

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 103 (1985)
Heft: 6

Artikel: Innovationstechnik
Autor: Brauer, Heinz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-75718>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Innovationstechnik

Von Heinz Brauer, Berlin

Innovation ist das Schwungrad der Technik, sie verleiht ihr Dynamik. Ohne kontinuierliche Erneuerung, ohne fortlaufende Erneuerung muss die Technik in Erstarrung abgleiten und obsolet werden. Innovation hält die Technik in Bewegung, jedoch nur solange sie selbst in Bewegung ist, gemäss einer etwas grosszügigen Interpretation des πάντα ρεῖ (panta rhei) des Heraklit aus Ephesos. Innovation ist also auch ein Ausweis für schöpferisches Vermögen und Handeln des Menschen.

Neugewonnene wissenschaftliche Erkenntnisse in Ingenieurdisziplinen sollen bewusst für innovative Ziele – hier die Innovation als Realisation des wissenschaftlich Möglichen – nutzbar gemacht werden. Die dabei anzuwendende Methode soll lehrbar und lernbar sein.

Die Innovationstechnik als Methodik des Innovierens bietet der Industrie eine verbesserte oder neue Grundlage zur Planung und systematischen Durchführung stets notwendiger Innovationen. Den Hochschulen erwächst die Verpflichtung, Innovationstechnik zu lehren und die Studenten auf ihre innovativen Aufgaben vorzubereiten. Darüber hinaus sollen die Hochschulen wissenschaftlich begründete Möglichkeiten auch bis zur halbtechnischen Anlage oder bis zur Pilotanlage realisieren können. So erhalten sie die Chance zur verstärkten Mitgestaltung der Technik und werden gleichzeitig in die Verantwortung für die Technik eingebunden.

Basis- und Folgeinnovationen

Basisinnovationen führen zu vollkommen neuartigen Produkten, im Grenzfall zu neuen Industriezweigen. Sie revolutionieren die Technik und führen zur Weiterentwicklung der Technik in grossen Sprüngen. Ihre Integration in die Gesamtentwicklung der Technik und ihre gesellschaftliche Akzeptanz haben zur Folge, dass sie nur in grösseren Zeitabständen auftreten.

Die Geschichte der Industrialisierung zeigt, dass Basisinnovationen und die ausgelösten technologischen Umwandlungen in Schüben auftreten. Zahlreiche Basisinnovationen konzentrieren sich in einer relativ kurzen Zeitspanne und führen zu einer technologischen Revolution. Prof. Mensch [1] hat das Auftreten von Basisinnovationen über 220 Jahre, von 1740 bis 1960, untersucht. Im Bild 1 ist die Häufigkeit von Basisinnovationen über der Zeit aufgetragen. Ausgeprägte Häufigkeitsspitzen kennzeichnen vier Innovationsschübe, die um 1765, 1825, 1885 und 1935 auftraten, also in Abständen von 50 bis 60 Jahren.

Im Innovationsschub um 1765 wurden z.B. die Spinnmaschine (Hargreaves 1767, Arkwright 1769), die Dampfmaschine von James Watt, das Reaktionswasserrad von Segner, das Eisenwalzwerk, die Metallhobelmaschine, die Schwefelsäureproduktion nach dem Bleikammverfahren usw. eingeführt.

Der Innovationsschub um 1825 führte unter anderem zum Aufbau der ersten

Pharmafabriken von Riedel in Berlin und Merk in Darmstadt, der ersten Portlandzementfabrik in Grossbritannien, zum Betrieb des ersten Puddelofens in Rasselstein in Deutschland und auch zur Inbetriebnahme der ersten Eisenbahnstrecke in England von Stockton nach Darlington.

Im nächsten Innovationsschub um 1880 wurden insbesondere die Grossindustrien in den Bereichen Stahl, Chemie und Elektrotechnik aufgebaut, die sich alle auf bedeutende Basisinnovationen stützten. Auch die Kraftfahrzeugindustrie wurde um diese Zeit begründet.

Im letzten der in Bild 1 verzeichneten Innovationsschübe, um 1935, kam es auf der Grundlage bedeutsamer Erfindungen zum Aufbau der Farbfilm-, Ton- und Fernsehindustrie; die Kunststoffindustrie nahm zu dieser Zeit ihren



Nach einem Vortrag vom 12. September 1984 vor der Fachgruppe für Chemie- und Verfahreningenieure FCV des SIA in Basel

Anfang, die synthetischen Waschmittel wurden eingeführt, Helikopter wurden gebaut, der Linienflugverkehr wurde konzipiert, das Radar wurde entwickelt usw.

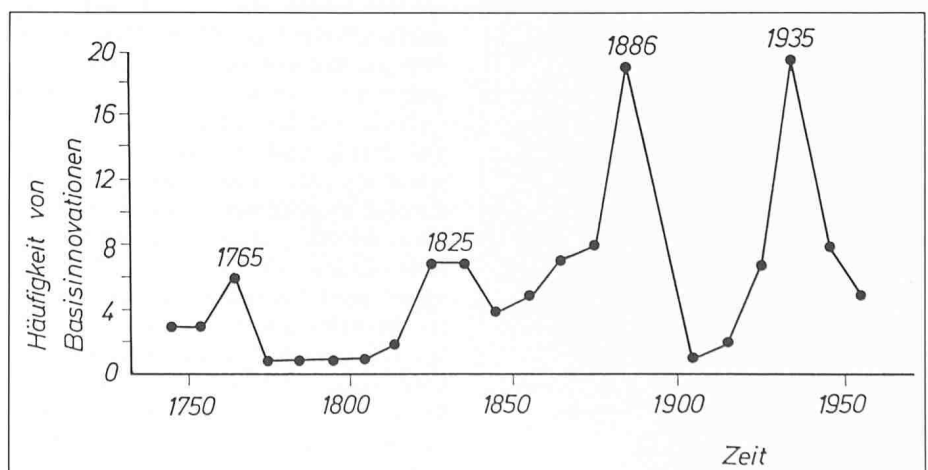
Die Zeiten der Innovationsschübe waren erfüllt von grosser geistiger Dynamik, auch wenn die damit eingeleiteten technologischen Wandlungen oft von den Zeitgenossen fast unbemerkt ihren Weg durch die Zeit begannen. Mensch weist auch darauf hin, dass die Innovationsschübe in Zeiten wirtschaftlicher Depressionen auftraten. Nicht die Hochkonjunktur, sondern die Rezession regt den menschlichen Geist zu erhöhter Aktivität und innovativer Leistung an.

Das zyklische Auftreten der Schübe von Basisinnovationen liess Mensch [1] bereits Mitte der siebziger Jahre darauf hinweisen, dass der nächste Innovationsschub etwa um die Mitte der achtziger Jahre zu erwarten ist. Ohne Zweifel können wir im Jahre 1984 bereits alle Anzeichen dieser neuen Innovationsphase wahrnehmen.

Basisinnovationen

Basisinnovationen stützen sich vorab auf neuartige, grundlegende Erkenntnisse der Ingenieur- und Naturwissenschaften. Die besonders in den letzten hundert Jahren beobachtete Entwick-

Bild 1. Häufigkeit von Basisinnovationen von 1740 bis 1960



lung dieser Wissenschaften hat ihre Voraussetzung für Basisinnovationen immer deutlicher hervortreten lassen. Basisinnovationen erfordern ein grosses Potential an Grundlagenwissen und stützen sich darauf. Wer über dieses Wissen verfügt, besitzt bereits eine der beiden Voraussetzungen für grosse innovative Leistungen. Die zweite Voraussetzung ist der kreative Geist; hierauf wird später noch näher eingegangen. Basisinnovationen entspringen dort, wo ein ausreichend grosses Potential relevanter Grundlagenkenntnisse vorhanden ist. Hochschulinstitute besitzen also zur Einleitung von Basisinnovationen hervorragende Voraussetzungen.

Folgeinnovationen

Die Folgeinnovationen bilden die zweite Gruppe von Innovationen. Jede Basisinnovation wird von einer grossen Zahl von Folgeinnovationen begleitet wie ein Komet, der seinen Schweif nach sich zieht. Die Zeiten zwischen zwei Schüben von Basisinnovationen werden von Folgeinnovationen ausgefüllt.

Folge- oder Ergänzungsinnovationen führen im allgemeinen zur schrittweisen Verbesserung der Produkte. Nach dem revolutionierenden Schritt einer Basisinnovation folgt als quasikontinuierlicher Prozess die Kette der evolutionierenden Folgeinnovationen. Die Folgeinnovationen stützen sich meist auf praktische Erfahrung mit dem Objekt der Basisinnovation. Das grösste Potential an praktischen Erfahrungen liegt zweifellos in den technischen Betrieben vor. Daher werden Folgeinnovationen vornehmlich aus der Praxis stammen.

Eine Analyse vieler technischer Systeme zeigt, dass sich praktisch alle Innovationen in Innovationsketten einordnen lassen, wie es im Bild 2 schematisch angedeutet ist. Dies beweist, dass jede Innovation durch die Analyse von bereits bekannten technischen Systemen beeinflusst oder ihre direkte Folge ist. Jede Innovationskette weist innerhalb des Innovationsnetzes Knotenpunkte

auf, in denen sich Ketten kreuzen. Die Knotenpunktinnovationen sind im allgemeinen mit Basisinnovationen identisch. Demgemäss sind die eine Kette bildenden Innovationsglieder die Folge- oder Ergänzungsinnovationen. Sie schaffen für die Basisinnovationen die zurzeit mögliche und notwendige technische Infrastruktur.

Jede realisierte Innovation hat Bezug zu vorhergegangenen. Aber jede Innovation muss darüber hinaus etwas Neues und Eigenständiges bringen, sonst findet die Innovationskette keine Fortsetzung. Die Innovationshöhe ist selbstverständlich in den Knotenpunkten stets am grössten.

