

Enquetekommission II zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW
z.Hd. Herrn Markus Preuß
Landtag NRW
Platz des Landtags 1

40221 Düsseldorf

**Professor Dr.-Ing.
Gerhard Schembecker**
Emil-Figge-Str. 70
D-44227 Dortmund
Tel 0231/755-2338
Fax 0231/755-2341
schembecker@tu-dortmund.de
www.tu-dortmund.de

Diktatzeichen	Aktenzeichen	Ort	Datum	Dienstgebäude/Raum
		Dortmund	06.02.2008	G2 / 3.20

**Anhörung der Enquetekommission II zur Zukunft der chemischen Industrie in
Nordrhein-Westfalen am 09. Mai 2014**

„Intensivierte chemische Verfahren“

Sehr geehrter Herr Preuß,

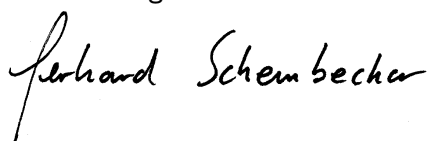
wie zugesagt erhalten Sie eine Stellungnahme zu den von Ihnen übermittelten Fragen zum Thema „Intensivierte chemische Verfahren“. Die Antworten geben nicht nur meine persönliche Meinung wider, sondern ich habe mir erlaubt, die Meinung einiger Kollegen der Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen zu integrieren.

Darüber hinaus möchte ich auf eine recht aktuelle Publikation hinweisen, die wir in Zusammenarbeit mit internationalen Fachexperten erarbeitet haben und die zahlreiche Aspekte des von Ihnen verschickten Fragenkataloges adressiert:

Bramsiepe, C.; Sievers, S.; Seifert, T.; Stefanidis, G.D.; Vlachos, D.G.; Schnitzer, H.; Muster, B.; Brunner, C.; Sanders, J.P.M.; Bruins, M.E. and Schembecker, G.: Low-cost small scale processing technologies for production applications in various environments - Mass produced factories. *Chemical Engineering and Processing* 51 (2012), Pages 32-52.

Für Rückfragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen
Prof. Dr.-Ing. G. Schembecker



Konto Nr. 001 181 327
Sparkasse Dortmund
BLZ 440 501 99

Ust-Idnr DE 811258273
IBAN DE 09440 50199 00011 81327
SWIFT DORTDE33

Katalyse

1. *Was ist die aktuelle Bedeutung der Katalyse für chemische Produktionsprozesse im Hinblick auf nachhaltige Chemie/Herausforderungen für die zukünftige Chemie (Ressourcenschonung, alternative Rohstoffe etc.)?*

Katalyse spielt zunehmend eine wichtigere Rolle bei der Aktivierung von Kohlendioxid, z.B. bei Umsetzungen von CO₂ zu Methanol, Ameisensäure oder Methan. Auch homogene Katalysatoren finden hier verstärkt Anwendung. Methanol und Ameisensäure werden als gut lager- und transportierbare Flüssigkeiten diskutiert. Der katalytische Einbau von Kohlendioxid in Polymere führt zu neuen Polycarbonaten und Polyurethanen, wozu es Pilotanlagen von BASF und Bayer gibt. Hydroformylierungen mit Kohlendioxid könnten bei gut zugänglichem Wasserstoff (aus Wasserspaltung und nicht aus Steamreforming) zunehmend interessant werden. Katalytische Umsetzungen in überkritischem CO₂ als leicht verdampfbare und Umwelt-schonendes Lösungsmittel werden zunehmend untersucht, z.B. für Oxidationsreaktionen.

Die Katalyse mit nachwachsenden Rohstoffen wird immer intensiver erforscht, von Hochschulen und Industrie. Im Mittelpunkt stehen Plattformchemikalien, die aus der Lignocellulose gewonnen werden können. Eine erste Pilotanlage für Hydroxymethylfurfural geht jetzt on stream. Die katalytische Dehydratisierung von Glycerin zu Acrylsäure wird vielleicht schon in wenigen Jahren wirtschaftlich. Ein Weg über das Zwischenprodukt Acrolein war Gegenstand des F³-Factory Projektes.

