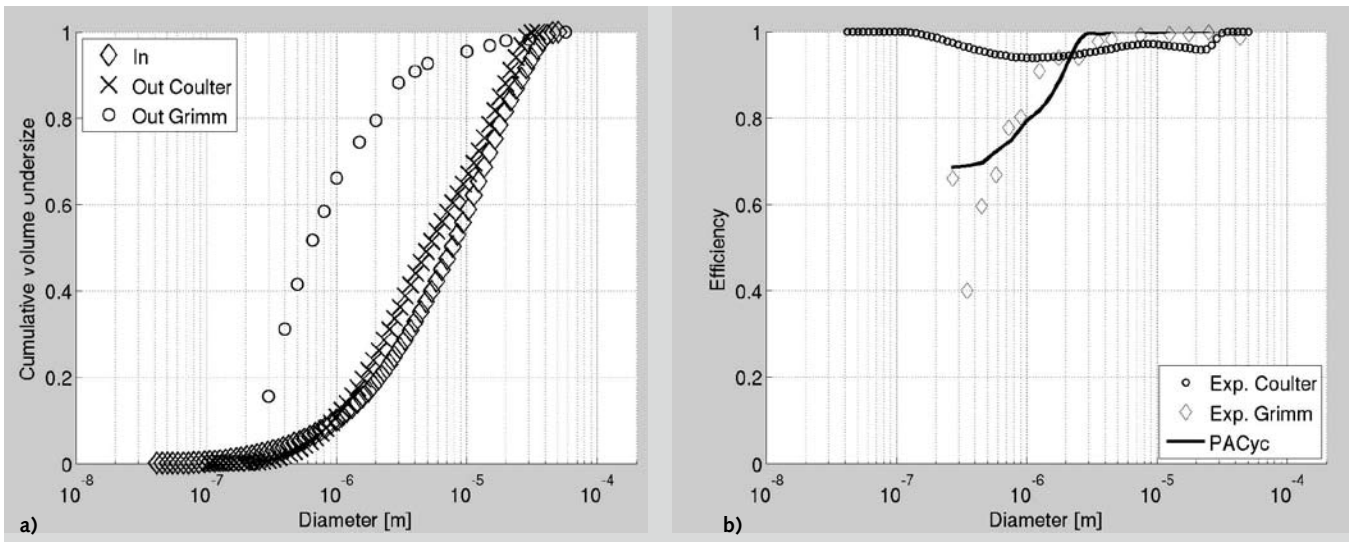
Fig. 6 refers to a case-study of emissions control from a vertical lime furnace for cement production. Figure 6a shows off-line measurements using the Coulter laser sizer and online measurements using the GRIMM monitor ($\rho_p = 2389 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, inlet concentration = $0.60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), while Figure 6b presents the

3 Experimentelle Ergebnisse und Modellvorhersage

In diesem Abschnitt werden drei Fallstudien behandelt. Eine befasst sich mit der Überwachung der Emissionen aus einem Kalkschachtofen, der für die Zementproduktion genutzt wird. In den ersten zwei Fällen wird ein numerisch optimierter Zyklon einer Versuchsanlage [19, 20] mit einem Innendurchmesser von 450 mm ohne teilweise Rückführung der Gase und Teilchen eingesetzt. Im dritten Fall (Experiment mit mechanischer Rückführung) wurde an einem Industriestandort ein ähnlicher Zyklon auf einen Konzentrator gleichen Durchmessers montiert, und die Teilchen wurden direkt aus dem industriellen Verfahren zugeführt. Im letzten Fall (mit elektrisch verstärkter Abscheidung im Konzentrator) wurden ein Satz Zyklonen mit einem Innendurchmesser von 1850 mm und Konzentratoren von 800 mm durch das PACyc simuliert. Zwecks eines direkteren und gültigen Vergleichs betrug in allen Fällen die durchschnittliche Geschwindigkeit am Zykloneinlauf $\approx 15\text{--}20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Schließlich erhielt man als Bezugswert die experimentellen Trenngradkurven bei gleichzeitiger isokinetischer Probenahme am Einlauf und Auslauf. Dabei wurden Probenahmegeräte mit konstantem Volumen (Techora Bravo) in Glasfaserfiltern von GFA verwendet.