Hochschulen und Innovationstechnik

Die Hochschulen verfügen über das grösste Potential an Grundlagenkenntnissen und können daher als potentielle Wiege von Basisinnovationen betrachtet werden. In der Phase der Industrialisierung des letzten Jahrhunderts haben die Hochschulen für die Chemietechnik schon einmal eine entscheidende Rolle gespielt. Viele Farbstoffe, das Ammoniak für die Kunstdüngerproduktion und viele andere Stoffe wurden zuerst in Hochschullaboratorien synthetisiert, bevor sie in der Industrie produziert wurden.

Die Hochschulen verfügen heute über ein unvergleichlich viel höheres Potential an wissenschaftlichen Erkenntnissen, das als Innovationspotential zu nutzen ist. Darüber hinaus ist die Methodik des Innovierens inzwischen soweit entwickelt, dass innovatorische Forderungen leichter erfüllt werden können. So können die Hochschulen ihren Verpflichtungen gegenüber der Gesellschaft sehr wirksam gerecht werden. Selbstverständlich muss man den Wissenschaftlern, welche die Forschung und Innovation an den Hochschulen tragen, die dafür erforderliche geistige Freiheit gewähren. Denn nur in Freiheit können sie ihren zukunfts-gestaltenden Verpflichtungen gerecht werden, und das mit grösserer Aussicht auf Erfolg und mit geringerem Aufwand als jede andere Institution. Die Erfolge im «Silicon Valley» in Kalifornien, die von jungen Unternehmen erzielt werden, stützen sich auf die innovatorischen Leistungen der Universitäten Berkeley und Stanford. Dieses Beispiel zeigt auch, dass am Ende der innovatorischen Leistungskette eine risiko-, leistungs- und lernbereite Unternehmerpersönlichkeit stehen muss, die den Erfolg auf dem Markt herbeiführt.

Die Hochschulen müssen im ersten Ausbildungsschritt die Studenten bis an die Grenzen unseres heutigen Wissens heranzuführen und ihnen dabei gleichzeitig die Methodik vermitteln, mit der sie selbstständig neues Wissen erarbeiten können. Dieses Wissen ist in den Grundlagen für die praktische Ingenieur-tätigkeit, also in den Ingenieurwissenschaften, zusammengefasst. Die Lehrbarkeit und das Heranzuführen bis an die Grenze unseres heutigen Wissens erfordert immer wieder den Versuch zur Entwicklung verallgemeinerter Gesetze, die Komprimierung unseres Wissens in einer überschaubaren Zahl von Hypothesen, Ansätzen und Gesetzen. Eine solche umfassende Grundlagenlehre erfordert aber auch eine fortschreitende Befreiung von Routineübungen [2], die man durch Verwendung von Computerprogrammen, die man ähnlich wie Skripte ausgibt, erleichtern und verkürzen oder in das Ausbildungsprogramm der Technischen Fachhochschulen verweisen wird.

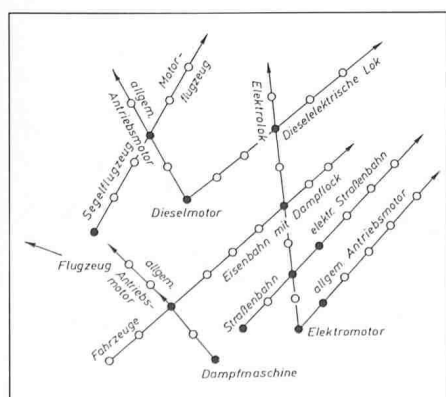
Im zweiten Ausbildungsschritt wird man das kreative Geistespotential der Studenten wecken und durch neuartige Übungen weiterentwickeln. Aufbauend auf den Forschungsergebnissen sind neuartige verfahrenstechnische Geräte und Prozesse zu konzipieren und zu testen, die sich beispielsweise durch gesteigerte Leistung hinsichtlich des Stoff- und Wärmetransports sowie Stoffwandlung je Volumeinheit der Geräte und durch geringeren Energieaufwand auszeichnen. Das Kernstück einer solchen Kreativitätsübung ist eine Erfindung, in der sich auf wissenschaftliche Erkenntnisse gestützte Rationalität und Intuition integrieren.

Die Pflege und Weiterentwicklung sowie die praktische Übung dieses Innovationsprozesses ist eine vermehrt zu erfüllende Aufgabe. Dabei ist Intuition stets einmalig, nicht wiederholbar, nicht kontrollierbar und auch nicht programmierbar und planbar. Im Gegensatz dazu ist die Rationalität höchster Ausdruck für das Nachvollziehbare, das Wiederholbare, das Kontrollierbare und daher auch für das Programmier- und Planbare.

Kreativität erwächst aus dem Widerspruchlichen, aus geistiger Freiheit für die Intuition und geistiger Bindung und Disziplin für die Rationalität. Letztere sorgt dafür, dass die Bäume der Intuition nicht in den Himmel wachsen. Kreativität muss sich in der irdischen Welt entfalten, denn nur hier ist sie dem Menschen dienlich.

Dominiert die Rationalität, so verkümmert die Kreativität. Dominiert hingegen die Intuition, so entgleitet die Krea-

Bild 2. Schema eines aus vermaschten Ketten gebildeten Innovationsnetzes



tivität ins Transzendente und verliert damit jede Bedeutung für die Lösung der realen Probleme. Für sich allein führt weder die Rationalität noch die Intuition zur Innovation und zur Fortentwicklung der Technik.

Der Zusammenhang zwischen Wissenschaft, Innovation und Technik, der im zweiten Abschnitt der Hochschulausbildung in der Bearbeitung praktischer Beispiele erlebt wird, soll im folgenden noch etwas ausführlicher aufgezeigt werden.

Technik, Innovation und Wissenschaft

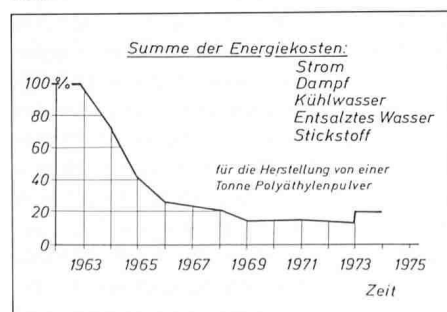
Technik ist der Ausdruck aller methodischen Bemühungen des Menschen, sich der Kräfte sowie der materiellen und immateriellen Ressourcen der Natur zu bedienen. Nach heutigem Verständnis setzt Technik wissenschaftliche Erkenntnisse und deren bewusste Verwendung beim innovatorischen Handeln voraus.

Technik ist in diesem Sinne ein dynamischer Prozess, ist die immer wieder zu erneuernde Schöpfung des Menschen. Neben der Sprache als wichtigstem Mittel zur Kommunikation zwischen Menschen ist die Technik die bedeutsamste kulturelle Leistung des Menschen.

Phasen mangelnder Schöpfungskraft des Menschen lassen die Technik schnell erstarren und obsolet werden. Dabei treibt das sich verlangsamende Schwungrad die Technik noch für eine gewisse Zeit voran. Der Mensch fühlt sich aber nicht mehr als gestaltende und beherrschende Kraft, er fühlt sich zunehmend von der Technik getrieben und schliesslich gar als Sklave der Technik; der Mensch hat seine Schöpfungskraft verloren.

Bild 3 (rechts). Änderung des spezifischen Endenergieverbrauchs in der deutschen chemischen Industrie und der Gesamtindustrie zwischen 1955 und 1976

Bild 4. Energiekosten für die Herstellung einer Tonne Polyäthylenpulver in der Zeit von 1962 bis 1966



Allein der schöpferisch tätige Mensch, der sein geistiges Potential zu kreativem Schaffen einsetzt, vermag Technik zu gestalten. Nur der kreative Mensch vermag die einem dynamischen Prozess stets innewohnenden Zwänge zu überwinden und gewinnt dadurch die Freiheit zu handeln.

Das griechische Wort Technik bedeutet «zur Kunst gehörig». Kunst ebenso wie Künstler werden heute stets mit «schöpferischer Tätigkeit» in Verbindung gebracht. Wir sollten uns bewusst bleiben, dass Technik von Ingenieuren gestaltet wird und dass Ingenieure primär schöpferisch tätig sind. Früher wurde dieses sinnvoll zum Ausdruck gebracht, dass man beeindruckende technische Anlagen oft als «Künste» bezeichnete. Berühmt waren «Wasserkünste» zur Versorgung von Parkanlagen und Springbrunnen, aber auch zum Antrieb von Pumpen in Bergwerken.

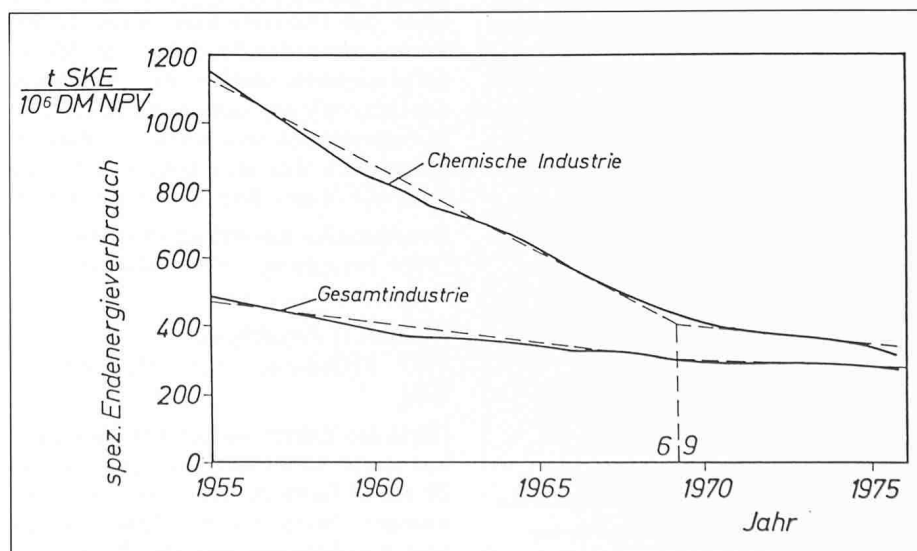
Heute wird der Ingenieur oft als Musterbeispiel des Rationalisten angesehen. Die Ratio allein ist jedoch keine ausreichende Grundlage für schöpferisches Tun; hierzu bedarf es zusätzlich der Intuition. Die heute beobachtete Überbetonung des Rationalen scheint mir einherzugehen mit einer bemerkenswerten Scheu vor schöpferischem Handeln und – was damit auch immer verbunden ist – vor der Verantwortung für dieses Tun. Erinnern wir uns auch daran, dass der handelnde und gestaltende Mensch einer Ethik als Massstab für sein Handeln bedarf, die sich allgemeiner Anerkennung erfreut. Aber auch hiermit steht es heute nicht zum besten.

