

# Systematische Entwicklung neuartiger strukturierter Packungen

## Generatives Design neuartiger additiv fertiger strukturierter Packungen für thermische Trennapparate

**A. Lange, G. Fieg**, Institut für Systemverfahrenstechnik, Technische Universität Hamburg (TUHH)

### Kurzgefasst

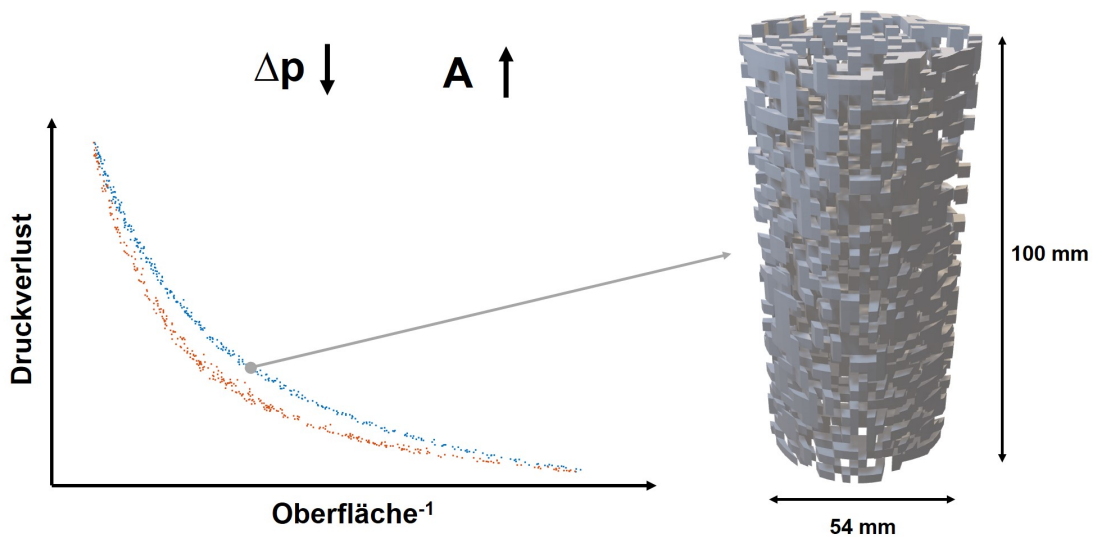
- Strukturierte Packungen werden flächendeckend in Trennapparaten zur Intensivierung des Stofftransports eingesetzt
- Formverbesserungen der Packungen führen zu effizienteren Prozessen und damit zu Einsparungen von Kosten und Treibhausgasen
- Der 3D-Druck ermöglicht dank hoher Design- und Fertigungsfreiheit die Realisierung von neuartigen Packungsformen
- Anhand von Topologieoptimierungsstudien sollen erstmalig strukturierte Packungen generativ gestaltet werden und so neuartige, leistungsfähige, additiv fertige Packungsformen gefunden werden

Thermische Trennapparate werden industriell für die Aufreinigung von Stoffgemischen eingesetzt. Die destillative Trennung von Stoffgemischen gilt dabei als das mit Abstand weitest verbreitete thermische Trennverfahren der Prozessindustrie. Die apparative Umsetzung der mehrstufigen Destillation erfolgt in Rektifikationskolonnen und ermöglicht die Gewinnung hochreiner Produkte. Abhängig von den spezifischen Betriebsbedingungen und dem aufzureinigenden Stoffgemisch werden die Kolonnen mit trennwirksamen Einbauten versehen, welche den Stofftransport zwischen der im Gegenstrom geführten Flüssigkeits- und Dampfphase intensivieren. Strukturierte Packungen werden als trennwirksame Einbauten insbesondere in Rektifikationskolonnen im Vakuumbetrieb eingesetzt, sodass neben einer maximalen Trenneffizienz, ein minimierter Druckverlust über die Packung sowie ein maximaler Durchsatz gefordert sind. Diese drei Kenngrößen korrelieren direkt mit den vorliegenden Strömungsverhältnissen, welche wiederum durch die Form der strukturierten Packung bestimmt werden. Formverbesserungen führen somit zu direkten Einsparungen von Kosten und Treibhausgasen bei dem Betrieb der Rektifikationskolonne. Entsprechend der extrem hohen Anzahl von weltweit betriebenen Vakuumrektifikationskolonnen führen bereits geringe prozentuale Verbesserung

der Kenngrößen der Packungen in Summe zu hohen Einsparungen. Deshalb steht die Form der strukturierten Packungen bereits lange im Forschungsinteresse und wird stetig weiterentwickelt. Bisherige Entwicklungen unterlagen jedoch den Einschränkungen herkömmlicher Fertigungsverfahren wie beispielsweise dem Biegen und Fügen von Stahlblechen. Additive Fertigungsverfahren bieten nun eine bisher nicht dagewesene Gestaltungs- und Fertigungsfreiheit, sodass sie die Schlüsseltechnologie für die Entwicklung einer neuen Generation von Packungen darstellen können. Die Nutzung des vorhandenen Potentials bedarf jedoch einer systematischen Methodik basierend auf der engen Verbindung von Simulations- und Optimierungsmethoden sowie zielgerichteten Experimenten. Deshalb ist das Ziel dieses Forschungsprojektes, mit Hilfe des Einsatzes von Methoden der Strukturoptimierung neuartige additiv fertige strukturierte Packungen zu entwickeln, welche einen minimalen Druckverlust bei möglichst maximaler Trennleistung und Produktionskapazität aufweisen.