Bild 6 bezieht sich auf eine Fallstudie mit Überwachung der Emissionen aus einem Kalkschachtofen, die für die Zementproduktion genutzt werden. Bild 6a zeigt Offlinemessungen mit einem Lasersizer vom Typ Coulter und Onlinemessungen mit einem GRIMM Monitor ($\rho_p = 2389 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, Einlaufkonzentration = $0.60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), während Bild 6b einen Vergleich zwischen der vorhergesagten Trenngradkurve und den Kurven enthält, die experimentell bei beiden Messmethoden erhalten wurden. Dieses Beispiel zeigt, dass der ReCyclone EH bei dieser Art von Zyklonen zu einer sehr hohen Abscheideleistung führt, und dass unser Vorhersagetool in der Lage ist, recht gut die experimentellen Ergebnisse vorherzusagen.

Bild 7 bezieht sich auf einen Fall der Rückgewinnung eines chemischen Wertstoffs ($\eta_{\text{ReCyclone}^{\text{®}} \text{MH}} \approx 99.6 \%$). Bild 7a zeigt Offlinemessungen mit einem Coulter Lasersizer ($\rho_p = 1471 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,



6 Case 1 – waste of a vertical lime furnace for cement production, a) – PSD at the inlet of the system and in emissions (experimental and PACyc predictions); b) Grade efficiency curves

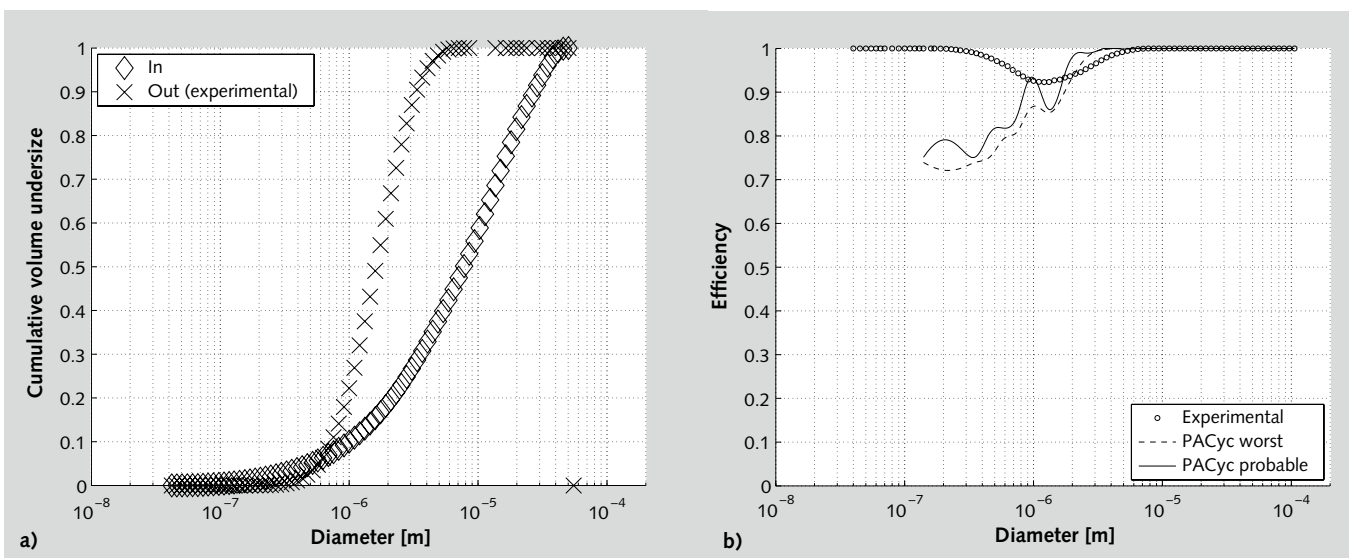
Fall 1 - Abfallstoff aus einem Kalkschachtofen für die Zementproduktion, a) – Teilchengrößenverteilung am Einlauf der Anlage und in Emissionen (experimentell und Vorhersagen mit Hilfe des PACyc); b) Trenngradkurven

comparison between the predicted grade-efficiency curve and those obtained experimentally for both measuring methods. This example shows that ReCyclone EH lead to very high collection efficiency for these kind of emissions, and our prediction tool is able to predict fairly well the experimental results