Wissenschaft soll als Grundlage technischer Innovationen dienen. Die Annahme liegt also nahe, dass die Methoden des wissenschaftlichen und innovatorischen Handelns übereinstimmen oder doch sehr ähnlich seien. Tatsächlich unterscheiden sie sich aber erheblich.

Im Schwerpunkt ist wissenschaftliches Arbeiten stets analytisch, etwas bereits Vorhandenes wird untersucht. Im Gegensatz dazu ist innovatorisches Arbeiten stets kreativ; etwas noch nicht Vorhandenes soll geschaffen werden. Man bedient sich beim kreativen Prozess jedoch aller im Einzelfall nützlichen Erkenntnisse, die mittels analytischer Methoden gewonnen wurden. Die Methoden analytischen und innovatorischen Arbeitens sind also unterschiedlich, wie auch die Arbeitsziele des Wissenschaftlers und des Ingenieurs verschieden sind. Für den Ingenieur sind wissenschaftliche Erkenntnisse, auch wenn er sie selbst erarbeiten muss, nur Hilfsmittel bei seiner innovatorischen Arbeit. Dabei soll aber kein Zweifel bleiben, dass die Qualität dieser Hilfsmittel für die Qualität des innovatorischen Produkts von ausschlaggebender Bedeutung ist. Dieses unterstreicht noch einmal, welch hohen Rang wissenschaftliche Erkenntnisse für technische Innovationen einnehmen.

Die Notwendigkeit von Innovationen zur Fortentwicklung der Technik soll an einigen Beispielen aufgezeigt werden. Bild 3 zeigt nach Elgeti [3] den spezifischen Endenergieverbrauch, gemessen in t SKE (Steinkohleneinheit) je 10^6 NPV (Nettoproduktionsvolumen), der deutschen chemischen Industrie und der Gesamtindustrie von 1955 bis 1976.

In dieser Zeitspanne konnte der spezifische Endenergieverbrauch von 1150 auf 320 t SKE/ 10^6 DM NPV, also auf etwa 28 Prozent, gesenkt werden. Dabei wurde von 1955 bis 1969 der spezifische Energieverbrauch jährlich um rund 50 Einheiten und anschliessend nur noch um 10 Einheiten jährlich gesenkt. Für die Gesamtindustrie sank der spezifische Endenergieverbrauch bis 1976 auf 58 Prozent des Ausgangswertes. Im ersten Zeitabschnitt betrug die jährliche Absenkung etwa 11 Einheiten und im



zweiten Abschnitt etwa 6 Einheiten. Der spezifische Endenergieverbrauch der chemischen Industrie hat sich jenem der Gesamtindustrie stark angenähert. Der hohe Forschungsaufwand der chemischen Industrie hat sich hinsichtlich des Energieverbrauchs nicht mehr ausgezahlt.

Man entnimmt aus Bild 3 ferner, dass die in der chemischen Industrie angewendeten Methoden zur Senkung des spezifischen Endenergieverbrauchs um 1969 weitgehend ausgeschöpft waren, d.h., die zwischen 1955 und 1969 so erfolgreichen Innovationen – offensichtlich Folgeinnovationen – verloren anschliessend ihre Wirkung. Ab 1969 etwa wären Basisinnovationen notwendig gewesen, um den spezifischen Endenergieverbrauch weiter nachhaltig senken zu können.

Diese Überlegungen werden auch durch Angaben von Schlachter [4] bestätigt, die im Bild 4 wiedergegeben sind. Dargestellt sind die Kosten für die bei der Herstellung einer Tonne Polyäthylenpulver insgesamt aufzuwendende Energie, bezogen auf den Ausgangswert von 1962. Bis 1966 konnten die Energiekosten bis auf 25 und bis 1969 auf 14 Prozent gesenkt werden. Anschliessend blieben die Energiekosten praktisch konstant. Vollkommen neuartige Methoden zur Senkung der Energiekosten hätten bereits 1966, spätestens aber 1969 eingeführt werden müssen. Die damit verbundenen Innovationen sind leider unterblieben.

Es überrascht keineswegs, dass von Verfahrensingenieuren in neuerer Zeit kaum bahnbrechende Erfindungen gemacht werden. Die Haupttätigkeit der Verfahrensingenieure beschränkte sich im wesentlichen auf folgende Gebiete:

- Bildung von Prozess-(Produktions-)systemen aus der Integration von Prozesselementen und deren Modellierung,
- Entwicklung zuverlässiger Berechnungsverfahren und Simulationsverfahren für technische Prozesse,
- Entwicklung von Methoden zur sicheren Lösung des Scaling-up-Problems,
- Optimierung technischer Methoden zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit,
- Anpassung vorhandener Geräte an neue prozessspezifische Bedingungen,
- Bau neuer und Erweiterung alter Produktionsanlagen,
- technische Umsetzung von Gesetzen und Verwaltungsvorschriften, insbesondere im Arbeits-

und Umweltschutz, Sicherheit, Humanisierung der Arbeitswelt.

Für strategische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist in diesem Aufgabenprogramm kein Platz vorgesehen. Die Aufgaben sind alle kurzfristiger, bestenfalls einmal mittelfristiger Natur. Diese Aufgabenstruktur entspricht der in überwiegendem Masse in grossen Unternehmen entstandenen Arbeitsteilung zwischen Chemiker und Ingenieur: Der Chemiker entwickelt den Prozess (das Produkt), der Ingenieur sorgt für die Wirtschaftlichkeit des Prozesses (des Produktes).

Die aus dieser Aufgabenteilung anfallenden Aufgaben hat der Verfahrensingenieur mit grossem Erfolg gelöst. Sein Beitrag zur Innovation hielt sich zwangsläufig in bescheidenem Rahmen. Sein geistiges Innovationspotential ist keineswegs ausgeschöpft worden. Hierfür bieten sich noch grosse Entfaltungsmöglichkeiten. Die Nutzung des Innovationspotentials der Verfahrensingenieure ist heute um so mehr geboten, als ein Strukturwandel der Industrie unter Berücksichtigung globaler Gesichtspunkte im Gang ist. Der Verfahrensingenieur wird seine Aufgaben um so besser erfüllen, je besser er mit der Methodik des Innovierens und mit dem Innovationsprozess vertraut ist.

Der Innovationsprozess

Gliederung des Innovationsprozesses

Der Innovationsprozess vollzieht sich immer an einem bestimmten materiellen oder immateriellen Produkt, z.B. einem verfahrenstechnischen Gerät oder einem Prozess. Die Einleitung eines Innovationsprozesses bedarf eines Impulses, ausgelöst etwa durch ein Marktbedürfnis, durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse oder auch durch praktische Erfahrungen. Das Ende des Innovationsprozesses ist erreicht, wenn das Produkt vom Markt aufgenommen worden ist. Die Dauer des Innovationsprozesses kann für Folgeinnovationen sehr kurz, für Basisinnovationen aber sehr lang sein. Einige Beispiele mögen diese Zeitdauer zeigen:

Synthetischer Kautschuk «Neopren»
1906 Erfindung, 1932 Markteinführung;

Kunststoff Polyäthylen
1933 Erfindung, 1956 Markteinführung.

Ohne die Zeiten bis zur Erfindung haben diese Innovationsprozesse bereits 26 und 27 Jahre gedauert. Aber auch bei weniger bedeutsamen Innovationen liegt die Zeitdauer für den Prozess in

der Grössenordnung von 5 bis 10 Jahren.

Schematisch gliedert sich der Innovationsprozess in die nach [5, 6] in der Tabelle 1 angegebenen Stufen. Die Stufen 2 bis 5 des Innovationsprozesses sind als eigentliche Entwicklung zusammengefasst. In besonders enger Weise mit wissenschaftlichen Erkenntnissen verbunden sind die Definition des Zieles der Innovation und die Ideenfindung selbst.

Bedürfnisfeststellung

Ein Bedürfnis ist verhältnismässig einfach festzustellen, wenn es um Folge- oder Verbesserungsinnovationen geht, beispielsweise um Einrichtungen zur leichteren und schnelleren Handhabung von Messgeräten und deren Reparatur. Je weiter eine Innovation jedoch den Charakter einer Basisinnovation annimmt, desto schwieriger wird die Feststellung des Bedürfnisses.

Wenn z.B. das Bedürfnis besteht, Pflanzen vor Erkrankungen zu schützen, dann sollte beschrieben werden, in welchem Zustand die Pflanze erhalten werden sollte. Es sollte vermieden werden, an dieser Stelle bereits bestimmte Mittel zur Schädlingsbekämpfung oder zur Bodenverbesserung zu fordern. Aber auch die Beschreibung bestimmter Züchtungsaufgaben muss unterbleiben. Alles dieses betrifft nicht das originäre Bedürfnis, das in diesem Falle allein an die Pflanze gebunden ist. Die richtige Formulierung des Bedürfnisses erfordert ein hohes Mass an Abstraktion, welche die grösstmögliche geistige Freiheit sichert als Voraussetzung für die volle Entfaltung der menschlichen Kreativität in der nächsten Stufe des Innovationsprozesses.

Zieldefinition

Mit der Zieldefinition beginnt die Entwicklung des innovatorischen Produktes. Seine Qualität und Innovationshöhe, die mit der Erfindungshöhe vergleichbar ist, und seine innovatorische Wirkung auf dem Markt werden entscheidend durch die Qualität der Zieldefinition bestimmt.