2. *Was sind die Möglichkeiten und Grenzen (technisch und wirtschaftlich) von modularen Mikroreaktoren für die Herstellung von Grundchemikalien?*

Mikroreaktoren bieten sehr gute Wärme- und Stofftransporteigenschaften, die häufig vom Katalysator nicht "gebraucht" werden (nicht aktiv genug). Sie lassen sich zwar zu Clustern in einem großtechnischen Apparat für die Herstellung großer Mengen (> 10.000 t/a) zusammenfassen, aber dann verlagern sich die Herausforderungen auf die Verteilung der Rohstoffe auf die einzelnen Module sowie die Regelung der Performance jedes einzelnen Moduls. Insofern sind die Möglichkeiten der Anwendung von modularen Mikroreaktoren für die Herstellung von Grundchemikalien begrenzt auf bestimmte Anwendungen. Diese können durch die dezentrale und insofern räumlich limitierte Verfügbarkeit von Rohstoffen z.B. auf Offshore-Plattformen, Schiffen oder in landwirtschaftlichen Betrieben gegeben sein. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise Adipinsäure oder spezielle Varianten der Fischer-Tropsch Synthese auf Basis nachwachsender Rohstoffe realisieren. Stark exotherme oder sicherheitstechnisch anspruchsvolle Reaktionen können ebenfalls für den Einsatz von Mikroreaktoren sprechen, weil Mikroreaktoren neue Betriebsfenster durch erhöhten Druck oder Temperatur eröffnen.

Den Anforderungen einer flexiblen, aber sehr effizienten Produktion werden die in der Forschung und Entwicklung befindlichen Containeranlagen gerecht. Diese werden unter anderem von der invite GmbH entwickelt, einer als Private Public Partnership aufgesetzten gemeinsamen Forschungseinrichtung der Technischen Universität Dortmund und der Bayer Technology Services GmbH. Die von invite entwickelten Container vereinen die Flexibilität einer absatzweise betriebenen Mehrproduktanlage mit der Effizienz eines kontinuierlich betriebenen Prozesses. Derartige modular aufgebaute Anlagen erlauben je nach Produkt die Herstellung von bis zu 1.000 t/a in einem einzigen Container.

3. *Aus welchen Stoffen bestehen die Katalysatoren der Zukunft und welchen Beitrag kann das Maßschneidern von Katalysatoren für die Energieeffizienz leisten?*

Es lassen sich mehrere Trends erkennen in der Forschung an neuen Katalysatoren.

Generell wird das Ziel verfolgt, durch die Steigerung der Selektivität die Rohstoffausbeute zu erhöhen und gleichzeitig den Aufarbeitungsaufwand und den damit verbundenen Energieaufwand zu reduzieren. Hier sind z. B. zu nennen enantioselektiv wirkende Katalysatoren (sei es homogen katalysiert oder biokatalytische Umsetzungen).

Zum anderen wird sowohl in der homogenen, als auch in der heterogenen Katalyse versucht, wirtschaftlich günstigere Nicht-Edelmetalle (Fe, Co, Ni, Cr, Cu, Mn) zu nutzen.

Die Entwicklung lösungsmittel-toleranter Biokatalysatoren wird dazu führen, dass sich die Betriebsfenster für die chemische und die biochemische Katalyse stärker überlappen. In der Entwicklung sind Duale Katalysatoren und Tandem-Katalysen, die in der Lage sind, mehrere Reaktionsschritte in einem Apparat durchzuführen und so z.B. Aufarbeitungsschritte einsparen. Diese Tendenz sieht man auch in der homogenen Katalyse, z. B. werden die Hydroformylierung von Alkenen zu Aldehyden und eine nachgeschaltete Aldehyd-Funktionalisierung derzeit intensiv untersucht. Auch hier eröffnen sich neue Betriebsfenster, die zu besserer Ausbeute oder höheren Umsatz führen werden.

4. *Wie kann die heterogene Katalyse durch die kombinierte Anwendung mit Mikroreaktoren verbessert werden?*

Besonders aktive Katalysatoren lassen sich in Kombination mit Mikroreaktoren sicher handhaben. Mikroreaktoren lassen sich als Plattform für schnelles Screening von Katalysatoren, Optimierung der Reaktionsbedingungen, Monitoring des Reaktionsverlaufs oder Bestimmung kinetischer Parameter einsetzen.