Fig. 7 refers to a case of value-added chemical product recovery ($\eta_{\text{ReCyclone}^{\text{MH}}} \approx 99.6\%$). Fig. 7 a shows off-line measurements using the Coulter laser sizer ($\rho_p = 1471 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, inlet concentration = $7.73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ at 120°C), while Fig. 7 b presents the comparison between the predicted grade efficiency curves (worst and probable cases) and those obtained experimentally for both measuring methods.

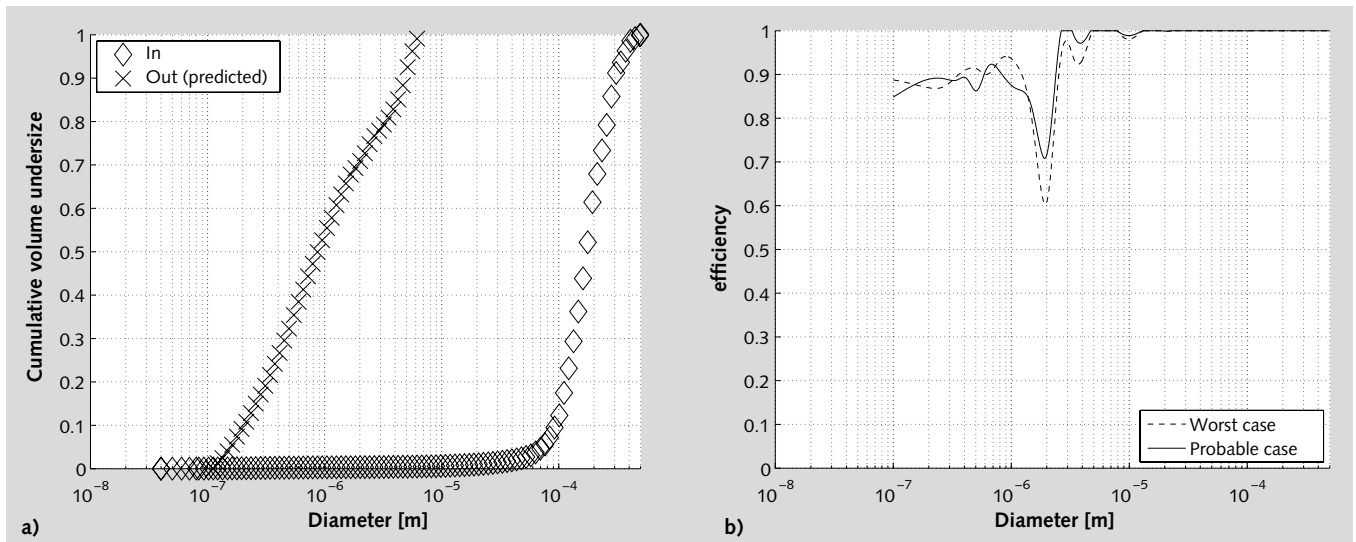
Einlaufkonzentration = $7.73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ bei 120°C), während Bild 7 b den Vergleich zwischen den vorhergesagten (schlechtester und wahrscheinlicher Fall) und den experimentell erhaltenen Trenngradkurven für beide Messverfahren zeigt.