Die Zieldefinition erfolgt nach umfassender Analyse der Möglichkeiten zur Deckung des Bedürfnisses, in wiederum sehr abstrakter Form. Für jede Art der Innovation, ob Basis- oder Ergänzungsinnovation, wird der höchstmögliche Abstraktionsgrad verlangt. Ist das Ziel beispielsweise ein neues verfahrenstechnisches Gerät, in dem der Stoffaustausch zwischen zwei flüssigen Phasen mit höchstem Austauschgrad bei geringstem Energieaufwand im kleinstmöglichen Volumen durchgeführt werden kann, so darf keine Festlegung auf

Tabelle 1. Stufen des Innovationsprozesses

1. Bedürfnisfeststellung	Bedürfnisfeststellung
2. Zieldefinition	Entwicklung des innovatorischen Produkts
3. Ideenfindung	
4. Ideenakzeptanz	
5. Problemlösung	
6. Produktrealisierung	Einrichtung des Produktionsprozesses
7. Markteinführung	Markteinführung

Extraktionsapparat oder Extraktionsmaschine vorweggenommen sein. Auch die Art und Weise, wie die Phasen in Kontakt kommen sollen bzw. die Form der Phasengrenzflächen muss frei wählbar bleiben. Alle geräte- und prozesstechnischen Details müssen noch offengehalten werden.

Dem schöpferischen Geist dürfen keine Fesseln angelegt werden: Kreativität entfaltet sich am wirkungsvollsten in voller Freiheit. Sorgfältig muss daher beachtet werden, dass mit dem innovatorischen Ziel niemals gleichzeitig auch der Weg vorgegeben ist, auf dem es anzusteuern ist. Die Kopplung der Beschreibung von Ziel und Weg dirigiert den geistigen Akt so, dass das Produkt bereits weitgehend festgelegt ist.

In der Praxis machen Vorgesetzte häufig den Fehler, den Mitarbeitern nicht nur das Ziel der Arbeit, sondern auch den einzuschlagenden Weg vorzuschreiben. So dienen die Mitarbeiter dem Vorgesetzten bloss zur Realisierung seiner eigenen Ideen. Das kreative Potential der Mitarbeiter bleibt ungenutzt und wird unter diesen Arbeitsbedingungen sogar verkümmern. Die Definition des Ziels muss sicherstellen, dass es auf denkbar vielen Wegen erreicht werden kann. Nur dies gewährleistet die Entfaltung der Kreativität der Mitarbeiter. Selbstverständlich fordert dieses Vorgehen Vertrauen in den Mitarbeiter und eine gewisse Risikobereitschaft. Wer jedoch den Erfolg anstrebt, darf das Risiko nicht scheuen. Erfolg und Risiko sind untrennbare Partner im Innovationsprozess.

Ideenfindung

Gliederung der Verfahren zur Ideenfindung

Mit der Ideenfindung kommt das innovatorische Produkt in die Konzeptionsphase. Das Produkt beginnt im geistigen Raum Gestalt anzunehmen. Um die Ideenfindung nicht allein dem Zufall zu überlassen, wurden im Verlauf vieljähriger praktischer Erfahrungen fünf grosse Gruppen von Verfahren entwickelt (Tabelle 2).

Die heuristischen Verfahren

Die ersten vier Verfahrensgruppen in der Tabelle 2 sind im wissenschaftlichen Sinn nicht «exakte», sondern «heuristische» Verfahren; sie führen nicht auf direktem Weg zwangsläufig zu einer Idee. Diese Verfahren geben Anregungen, die zu neuen Ideen führen können. Der menschliche Geist wird in einen Zustand *zielgerichteten* kreativen Denkens versetzt.

Ideenfindung erfordert hohe geistige Konzentration auf das abstrakt definierte Ziel und gleichzeitig eine starke

geistige Beweglichkeit, mit der das zunächst vollkommen unfokussierte Ziel umkreist wird. Es muss je nach der Art des Ziels keineswegs so sein, dass auf Anhieb das gesamte Zielobjekt erfasst wird.

Die heuristischen Verfahren werden gemäss ihrer Methodik stets von Gruppen von Menschen angewendet [5]. Innovationsideen werden aber nicht nur von Gruppen gefunden; ganz im Gegenteil, die bemerkenswertesten stammen von Einzelgängern. Nach Untersuchungen in den USA und Grossbritannien stammen 70 bis 80 Prozent aller bedeutenden Erfindungen von Einzelgängern. Genie hat sich nie als Gruppe manifestiert.

Die Arbeit in der Gruppe führt nicht nur zu einem spezifischen Gruppenergebnis, sondern vermag auch den zuhörenden Einzelgänger geistig anzuregen und zu befruchten. Auch das Genie bedarf der Selbst- oder der Fremdanregung zum geistigen Tun.

Die Gruppe als anregende Institution zur Ideenfindung birgt auch Gefahren. Die Anregung kann leicht in ihr Gegenteil umschlagen, wenn «Killerphrasen» in die Diskussion geworfen werden wie «Ist alles schon dagewesen», «Etwas grundlegend Neues gibt es nicht mehr», «Wir wollen doch realistisch bleiben», «Gehört doch nicht hierher» usw. Solches muss in der Gruppenarbeit absolutes Tabu bleiben.

Bei den konventionellen Verfahren zur Ideenfindung werden bekannte technische und biologische Systeme auf Funktionszusammenhänge, Funktionsabläufe und Funktionsnotwendigkeiten analysiert, um daraus Anregungen für Weiterentwicklungen zu erhalten. Im allgemeinen wird dieser Weg zu Folgeinnovationen führen.

Eine Analyse zeigt, dass sich alle Innovationen in ein aus zahllosen vermaschten Innovationsketten aufgebautes Innovationsnetz einordnen lassen. Bild 2 zeigt ein solches Netz stark vereinfacht. Die eine Innovationskette bildenden Innovationsglieder sind die bekannten Ergänzungs-, Folge- oder Fortsetzungsinnovationen. Jede Kette hat ihren Ursprung in einer Basisinnovation, die auch in einem Knotenpunkt liegen kann. Folgeinnovationen schaffen oft erst die für eine Basisinnovation erforderliche technische Infrastruktur.

Es gibt keinen unabhängigen Teilbereich der Technik, aber auch keine absolut unabhängige Innovation. Jede Innovation findet ihren Platz in einer Kette und somit im Innovationsnetz. Sie stützt sich auf vorhandene technische Systeme und weist gleichzeitig den Weg zu ihrer Vervollkommenung durch weitere Innovationen.

Die *intuitiven Verfahren* stimulieren die Kreativität durch lockere Gruppendiskussion. Die Gruppendynamik lässt den Ideenfindungsprozess um so fruchtbarer werden, je besser die Gruppe aus Fachleuten und kompetenten Laien zusammengesetzt ist. Motor einer Entwicklung sind oft gerade die unbefangenen Äusserungen dieser Laien, während die Beiträge des Spezialisten eher einen hemmenden Einfluss ausüben können.

Ausgehend vom Brainstorming zur Synektik wird der Zufall bei der Ideenfindung bewusst eingeschränkt, indem eine tragende Idee zielgerichtet systematischer weiterentwickelt wird. Natürlich kann dies die Zahl der tragenden Ideen, die hervorgebracht werden, auch vermindern.

Bei den *diskursiven Verfahren* erfolgt die Zielannäherung in einer Folge logischer Teilschritte. Dadurch wird der Prozess der Ideenfindung wiederholbar und kontrollierbar. Die Folge ist jedoch die Gefahr, dass die Ratio den Prozess beherrscht und die Intuition verdrängt. Kreativität setzt aber gerade die Integration von Rationalität und Intuition voraus.

Die experimentellen Verfahren zur Ideenfindung werden häufig bei der Suche nach neuen Antibiotika, Chemotherapeutika, Pflanzenschutzmitteln und auch Farbstoffen angewendet. Trotz ausgeklügelter Suchmethoden ist die Ausfallquote bei diesen Verfahren ausserordentlich gross.

Das wissenschaftliche Verfahren

Dieses Verfahren ermöglicht nach Erfahrung des Verfassers die grössten Erfolge. Wissenschaftliche Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Ideenfindung. Das wissenschaftliche Verfahren zur Ideenfindung zeichnet sich durch einen hohen Grad zielgerichteten Denkens aus. Dennoch überwiegt die Ratio nicht, auch die Intuition erhält den ihr

Tabelle 2. Verfahren der Ideenfindung

- | |
|---|
| 1. Konventionelle Verfahren |
| 1.1 Analyse des Schrifttums einschliesslich Patente |
| 1.2 Analyse bekannter technischer Systeme |
| 1.3 Analyse biologischer Systeme |
| 1.4 Analyse von Innovationsnetzen |
| 2. Intuitive Verfahren |
| 2.1 Brainstorming |
| 2.2 635-Methode |
| 2.3 Delphi-Methode |
| 2.4 Synektik |
| 3. Diskursive Verfahren |
| 3.1 Morphologie |
| 3.2 Relevanzbäume |
| 3.3 Futurologische Marktforschung |
| 4. Experimentelle Verfahren |
| 5. Das wissenschaftliche Verfahren |

zukommenden Raum. Die Ratio – vertreten durch die wissenschaftlichen Erkenntnisse – setzt den Ideenfindungsprozess in Gang und hält ihn zunächst in Bewegung. Damit wird der Intuition der anregende Boden bereitet. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse bewahren den geistigen Prozess vor ein Abgleiten in die Leere und fokussieren ihn disziplinierend auf das gesteckte Ziel. Die Intuition wird von möglichen Nebenwegen abgehalten und immer wieder auf das Ziel gerichtet.

Das Ziel verfahrenstechnischer Innovationen ist stets das prozessgerechte Gerät und der gerätgerechte Prozess, damit stets der bestmögliche Prozess im bestmöglichen Gerät abläuft. Der Prozess bestimmt die Form des Gerätes ebenso wie das Gerät den Ablauf des Prozesses bestimmt. Gerät und Prozess bilden eine untrennbare Einheit.