Flow Chemistry

5. *Was ist der Entwicklungsstand und was sind die Potentiale bei Flow Chemistry?*

Der Entwicklungsstand ist unterschiedlich: im Labor wird die Technologie schon gut angenommen, aber beim Scale-up trifft sie auf Zurückhaltung. Wichtig in diesem Zusammenhang ist zu nennen, dass Flow Chemistry in der Reaktionstechnik durchaus oft angewandt wird. Der Weg zu einem technischen Prozess führt aber über die Entwicklung von Aufarbeitungstechnologien, die sich dem Maßstab der Technologie anpassen. Man muss bedenken, dass die Aufbereitungstechnologien in der Bulkchemie mindestens eine Hälfte der Herstellungskosten vieler Produkte verursachen, in der Pharmaindustrie können sie sogar 80% erreichen. Hier besteht noch erheblicher Handlungsbedarf. Wenn diese Lücke geschlossen ist und ein kompletter Baukasten mit allen für einen kompletten Herstellprozess notwendigen Schritten verfügbar ist wird sich das Potential der Flow Chemistry zeigen. In diesem Zusammenhang ist auch zu nennen, dass es an im Maßstab angepasster Steuerungs- und Regelungstechnik fehlt.

6. *Welche möglichen Anwendungsbereiche gibt es (mengen- und produktbezogen)?*

Wichtige Anwendungspotentiale für die Flow Chemistry sind in der Synthese von Feinchemikalien, Agro- und Pharmaprodukten zu sehen, bei denen bisher noch häufig mehrstufige Batch-Ansätze mit langen Wechselzeiten durchgeführt werden. Darüber hinaus liegen Vorteile immer dann vor, wenn effizient relativ kleine Mengen zu verarbeiten sind, wie dies z. B. bei dezentral anfallenden nachwachsenden Rohstoffen der Fall ist.

7. *Sehen Sie eher eine langsame, aber stetige Implementierung in die Pilot- und Produktionstechnik der chemischen Industrie oder erwarten Sie ab einem bestimmten Zeitpunkt eine mehrsprunghafte Valorisation? Im letzten Fall, wann und warum?*

Die Technologie wird langsam und stetig ihren Weg in die Anwendung finden. Eine wesentliche Limitierung in der Implementationsgeschwindigkeit ist in der Verfügbarkeit von robustem, kostengünstigem Equipment zu sehen. Das bezieht sich nicht nur auf Reaktoren, Pumpen etc. sondern insbesondere auf Trennapparate.

Begleitend sollte die Einführung unterstützt werden durch eine Erweiterung der Ausbildung von Chemikern und Ingenieuren. Wenn Flow Chemistry zu einem Standard-Instrument in der Ausbildung geworden ist, werden die auf dieser Basis ausgebildeten Personen in ihrem Berufsleben auf diese Technologie verstärkt zurückgreifen.

Integrierte Prozesstechnik

8. *Bei welchen chemischen Prozessen ist das Einsparpotenzial am höchsten? Werden diese Verfahren bereits großtechnisch eingesetzt?*

Integrierte Prozesstechnik wird sich immer dann deutlich auf die Kosten für die Herstellung eines Produktes auswirken, wenn durch die schnelle Abtrennung des Produktes aus dem Reaktionsraum Nebenreaktionen unterdrückt werden können. Gleiches gilt für die Ausnutzung der Reaktionswärme zur Realisierung einer bestimmten Trennung. Herausstechendes Beispiel ist der Erfolg von Reaktivdestillationsprozessen, von denen in den letzten Jahrzehnten einige Hundert gebaut wurden. Hier lassen sich sowohl Einsparungen bei den Investitions- als auch den Betriebskosten erzielen. Aber auch die in-situ Abtrennung von Produkten z. B. aus Fermentationsprozessen führt dazu, dass Produktinhibierungen vermieden werden und die biokatalysierte Reaktion zu höheren Umsätzen geführt werden kann. Die Destillation verbraucht etwa eine Hälfte der Energie, die in der chemischen Industrie benötigt wird. Der Einsatz von „kalten“ Trennverfahren (z. B. Membrantechnologie) kann einen Teil der Destillationstrennschritte ersetzen. Dadurch entstehen reaktive und hybride Trennverfahren mit großem Energieeinsparpotential, das durch Synergieeffekte innerhalb der integrierten Anlagen entsteht.