Bild 8 bezieht sich auf einen Fall eines Klinkerkühlers mit Luftüberschuss ($\eta_{\text{ReCyclone}^{\text{EH}}} > 99.9\%$). Bild 8 a zeigt Offlinemessungen mit einem Lasersizer vom Typ Coulter LS230 sowie Emissionen mit Trenngradkurven, die vom PACyc vorhergesagt wurden ($\rho_p = 3110 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, Einlaufkonzentration $\approx 50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ at 120°C). Bild 8 b zeigt die vorhergesagte Trenngradkurve für die untersuchte Anlage mit dem ReCyclone EH.



7 Case 2 – ReCyclone® MH application example: Value-added product recovery: a) Particle size distribution (PSD) at the inlet of the system and in emissions (experimental); b) Grade efficiency curves

Fall 2 – Anwendungsbeispiel ReCyclone® MH: Wertstoffrückgewinnung: a) Korngrößenverteilung am Anlageneinlauf und in Emissionen (experimentell); b) Trenngradkurven



8 Case 3 – ReCyclone® EH application example: Excess air of a clinker cooler: a) Particle size distribution (PSD) at the inlet of the system and in emissions (predicted by PACyc); b) Grade efficiency curves

Fall 3 – Anwendungsbeispiel ReCyclone® EH: Luftüberschuss eines Klinkerkühlers: a) Korngrößenverteilung am Anlageneinlauf und in Emissionen (vorhergesagt von PACyc); b) Trenngradkurven

Fig. 8 refers to a case of excess air of clinker cooler ($\eta_{\text{ReCyclone}^{\text{®}} \text{EH}} > 99.9\%$). Fig. 8 a shows off-line measurements using a Coulter LS230 laser sizer and emissions using the grade efficiency curves predicted by PACyc ($p_p = 3110 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, inlet concentration $\approx 50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ at 120°C). Fig. 8 b presents the predicted grade efficiency curve for the studied ReCyclone EH system.

Fig. 9 shows the global efficiency as a function of concentration either for the PACyc predictions or the experimental case, and it is noticeable that

- Hurricane® geometry leads to significantly higher efficiency than other high-efficiency cyclone geometries,
- PACyc leads to overall collection efficiencies very similar to the ones obtained experimentally,
- PACyc has very high precision, hence the worst and probable cases show very similar results.

Considering all the figures shown in this section, it is possible to state that the presented technologies are well suited for decreasing particle emission of fine particles. In terms of prediction/simulation, the PACyc model seems to be a good tool for the design of optimal systems for each situation, since it predicts reasonably well the experimental data, predicting global efficiencies near to those obtained in experiments.

4 Conclusions

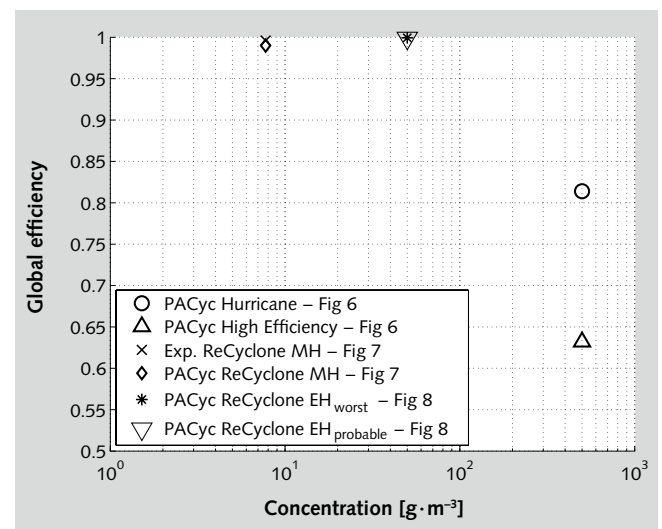
Numerically optimized cyclones and ReCyclone® systems were designed by solving appropriate optimization problems. The abnormally high collection of fine submicrometric particles often observed with these systems is attributed to particle agglomeration within the turbulent cyclone flow field, and the PACyc model leads to good predictions of overall efficiency of all these systems.