Gliederung des wissenschaftlichen Verfahrens

Das wissenschaftliche Verfahren verläuft in sechs zeitlich getrennten Phasen [7], die in Tabelle 3 umrissen sind. Für jede Phase werden im folgenden Erläuterungen gegeben, die an die spezifischen Belange verfahrenstechnischer Prozesse und Geräte, insbesondere an Stoffaustauschgeräte und Reaktoren, gebunden sind.

Technisch-wirtschaftliche Grundanforderungen an Zielprozess und -gerät

Einige verhältnismässig allgemeingültige Grundanforderungen sind folgende:

1. Geringer Materialaufwand für das Gerät
2. Einfache Form des Gerätes
3. Wartungs- und reparaturgerechte Gestaltung des Gerätes
4. Emissionsdichte Gestaltung des Gerätes
5. Geringes Bauvolumen des Gerätes
6. Geringer Grundflächenbedarf des Gerätes
7. Aufbau des Gerätes aus Grundelementen
8. Einfache geometrische und prozessgerechte Form der Grundelemente
9. Reihen- und Parallelschaltung der Grundelemente
10. Eindeutigkeit der prozesstechnischen Funktionen für jedes Element des Gerätes
11. Weitgehende Vermeidung von Scaling-up-Problemen

12. Hohe Zuverlässigkeit und Sicherheit des Gerätes
13. Einfache Inbetriebnahme und Abschaltung des Gerätes
14. Grosser Belastungsbereich des Gerätes
15. Geringer Rohstoffaufwand für den Prozess
16. Geringer Aufwand an Luft und Wasser
17. Grösstmögliche Umwandlung der Rohstoffe in Zielprodukte
18. Einfache Weiterbehandlung der Abprodukte
19. Stoffwandlung bei möglichst niedriger Temperatur
20. Stoffwandlung in möglichst kurzen Zeiten
21. Zuverlässige Berechnung von Prozess und Gerät

Wissenschaftliche Grundlagen für Zielprozess und -gerät

Die wissenschaftlichen Grundlagen von Stoffwandlungsprozessen und der dafür notwendigen Geräte betreffen physikalische, chemische und biologische Phänomene. Nur einige von allgemeiner Bedeutung für hohen Stoffumsatz sind hier angegeben:

1. Grosse Phasengrenzfläche je Volumeneinheit für die am Prozess beteiligten Phasen
2. Periodische Erneuerung der Phasengrenzfläche
3. Periodische und aperiodische Deformation der Phasengrenzfläche
4. Erzeugung dünner Fluidschichten als Film und Lamellen
5. Erzeugung dünner Grenzschichten
6. Erzeugung stationärer Wirbel mit kontinuierlichem Durchfluss
7. Erzeugung instationärer Wirbel
8. Erzeugung periodischer Anlaufvorgänge
9. Erzeugung von Staupunktströmungen
10. Weitgehende Konstanz von Geschwindigkeit, Temperatur und Konzentration im durchströmten Querschnitt
11. Funktionsgerechte Verteilung der beteiligten Phasen über den jeweiligen Querschnitt
12. Enge Verweilzeitverteilung der beteiligten Phasen
13. Nutzung aller Formen der Turbulenz, Reynolds-Turbulenz, Deformationsturbulenz, Schwarturbulenz, Grenzflächenturbulenz
14. Nutzung möglichst kleiner fester und fluider Partikel
15. Nutzung der mechanischen Aktivierbarkeit der Oberfläche fester Partikel
16. Erzeugung kleiner Agglomerate aus Mikroorganismen oder von Einzelorganismen
17. Mechanische Aktivierung von Mikroorganismen
18. Vermeidung von grossräumigen Strömungen
19. Vermeidung von grossflächigen Strömungen
20. Vermeidung unerwünschter Kreislaufströmungen
21. Gleichmässige Energieverteilung im Gerätevolumen

Analyse relevanter, bekannter Prozesse und Geräte

Je sorgfältiger die wissenschaftlichen Grundlagen für Zielprozess und -gerät durchdacht sind, desto besser vorbereitet wird man die Analyse bereits bekannter Prozesse durchführen, und desto lehrreicher wird sie sein. Auch neue Erkenntnisse können dabei auftauchen, die zur Ausweitung der wissenschaftlichen Grundlagen für das Zielobjekt beitragen. Man wird ferner Anregungen für verbesserte Prozess- und Gerätekonzeptionen erhalten und Innovationsketten aufdecken. Deren Einordnung in ein Innovationsnetz, insbesondere ihre Verbindung mit anderen Innovationsketten, wird neuartige Möglichkeiten für die Konzeption des Zielobjektes aufzeigen oder Anregungen dazu liefern.

Die Ergebnisse dieser Analyse sowie die wissenschaftlichen Grundlagen, verbunden mit den allgemeinen technisch-wirtschaftlichen Anforderungen erlauben das Herausarbeiten von Konsequenzen als Meilensteine auf dem Weg zum Zielobjekt. Sie erleichtern der Intuition das Hervortreten aus dem Nebel des Unterbewusstseins.

Inkubation

Nach dem Sammeln aller technisch-wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Informationen sowie der daraus folgenden Konsequenzen beginnt die Inkubation. Es ist die Zeit, in der die Realisation des Innovationszieles heranreift. Dieser Reifeprozess sollte in jedem Falle ausreichend lange Phasen entspannten geistigen Engagements haben, die sich sowohl im Unterbewusstsein als auch im Oberbewusstsein abspielen können, kurz, bewusst herbeigeführte Unterbrechungen können den Ablauf des Reifeprozesses beschleunigen. Die Meilensteine werden wieder ins Bewusstsein zurückgeführt und erneut auf ihre Bedeutung überprüft. Der menschliche Geist wird auf das Innovationsziel fokussiert und treibt dabei den Ideenfindungsprozess aus eigener Kraft voran. Dieser verläuft um so erfolgreicher, je grösser die Motivation zum kreativen Tun ist, je grösser der Drang des Individuums zur Entfaltung seiner ureigenen Möglichkeiten ist. In diesem

Tabelle 3. Die Phasen des wissenschaftlichen Verfahrens

1. Phase	Formulierung technisch-wirtschaftlicher Grundanforderungen an Zielprozess und -gerät
2. Phase	Zusammenstellung und Überprüfung aller für Zielprozess und -Gerät bedeutsamen wissenschaftlichen Erkenntnisse und der daraus zu folgendernden Konsequenzen
3. Phase	Analyse bereits bekannter Prozesse und Geräte, die für das Innovationsziel von Bedeutung sind und die daraus ableitbaren Konsequenzen. (Aufdeckung von Innovationsketten und ihre Einordnung in das Innovationsnetz.)
4. Phase	Inkubation – Heranreifen der Realisation des Innovationszieles
5. Phase	Inspiration – Objektivierung des Innovationszieles. (Beschreibung eines ersten Lösungskonzeptes.)
6. Phase	Überprüfung des Lösungskonzeptes mittels wissenschaftlicher, technischer und wirtschaftlicher Erkenntnisse und Bedingungen.

Tabelle 4. Beispiele von Prozess- und Gerätearten

Prozesse, die in Füllkörperkolonnen durchgeführt werden:	Geräte, in denen die Rektifikation durchgeführt wird:
1. Rektifikation 2. Absorption 3. Adsorption 4. Desorption 5. Trocknen 6. Wärmeaustausch	1. Bodenkolonnen 2. Füllkörperkolonnen 3. Filmkolonnen 4. Blaskolonnen

Drang unterscheiden sich die Individuen; Kreativität ist ein individuelles Merkmal und Erlebnis.

Während der Inkubationszeit müssen die Phasen geistiger Entspannung mit solchen hoher geistiger Konzentration und Aktivität abwechseln. Durch geistige Passivität wurde noch keine Idee geboren.

Inspiration – Konzeption des Zielobjekts

Am Ende der Inkubationszeit ergibt sich – häufig ohne erkennbare Anstrengung – eine erste oder auch bereits die endgültige Konzeption des Zielobjekts als Heureka-Erlebnis. Grundsätzlich muss man damit rechnen, dass bereits im Verlauf zeichnerischer und schriftlicher Festlegung das Zielobjekt Verbesserungen erfährt. Es ist wichtig, jede Inspiration sofort skizzenhaft festzulegen. Nichts vermag die Inspiration erfolgreicher zur Realisation von Ideen zu führen als eine zeichnerische Skizze und der Versuch einer sorgfältigen Beschreibung. Dass solche Notizen und Skizzen auch bei einer späteren Patentanmeldung bzw. -verteidigung wertvoll sein können, sei nur am Rande erwähnt. Das Ergebnis der Intuition wird durch die Ratio festgehalten und weiter ausgebaut.

Überprüfung des Lösungskonzeptes

Sobald die erste Konzeption des Zielobjekts vorliegt, beginnt die konsequente Überprüfung ihrer Qualität, wobei die Rationalität wieder voll zur Geltung kommt. Die technisch-wirtschaftlichen Grundanforderungen sowie alle wissenschaftlich begründeten Erkenntnisse dienen bei der Prüfung als Massstäbe. Es ist keineswegs gewährleistet, dass im intuitiven Abschnitt des Ideenfindungsprozesses alle rational begründeten Meilensteine auch tatsächlich beobachtet werden. Intuition und Rationalität müssen immer wieder zusammengeführt werden.

Entwicklung verfahrenstechnischer Geräte

Stoff- und Energiewandlungen werden in verfahrenstechnischen Geräten durchgeführt. Weisen die Geräte keine bewegten Teile auf, so spricht man von Apparaten. Geräte mit bewegten Teilen sind Maschinen. Beispielsweise sind Füllkörper-, Boden- und Blasenkolonnen verfahrenstechnische Apparate. Rührreaktoren, Zentrifugen und Kugelmühlen sind Beispiele für verfahrenstechnische Maschinen.

Die Anwendung der Methoden der Innovationstechnik auf die Entwicklung

neuer Geräte erhält über den Einzelfall hinaus Bedeutung, wenn die Geräteentwicklung weitgehend losgelöst vom speziellen Prozess erfolgen kann. In diesem Sinne ist eine weitgehend prozessunabhängige Geräteentwicklung gut möglich.