9. *Welche Beiträge kann die Prozesstechnik für effiziente und nachhaltigere Chemieprozesse leisten?*

Die Anforderungen an die Reinheit der Produkte steigen stetig. Gleichzeitig erzeugen neue Katalysatoren wie z.B. Biokatalysatoren komplexe Gemische, die in einer aufwändigen Aufarbeitung getrennt werden müssen. Die Zielprodukte sind verdünnt, häufig in wässrigen Lösungen. Oft gleichen sich die Eigenschaften von Zielprodukt und einigen Nebenprodukten. Dies erfordert den Einsatz hocheffizienter Trenntechnik. Wenn kleine Eigenschaftsunterschiede ausgenutzt werden sollen, dann kommt man um den Einsatz vielstufiger Prozesse nicht herum. Die „klassischen“ Aufreinigungsverfahren wie Absorption, Rektifikation oder Extraktion sind aber in der Stufenzahl limitiert. Neue intensiviertere Konzepte wie die zentrifugale Rektifikation, Absorption oder die zentrifugale Verteilungschromatographie erlauben dagegen viele Stufen auf kleinem Raum. Solche Konzepte sind modular, lassen schnelles Anfahren der Trennapparate zu und zeichnen sich durch Flexibilität aus, weil die Trennleistung durch die Rotationsgeschwindigkeit eingestellt werden kann.

Durch Kombination verschiedener Wirkprinzipien zu sogenannten hybriden Aufarbeitungsprozessen lassen sich ebenfalls erhebliche Effizienzsteigerungen erreichen. Zu nennen sind z. B. Kombinationen aus Rektifikationskolonnen mit Membranen, Absorption und Membranen oder absorptive Destillation.

Vor dem Hintergrund der Umstellung auf erneuerbare Energien rücken Herstellprozesse, die elektrische Energie nutzen als Energiequelle, deutlicher ins Zentrum des Interesses. Neben dem bereits oben genannten Einsatz eines zentrifugalen Feldes erscheinen der Einsatz alternativer Energiequellen wie Ultraschall (für Reaktion und Trennungen), Solarenergie, Mikrowellen, elektrischen Feldern sowie der Plasma-Technologie interessant.

10. *Welche Effizienzsteigerungen werden durch integrierte Prozesssteuerung mit verbesserten Messtechniken und Dosiereinrichtungen erreicht?*

Neuartige Sensorik kann helfen, z.B. Clogging rechtzeitig zu erkennen und Gegenmaßnahmen zu ergreifen und den Durchsatz bei vorgegebener Produktqualität zu steigern. Ein Ergebnis des F3-Projektes ist, dass sich zwischen 5 und 15 % Einsparungen allein durch verbesserte Messtechniken und Dosiereinrichtungen erreichen lassen.

11. Was sind die Vor- und Nachteile bzw. Potentiale und Grenzen der integrierten Prozesstechnik (für bestehende und neue Anlagen)?

Bestehende Anlagen umzubauen bzw. nachzurüsten präsentiert eine erhebliche Hürde für die Wirtschaftlichkeit. In der Regel lässt sich ein Umbau, der über die stets ins Auge gefasste Energieintegration hinausgeht, nicht rechtfertigen. Insofern lassen sich die Potentiale der integrierten Prozesstechnik eher für neue Prozesse heben. Ergebnis aus Fallstudien des F³-Projektes sowie von Europic (European Process Intensification Centre) waren die folgenden Verbesserungspotentiale (Maximalwerte):

- Zeit bis zur Markteinführung: - 50 %
- Investitionskosten: - 40 %
- Betriebskosten: - 20 %
- Ausbeute: + 20 %
- Abfälle: - 30 %
- Anzahl der Prozessschritte: - 30 %
- Lösungsmiteleinsetz: - 100 % (durch Einsatz eines völlig neu gestalteten Reaktors)
- Energieverbrauch: - 30 % (im Extremfall - 80 %)
- Platzbedarf: - 50 %
- Reaktorvolumen: bis zu Faktor 1.000 kleiner

Die Prozessintensivierung ist im Bereich fluider Phasen viel weiter fortgeschritten als für Feststoffe. Hier fehlt es an einem für die Verarbeitung fluider Phasen bereits existierendem Instrumentarium an Methoden und Tools.