This model was developed based on the Ho and Sommerfeld [15, 23] particle agglomeration model, superimposed on the Mothes and Löffler [8] particle collection model in isolated cyclones or on the Salcedo et al. [5] model for mechanical recirculation systems. Coupling these with electrostatic precipitator

Bild 9 zeigt die Gesamtleistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Konzentration entweder für die Vorhersage des PACyc oder für den experimentellen Fall. Dabei ist es bemerkenswert, dass

- die Geometrie des Hurricane® zu einer wesentlich höheren Leistung führt als andere Geometrien von Hochleistungszyklonen,
- das Modell PACyc zu einem Gesamtabscheidungsgrad führt, der dem experimentell gewonnenen sehr ähnlich ist,
- PACyc eine sehr hohe Genauigkeit hat, denn die schlechtesten und wahrscheinlichsten Fälle weisen sehr ähnliche Ergebnisse auf.

Unter Berücksichtigung aller in diesem Abschnitt aufgeführten Zahlen kann man feststellen, dass die dargestellten Technologien gut geeignet sind für eine Senkung der Emission feiner Teilchen. Was die Vorhersage und Simulation angeht, scheint



9 Global efficiency for each of the cases: experimental and predictions

Gesamtleistung für jeden dieser Fälle: Experimentell und Vorhersagen

classical models [20–22] enables predictions for these recirculation systems with a superimposed electric field.

On average, Hurricanes® can reduce the emission of high-efficiency cyclones with comparable pressure drop by about 40–60 %, mechanical ReCyclones® by about 75–80 % and ReCyclones® EH by about 90–95 %. Their effectiveness has already been shown at laboratory, pilot and industrial scales for a variety of very fine dusts (relevant for the mineral and chemical industries), including dusts such as calcined kaolin, value-added chemical product or excess air from clinker coolers.

Literature/Literaturverzeichnis

- [1] R.L. Salcedo and M.A. Coelho: Turbulent dispersion coefficients in cyclone flow: An empirical approach. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 77(4): pp. 609–617, August 1999
- [2] R.L. Salcedo: High efficiency cyclones. European Patent 0972572, European Patent Bulletin, March 2000
- [3] R.L. Salcedo and M.G. Candido: Global optimization of reverse-flow gas cyclones: application to small-scale cyclone design. *Separation Science and Technology*, 36(12): pp. 2707–2731, 2001
- [4] R.L. Salcedo and M.J. Pinho: Pilot- and industrial-scale experimental investigation of numerically optimized cyclones. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 42: pp. 145–154, 2003
- [5] R.L. Salcedo, V.G. Chibante, A.M. Fonseca and G. Candido: Fine particle capture in biomass boilers with recirculating gas cyclones: Theory and practice. *Powder Technology*, 172(2): pp. 89–98, 2007
- [6] V. Chibante and R.L. Salcedo: Comparing the performance of recirculating cyclones applied to the dry scrubbing of gaseous hcl with hydrated lime. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48: pp. 1029–1035, 2009
- [7] S.R. Wisk, L.A. Smolensky and A. Murison: Novel particulate control device for industrial gas cleaning. *Filtration & Separation*, Jan/Feb., pp. 29–31, 1993
- [8] H. Mothes and F. Löffler: Prediction of particle removal in cyclones separators. *International Chemical Engineering*, 28: p. 231, 1988
- [9] A.C. Hoffmann, A. Vansanten, R.W.K. Allen, and R. Clift: Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones. *Powder Technology*, 70: pp. 83–91, 1992
- [10] Alex C. Hoffmann and A. Berrino: On the shape of grade efficiency curves computed for centrifugal dedusters by cfd with lagrangian particle tracking. *Advanced Technologies for Fluid-Particle Systems*, 95: pp. 13–17, 1999
- [11] E. Hugi and L. Reh: Focus on solids strand formation improves separation performance of highly loaded circulating fluidized bed recycle cyclones. *Chemical Engineering Processing*, 39: pp. 263–273, 2000
- [12] Alex C. Hoffmann and Louis E. Stein: *Gas Cyclones and Swirl Tubes – Principles, Design and Operation*. Springer, 2002
- [13] C.H. Ho and M. Sommerfeld: Numerical calculation of dust separation in a gas cyclone paying due attention to particle agglomeration. *Chemie Ingenieur Technik*, 77(3): pp. 282–290, 2005
- [14] H. Mothes and F. Löffler: About the influence of particle agglomeration on the separation in a gas cyclone. *Staub, Reinhaltung der Luft*, 44: pp. 9–14, 1984
- [15] M. Sommerfeld: Validation of a stochastic lagrangian modelling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence. *International Journal of Multiphase Flow*, 27(10): pp. 1829–1858, 2001