Dazu werden im Institut für Systemverfahrenstechnik der Technischen Universität Hamburg bereits erfolgreich strukturierte Packungen konstruiert, simulationsbasierte Formoptimierungen durchgeführt, Prototypen mit einem stereolithographischen Verfahren gefertigt und diese in Experimenten untersucht [1]. Dabei dienen die Experimente der Validierung von Strömungssimulationen und der Analyse von vorzugsweise experimentell bestimmbar Kenngrößen. Entsprechend wurden Modelle und Werkzeuge bereits erfolgreich formuliert und getestet, Versuchsanlagen in Betrieb genommen sowie Fertigungs- und Prozessabläufe etabliert. Basierend darauf nimmt sich das nun am HLRN durchzuführenden Vorhaben einer neuen, anspruchsvollen und innovativen Herausforderung an, um das Gesamtprojekt auf eine neue Ebene zu heben. Das Vorhaben umfasst die Durchführung von umfangreichen mehrkriteriellen Topologieoptimierungsstudien, sodass erstmalig strukturierte Packungen generativ gestaltet werden. So sollen systematisch, neuartige leistungsfähige Packungsstrukturen identifizieren werden, die substantiell dazu beitragen, den Betrieb von Rektifikationskolonnen ökonomisch und ökologisch effizienter zu gestalten.

Für die Optimierungsstudien wurde ein Werkzeug für das generative Design von Packungen entwickelt.



**Abbildung 1:** Auftragung des Druckverlusts gegen den Kehrwert der Oberfläche der untersuchten Packungen von zwei unterschiedlichen Generationen (rot = höhere Generation) sowie Darstellung der Packung eines untersuchten Individuums.

Dieses verknüpft einen genetischen Optimierungsalgorithmus mit einphasigen Strömungssimulationen als Analysemodell. Der Entwurfsraum kann damit systematisch und zielgerichtet untersucht und eine Vielzahl von Packungsentwürfen evaluiert werden. Als Zielfunktionen der mehrkriteriellen Optimierung werden die Maximierung der Oberfläche der Packung sowie die Minimierung des Druckverlustes über die Packung definiert. Spezifische prozess- und fertigungsbedingte Nebenbedingungen sichern die Integrität der Packungen und minimieren zielgerichtet den Umfang des Lösungsraums. Quaderförmige Elemente, welche entweder Materialelemente oder durchströmbare Elemente darstellen, dienen als Designvariablen. Ziel ist es die Materialelemente bestmöglich und automatisiert innerhalb eines Entwurfsraumes zu verteilen. Angelehnt an die Evolutionstheorie ahmt der genetische Algorithmus durch die Operationen der Selektion, Rekombination und Mutation die Evolution nach. Jede Generation umfasst dabei eine definierte Anzahl von Individuen. Jedes Individuum repräsentiert eine aus den Entwurfsvariablen der binären Materialelemente generierte Packung, deren Kenngrößen in jeweils einer Strömungssimulation bestimmt werden. Die Strömungssimulationen werden durchgeführt und der Druckverlust sowie die spezifische Oberfläche der Packung durch den Optimierungsalgorithmus evaluiert. Auf Basis der ausgewerteten Fitnessfunktionen sowie den Operatoren der Mutation, Selektion und Rekombination wird eine neue Generation von Individuen erzeugt und diese wiederum durch Strömungssimulationen ausgewertet. Anhand der Auftragung des Druckverlusts gegen den Kehrwert der spezifischen Oberfläche eines jeden

Individuums einer Generation wird das Wandern der entstehenden Front im Laufe der Optimierung visualisiert. Dies ist in Abbildung 1 anhand von zwei Generationen exemplarisch dargestellt. Zusätzlich ist die Packung eines Individuums dargestellt.

Anhand der durchzuführenden Optimierungsstudien wird erwartet, dass durch den Einsatz innovativer Methoden neuartige strukturierte Packungen identifiziert werden können, die dem besten Kompromiss aus maximaler Oberfläche und minimalem Druckverlust über die Packung entsprechen. Es wird erwartet, dass diese Ergebnisse die Grundlage für eine neue Generation strukturierter Packungen darstellen. Zusätzlich kann das hier am Beispiel der Rektifikationskolonne durchgeführte Vorgehen durch ein einfaches Anpassen der Zielfunktionen und/oder der Randbedingungen auf weitere thermische Trennverfahren wie der Absorption geschickt erweitert werden. Die Allgemeingültigkeit des verfolgten Ansatzes durch die einfache Übertragbarkeit auf weitere Apparate und Anwendungen bietet damit einen Mehrwert für weitere Disziplinen, sodass die am HLRN generierten Ergebnisse als substantielle Grundlage für anknüpfende Forschungsarbeiten dienen.

#### WWW

<https://www.tuhh.de/psi/>

#### Weitere Informationen

- [1] A. Lange, G. Fieg, *Chem. Ing. Tech.* 92, No. 9, 12931325 (2020). doi:10.1002/ci-te.202055133