Die über Jahrzehnte gesammelten Erfahrungen zeigen, dass jede Grundoperation in sehr verschiedenartigen Geräten durchgeführt und andererseits jedes Gerät zur Durchführung mehrerer Grundoperationen verwendet werden kann. Die Beispiele in der Tabelle 4 verdeutlichen dies.

So wenig wie die Füllkörperkolonne nur für einen Prozess optimal ist, so wenig ist die Rektifikation optimal nur in einem Gerätetyp durchführbar. Es ist also gerechtfertigt, eine weitgehend geräteunabhängige Prozessentwicklung und eine ebenso weitgehend prozessunabhängige Geräteentwicklung zu betreiben. In den industriellen Forschungs- und Entwicklungsabteilungen für Verfahrenstechnik wird das Bedürfnis nach prozessunabhängiger Geräteentwicklung noch kaum erkannt.

Selbstverständlich wird aber geräteunabhängige Prozessentwicklung – schwerpunktmässig auf der Seite der Chemie – anerkannt und praktisch betrieben. Zur Steigerung der Leistungskraft der Stoffwandlungsindustrien müssen die Verfahreningenieure lernen, eine Aufgabe zu erfüllen, für die sie die günstigsten Voraussetzungen mitbringen. Welche Erfolge der Verfahreningenieur dabei erzielen kann, zeigt der letzte Abschnitt.

Geräteinnovationen

Zwei Beispiele von Geräteinnovationen illustrieren die praktische Anwendung der erörterten Innovationstechnik. Im Vergleich zu bekannten Geräten zeichnen sich die neuen dadurch aus, dass die Stoffaustauschleistung je Volumeneinheit des Gerätes um mindestens einen Faktor 10 grösser oder die erforderliche Energie um den gleichen Faktor kleiner ist.

Der Staustrahlreaktor [8]

Vom gesamten Innovationsprozess seien hier nur die Zieldefinition und die Ideenfindung beschrieben.

Zieldefinition

Für die in der Praxis häufig angewendeten Homogenisier- und Dispergierprozesse ist ein neues Gerät zu entwickeln. Zur Vereinfachung werden nur die für die Homogenisierung wichtigen Gesichtspunkte beachtet. Der Prozess soll

absatzweise durchgeführt werden. Das Gerät soll sich im Vergleich zu den herkömmlichen auszeichnen durch

- erheblich geringeren Energieaufwand,
- wesentlich verbesserte Energieverteilung im Gerät und
- einfacheres Scaling-up.

Ideenfindung

Wie in der Tabelle 3 läuft die Ideenfindung in 6 Phasen ab.

1. Phase: Festlegen der technisch-wirtschaftlichen Grundanforderungen an Zielprozess und -gerät.

- 1.1 Die erforderliche Mischzeit soll möglichst kurz sein, um eine gegebene Produktion mit geringem Gerätevolumen zu gewährleisten.
- 1.2 Die notwendige Energie soll möglichst gering sein.
- 1.3 Scaling-up-Probleme sollen weitgehend vermieden werden.
- 1.4 Das Gerät soll leicht zu füllen und zu entleeren sein.
- 1.5 Das Gerät soll leicht zu reinigen sein.
- 1.6 Gerät und Prozess sollen berechenbar sein.

2. Phase: Zusammenstellung der wissenschaftlichen Grundlagen für Zielprozess und -gerät.

- 2.1 Erzeugung einer grossen Phasengrenzfläche zwischen den zu mischenden Flüssigkeiten durch Bildung dünner Fluidschichten oder kleiner Tropfen zur Vorbereitung des folgenden turbulenten und molekularen Austauschprozesses.
- 2.2 Häufige Erneuerung der Phasengrenzfläche, um diffusionshemmende grenzflächenaktive Stoffe zu beseitigen, die beteiligten Phasen zu durchmischen und für den Austauschprozess neue Anlaufvorgänge zu schaffen.
- 2.3 Gleichmässige Verteilung der aufgelösten Phasen im Mischgerät, damit das Gerätevolumen tatsächlich genutzt wird.
- 2.4 Erzeugung und laufende Anfachung der Turbulenz zur Förderung des Austauschprozesses zwischen den beteiligten Phasen.
- 2.5 Gewährleistung einer definierten Strömung im gesamten Gefässvolumen, die dem Mischprozess funktional gerecht wird und alle unnötigen Bewegungen vermeidet.
- 2.6 Möglichst gleichmässiger Verlauf des Mischprozesses im gesamten Gefässvolumen, damit die Mischzeit dem funktionalen Minimum nahekommt.
- 2.7 Anwendung der Staupunktströmung, da im Staupunktbereich der Austauschprozess am intensivsten ist.
- 2.8 Anwendung der Strahlströmung, da am Strahlrand sehr starke turbulente Austauschprozesse auftreten. Die Strahlströmung lässt sich grundsätzlich mit der Staupunktströmung verbinden.

3. Phase: Analyse relevanter bekannter Prozesse und Geräte.

Die Analyse wird um so erfolgreicher sein, je umfassender die in der vorausgegangenen Phase zusammengestellten wissenschaftlichen Grundlagen für das Zielobjekt verfügbar sind. Analysiert wird das übliche Mischsystem, das im Bild 5 schematisch dargestellt ist. Als Rührorgan dient ein Turbinenrührer. Die wichtigsten Ergebnisse der Analyse sind folgende:

Die dem Rührer zugeführte Energie wird über seine Oberfläche und Kanten (näherungsweise über die Oberfläche

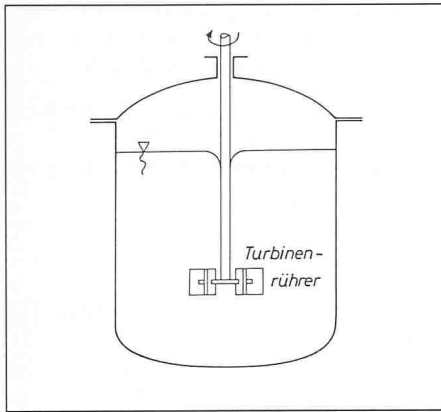


Bild 5. Schema eines konventionellen Mischgerätes

Bild 7. Verteilung der von einem Rührer erzeugten Reibungswärme je Zeit- und Volumeneinheit

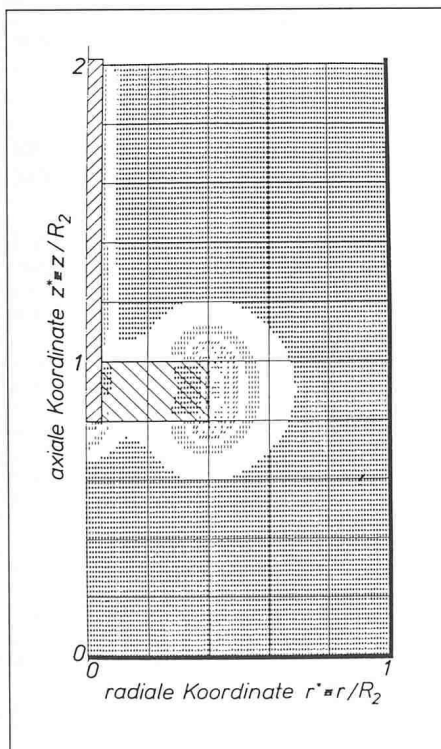
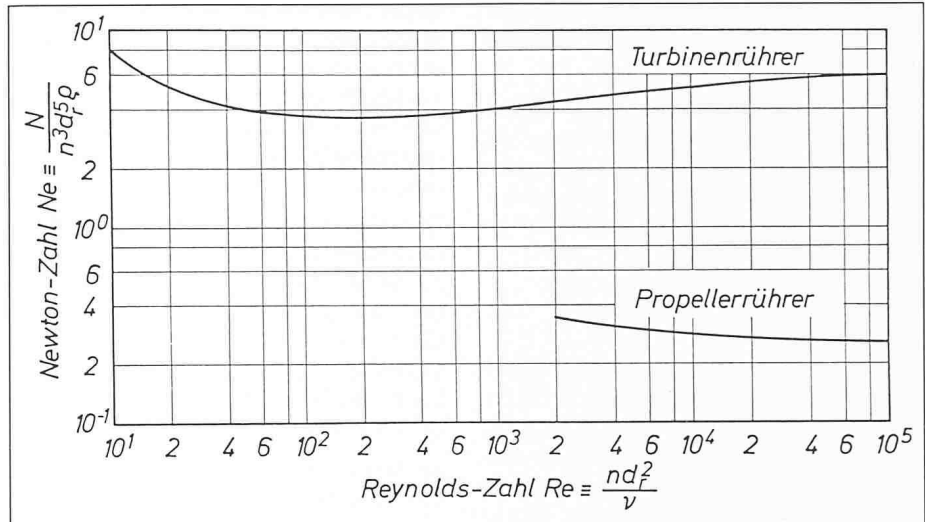
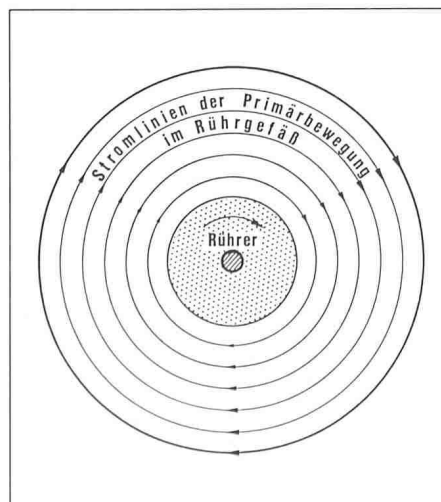


Bild 8. Stromlinien der von einem Rührer erzeugten Primärströmung

Bild 6. Newton-Zahl Ne in Funktion der Reynolds-Zahl Re für einen Turbinenrührer im Gefäss mit Strombrecher und einen Propellerrührer im Gefäss ohne Strombrecher

des Rotationsvolumens des Rührers) an die Flüssigkeit übertragen [9].