das Modell PACyc ein gutes Werkzeug zu sein, um optimale Anlagen für beliebige Situationen zu entwickeln, denn mit ihm werden experimentelle Daten gut vorhergesagt, und die Gesamtleistungsfähigkeit bewegt sich nahe an der experimentell erhaltenen.

4 Schlussfolgerungen

Es wurden numerisch optimierte Zykclone und Anlagen mit ReCyclone® entwickelt, wodurch entsprechende Optimierungsprobleme gelöst wurden. Die abnormal hohe Abscheidung von Teilchen im Submikrometerbereich, die oft bei diesen Anlagen beobachtet wird, wird der Agglomeration innerhalb des Wirbelströmungsfelds des Zyklons zugeschrieben. Das Modell PACyc sichert eine gute Vorhersage der Gesamtleistung aller Anlagen.

Dieses Modell wurde auf der Grundlage des Modells der Teilchenagglomeration von Ho und Sommerfeld [15, 23] entwickelt und dem Modell der Teilchenabscheidung in abgeschlossenen Zykclonen von Mothes und Löffler [8] oder dem Modell von Salcedo et al. für Anlagen mit mechanischer Rückführung [5] überlagert. Die Verbindung dieser Modelle mit den klassischen Modellen für E-Filter [20–22] ermöglicht die Vorhersagen für diese Anlagen mit Rückführung bei einem überlagerten elektrischen Feld.

Im Durchschnitt können die Zykclone vom Typ Hurricane® die Emissionen von Hochleistungszyklonen mit vergleichbarem Druckabfall um etwa 40–60 %, von mechanischen Zykclonen des Typs ReCyclone® um etwa 75–80 % und von Zykclonen des Typs ReCyclone® EH um etwa 90–95 % reduziert werden. Ihre Leistungsfähigkeit wurde bereits im Labor, in Pilotanlagen und in der Industrie für eine Vielzahl von Feinstäuben (wichtig für die Mineralstoff- und chemische Industrie) nachgewiesen. Das trifft auch auf Stäube wie kalziniertes Kaolin, chemische Wertstoffe oder Luftüberschuss aus Klinkerkühlern zu.

- [16] D. Mao, J.R. Edwards, A.V. Kuznetsov and R. Srivastava: A model for fine particle agglomeration in circulating fluidized bed absorbers. *Heat Mass Transfer*, 38: p. 379, 2002
- [17] J. Paiva, R. Salcedo and P. Araújo: Impact of particle agglomeration in cyclones. *Chemical Engineering Journal*, 162: pp. 861–876, 2010
- [18] R. Clift, M. Ghadiri and Alex C. Hoffman: A critique of two models for cyclone performance. *AIChE Journal*, 37: pp. 285–289, 1991
- [19] R.L. Salcedo: Collection efficiencies and particle size distributions from sampling cyclones – comparison of recent theories with experimental data. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 71: pp. 20–27, 1993
- [20] Harry J. White: *Industrial Electrostatic Precipitation*. International Society for Electrostatic Precipitation, 1963
- [21] Sabert Oglesby: *Electrostatic Precipitation – Pollution Engineering and Technology* 8. Marcel Dekker Inc., 1978
- [22] K.R. Parker: *Applied Electrostatic Precipitation*. Blackie Academic & Professional, 1997
- [23] C.A. Ho and M. Sommerfeld: Modelling of micro-particle agglomeration in turbulent flows. *Chemical Engineering Science*, 57(15): pp. 3073–3084, 2002