Rahmenbedingungen/Auswirkungen

12. *Welche (politischen) Rahmenbedingungen müssen existieren/geschaffen, welche Hürden müssen gegebenenfalls überwunden werden, um den Einsatz von Flow Chemistry und Prozessintensivierung im Allgemeinen voranzutreiben?*

Wie oben erwähnt muss Flow Chemistry Einzug halten in die technische und akademische Ausbildung und zum Standardinstrument in der chemischen Forschung werden. Darüber hinaus müssen Aufreinigungsschritte und weitere Prozesstechnologie (z.B. Pumpen, Instrumentierung etc.) im angepassten Maßstab und für einen robusten Einsatz verfügbar sein. Wenn der Markt für derartiges Equipment größer wird, dann ergibt sich auch ein „autokatalytischer“ Effekt, da mit dem dann zu erwartenden Sinken der Herstellkosten für Flow Chemistry Equipment aufgrund des Skaleneffektes die Hürde für dessen Einsatz sinkt. Signifikant helfen würde die Publikation von „best practice examples“, die aus der Industrie kommen und als „Leuchttürme“ dienen. Dazu wäre eine „Awareness building action“ notwendig, die durch Politik und/oder Academia initiiert und durch die Industrie mit Beispielen „gefüttert“ wird.

13. *Welche Auswirkungen hat der Ausbau von Prozessintensivierung für den Chemieproduktionsstandort (z. B. auf die Verbundstruktur) NRW?*

NRW zeichnet sich durch eine hohe Dichte an chemischen Unternehmen aus verbunden mit den relevanten Zulieferindustrien. Darüber hinaus wird an zahlreichen Hochschulen Chemie bzw. Chemie- und Bioingenieurwesen gelehrt. Der Ausbau von Prozessintensivierung würde auf den vorhandenen Stärken aufbauen und kann zu einem Alleinstellungsmerkmal dieses Verbundes aus Industrie und Akademia heranwachsen. Schon jetzt unterhalten chemische Firmen, Universitäten und Forschungseinrichtungen in NRW ein dichtes Netzwerk auch mit internationalen Akteuren im Rahmen von Cluster Chemie.NRW, CleanTech, CLIB, Europic und SPIRE. Diese Aktivitäten müssen erhalten und gezielt ausgebaut werden. Dabei ist die internationale Komponente, besonders die Zusammenarbeit mit den Niederlanden und Belgien, von großer Bedeutung.

Ein eher oft nur am Rande betrachteter wichtiger Punkt soll schließlich noch Erwähnung finden. Es gibt in der akademischen Forschung zahlreiche Innovationen z.B. für modular strukturierte, sehr effiziente neue Trennverfahren. Der Brückenschlag zwischen der Forschung und der Anwendung dieser neuen Technologien gelingt aber oft nicht, da die wissenschaftlichen Einrichtungen zu weit weg sind von den relevanten Märkten, das Risiko für die Technologieentwicklung für Firmen (z. B. als start-up) aber zu hoch ist. Zwingend erforderlich ist daher eine Entwicklungsförderung mit dem Ziel, Technologien zur Marktreife zu führen und damit verbunden neue Arbeitsplätze in der in NRW traditionell starken Apparate- und Maschinenfertigung zu schaffen und so Synergien zwischen Partnern aus unterschiedlichen Marktsegmenten zu heben. Aufbauend auf den vorhandenen Stärken in der Prozesstechnik für die chemische und biotechnologische Industrie verfügt NRW über das Potential, sich nachhaltig als Quelle für integrierte, effiziente Prozesstechnologie zu etablieren.