Die für die Rührerleistung massgebende Newton-Zahl Ne ist im Bild 6 über der Reynolds-Zahl Re für einen Turbinenrührer und einen Propellerrührer dargestellt. Bei $Re = 10^4$ ist für den Turbinenrührer $Ne = 5$ und für den Propellerrührer $Ne = 0,3$ [8, 9].

Die vom Rührer übertragene Leistung dient zur Erzeugung und Aufrechterhaltung der Flüssigkeitsbewegung. Sie setzt sich aus einer Primär- und einer Sekundärbewegung zusammen, die zusätzlich – abhängig von Form und Bewegung des Rührorgans – von verschiedenartigen Wirbeln überlagert ist. Die kinetische Energie der Strömung wird schliesslich in Wärme umgewandelt. Bild 7 zeigt die je Zeit- und Volumeneinheit vom Rührer erzeugte Reibungswärme in dimensionsloser Form. Sie ist auf den rührernahen Bereich beschränkt [10].

Vom Rührer wird in der Flüssigkeit eine Rotationsbewegung, die Primärströmung, erzeugt. Bild 8 zeigt die Stromlinien der Primärströmung. Es sind Kreisbahnen mit konstantem Radius und konstanter Umfangsgeschwindigkeit des Fluids. Die Primärströmung trägt somit nicht direkt zur Vermischung der Fluide bei [8, 9].

Durch die Rotationsbewegung des Fluids werden Zentrifugalkräfte erzeugt, die eine Sekundärströmung erzwingen, die in den Bildern 9 und 10 für $Re_{12} = 1$ und 1000 angegeben ist. Diese Strömung hat Geschwindigkeitskomponenten in radialer und axialer Richtung und trägt daher zur Durchmischung der Fluide bei [8].

Der Volumenstrom der Sekundärströmung \dot{V}_s^* , der für den Mischprozess alleine von Bedeutung ist, ist gemäss Bild 11 stets kleiner als der Volumenstrom

der Primärströmung \dot{V}_p^* . Im günstigsten Falle wird das Verhältnis $\dot{V}_s^*/\dot{V}_p^* \approx 0,6$ [8].

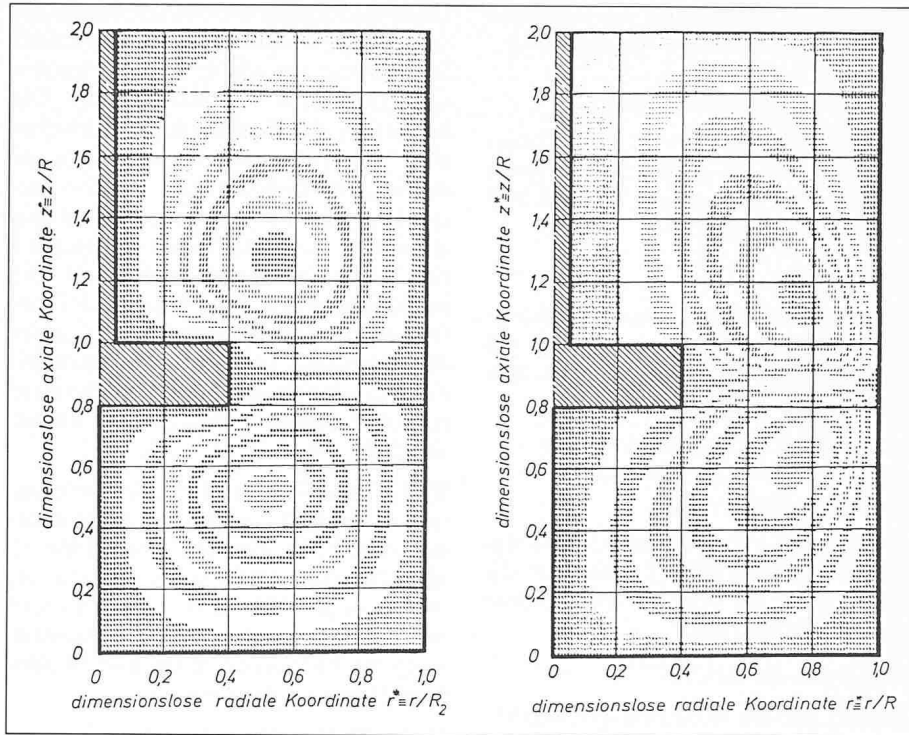
Die in der Sekundärströmung enthaltene Energie E_s^* ist demgemäss (siehe Bild 12) auch erheblich geringer als die in der Primärströmung E_p^* . Das Energieverhältnis erreicht maximal den Wert $E_s^*/E_p^* \approx 0,2$ [8]. Die vom Rührer dem Fluid zugeführte Energie geht also vornehmlich in die für den Mischprozess wertlose Primärströmung.

Die Energieverteilung ist im herkömmlichen Mischgefäss sehr ungleichförmig. Einen Anhalt von der Ungleichförmigkeit vermittelt das im Bild 13 angegebene Temperaturfeld [10]. Die Ungleichförmigkeit kann durch Turbulenz gemindert, aber niemals beseitigt werden.

Der Zusammenhang zwischen der aufzuwendenden Rührerleistung N und der zur Erzielung einer bestimmten Mischgüte erforderlichen Zeit t ist in dimensionsloser Form im Bild 14 dargestellt [8]. Die Kurven b und c gelten für Mischgefässe ohne Strombrecher mit einem Propeller- und einem Turbinenrührer, während Kurve d für ein Mischgefäss mit Strombrecher und Turbinenrührer gilt. Kurve e soll nach Mersmann und Mitarbeitern [11] eine untere Grenzkurve darstellen.

4. Phase: Inkubation

Der im geistigen Entspannungszustand, teilweise im Unterbewusstsein verlaufende Reifeprozess bedarf der Zielorientierung. Hierzu dienen als Anhaltspunkte die technisch-wirtschaftlichen Anforderungen an das Zielobjekt und die Konsequenzen aus den relevanten wissenschaftlichen Erkenntnissen. Als zweckmässig erweist es sich jedoch, diese auf einige wenige Kernsätze zu verdichten. Für den Mischprozess ergeben sich folgende Kernsätze:



Bilder 9. und 10. Stromlinien der von einem Rührer erzeugten Sekundärströmung für die Reynolds-Zahl $Re_{12} = 1$ und 1000

- Möglichst gleichmässige Energieverteilung im gesamten Gerätevolumen.
- Möglichst vollkommene Ausnutzung der zugeführten Energie für den Mischprozess.
- Weitgehende Vermeidung von Rotationsbewegungen in der Flüssigkeit.

5. Phase: Konzeption des Zielobjektes

Jeder geistige Einfall muss unmittelbar zeichnerisch und/oder schriftlich festgehalten werden. Die hierdurch erreichte geistige Konzentration auf das Zielobjekt ist seiner Realisierung förderlich.

Von den Konzepten, die für das geplante Mischgerät näher durchdacht wurden, soll hier nur jenes behandelt werden, das schliesslich realisiert wurde. Die Entscheidung wurde allein auf Grund der Einfachheit der Energiezuführung getroffen, wodurch natürlich eine Reihe von Kompromissen im Zusammenhang mit den anderen Anforderungen geschlossen werden mussten.

Nach dem Grundkonzept des neuen Mischgerätes (Bild 15) sollen zwei Fluidstrahlen in einer Staufläche aufeinanderprallen (Bild 15a). Die Staufläche ist fluiddynamisch instabil und führt stochastische Bewegungen aus, die zu beiden Seiten der Staufläche stochastische Bewegungen in den Strahlfluiden auslösen, welche den turbulenten Mischraum (Bild 15b) ausfüllen. Innerhalb dieses Mischraumes wird sich die mit den Strahlen zugeführte Energie recht gleichmässig verteilen.

Die Grösse des turbulenten Mischraumes hängt von der Intensität der durch

die stochastische Deformation der Staufläche erzeugten Turbulenz ab. Sie lässt sich mit Sicherheit nur experimentell bestimmen. Für die Gestaltung des Mischgerätes erweist sich die Erzeugung der Fluidstrahlen als besonders wichtig.

Im Bild 16 ist die Gesamtkonzeption des Mischgerätes schematisch dargestellt. Hierin ist angedeutet, dass die Strahlen mit Hilfe von Propellern erzeugt werden, die in Leitrohren angeordnet sind. Diese Strahlen weisen nebst der axialen Strömung eine überlagerte Rotationsströmung auf, deren Drehrichtung jedoch entgegengesetzt ist. Dadurch wird die Instabilität und die damit verbundene Deformation der Phasengrenzfläche verstärkt. Die in den Strahlen enthaltene Rotationsbewegung kommt der Turbulenz im Mischraum daher noch zugute.

6. Phase: Überprüfung des Lösungskonzeptes

Das nach diesem Prinzip gebaute Mischgerät wird Staustrahlreaktor genannt. Das für experimentelle Untersuchungen verwendete Gerät weist einen Durchmesser von 0,3 m und eine Länge von 0,6 m auf. Die gemessene Rührerleistung N ist über der Mischzeit t in dimensionsloser Form im Bild 14 aufgetragen. Die Messwerte werden durch Kurve a ausgeglichen.

Aus Bild 14 geht hervor, dass bei gleicher angenommener Mischzeit t die erforderliche Leistung N beim Staustrahlreaktor nur einen Bruchteil der bei konventionellen Rührgeräten erforderlichen beträgt und insbesondere auch

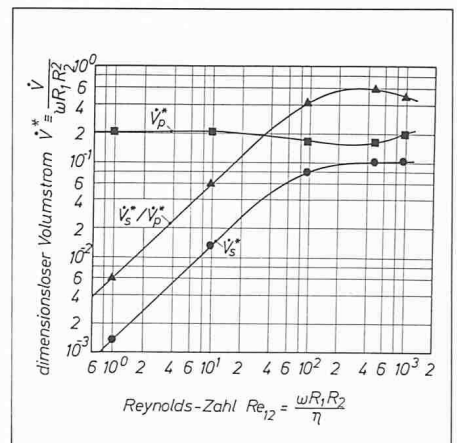


Bild 11. Volumenströme der Primärströmung \dot{V}_p^* und der Sekundärströmung \dot{V}_s^* sowie das Verhältnis \dot{V}_s^*/\dot{V}_p^* in Funktion der Reynolds-Zahl Re_{12}

Bild 12. Energien in der Primärströmung E_p^* und in der Sekundärströmung E_s^* sowie das Verhältnis E_s^*/E_p^* in Funktion der Reynolds-Zahl Re_{12}

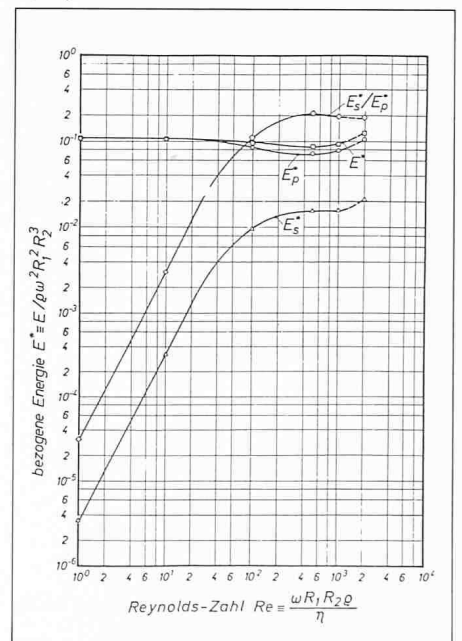
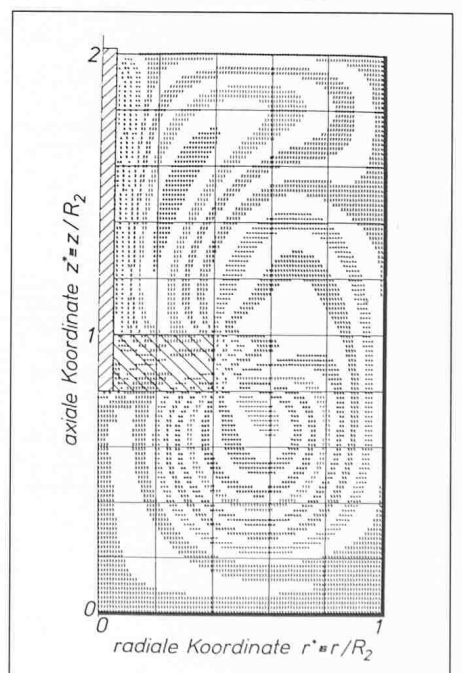


Bild 13. Isothermenfeld im Rührgefäss



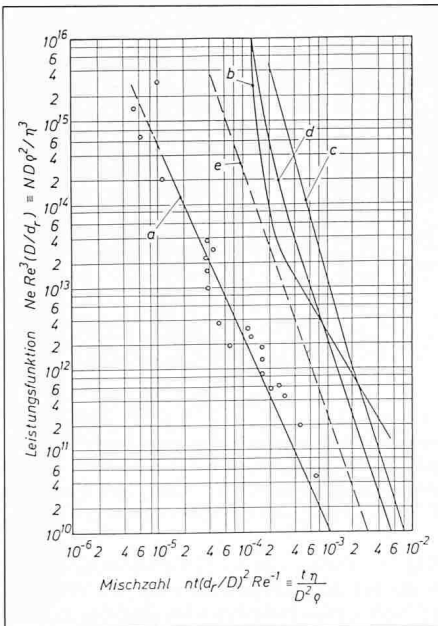


Bild 14. Zusammenhang zwischen Leistungsfunktion und Mischzahl für den Staustrahlreaktor (Kurve a) und das konventionelle Rührgefäß mit verschiedenen Rührertypen (Kurven b, c und d); Kurve e untere Grenzkurve für konventionelle Rührgefäße

Bild 15. Grundkonzept für das neue Mischgerät

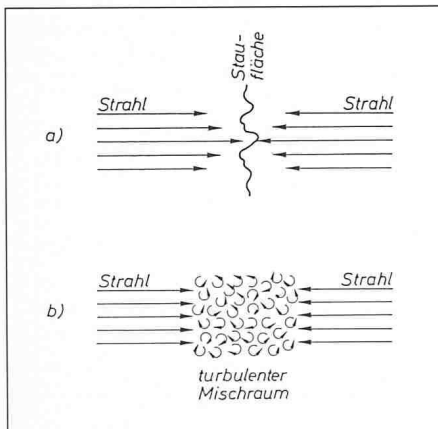
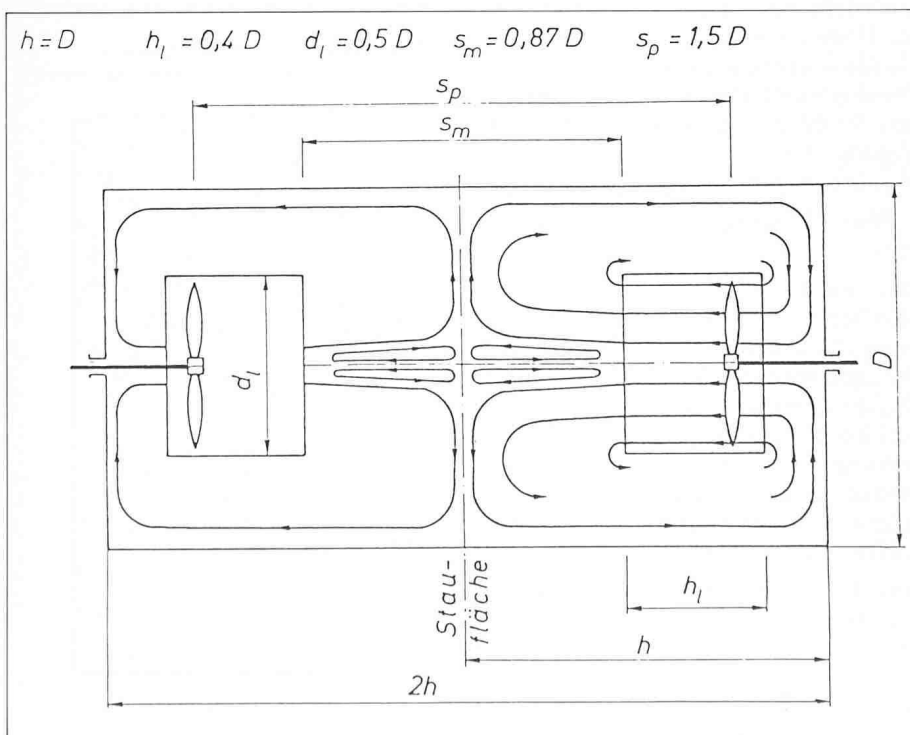


Bild 16. Schema des Staustrahlreaktors



niedriger ist, als gemäss der «unteren Grenzkurve e» erwartet werden sollte.

Die Stoffaustauschmaschine

Für dieses Beispiel seien zur Abkürzung lediglich die Zieldefinition sowie das Lösungskonzept und seine Überprüfung beschrieben.

Zieldefinition

Zur Durchführung schwieriger Absorptions- und Rektifikationsprozesse soll das neue Gerät im Vergleich zu herkömmlichen Geräten

- erheblich kleineres Bauvolumen,
- geringen Druckverlust und
- einfache Regelbarkeit

aufweisen. Darüber hinaus soll sich das Gerät nach Möglichkeit auch für die Nassentstaubung und für die Verdunstungskühlung eignen.

Konzeption des Gerätes

Gestützt auf die technisch-wirtschaftlichen Anforderungen und die verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse wurde eine Maschine konzipiert, in der das Prinzip der wiederholten Zerstäubung derselben Flüssigkeit im Gasstrom zur Steigerung des Stoffaustausches genutzt wird. Der hohe Stoffaustausch ist bedingt durch

- eine sehr effektive Zerstäubung der Flüssigkeit, die eine grosse Phasengrenzfläche und ihre gleichmässige Verteilung im Maschinenvolumen zur Folge hat, sowie durch
- einen sehr hohen Stoffübergangskoeffizienten, da der Stoffübergang stets in einem Anlaufbereich des instationären Prozesses abläuft.

Diese Bedingungen erfüllt eine Maschine, deren Kernstück ein rotierendes Schaufelrad ist, wie es z.B. in Pumpen und Gebläsen verwendet wird. Die Schaufeln der Stoffaustauschmaschine sind jedoch in kurzen Abständen geschlitzt. In den Schlitzten findet die Zerstäubung der Flüssigkeit statt. Die entstehenden Tropfen fliegen angenähert radial auswärts und treffen auf die nächste Schaufel. Hier bilden die Tropfen einen Flüssigkeitsfilm, der unter der Wirkung von Zentrifugalkräften entlang der Schaufeloberfläche bis zum nächsten Schlitz strömt, wo sie erneut zerstäubt wird.

Bild 17 zeigt ein aus Plexiglas gefertigtes Schaufelrad. Der äussere Durchmesser ist 500 mm und die lichte Höhe 51 mm. Die Zahl der Schaufeln beträgt 24, ihre Länge 275 mm, der mittlere Schlitzabstand 20 mm. Die Zerstäubung der Flüssigkeit ist im Bild 18 photographisch aufgenommen.

In der Stoffaustauschmaschine können die beiden Phasen, Gas und Flüssigkeit, entweder im Gleichstrom oder im Gegenstrom geführt werden. Da sich die Flüssigkeit unter der Wirkung der Zentrifugalkräfte radial auswärts bewegt, strömt das Gas bei Gleichstrom ebenfalls radial auswärts, bei Gegenstrom jedoch radial einwärts. Bei Gleichstrom von Gas und Flüssigkeit unterstützt das rotierende, angetriebene Schaufelrad das Ansaugen des Gases. Zumindest teilweise ist die Stoffaustauschmaschine dann also selbstansaugend.

Die Stoffaustauschmaschine kann sowohl für Absorptionsprozesse als auch für die Rektifikation eingesetzt werden. Während für die Rektifikation nur der Gegenstrom von Interesse ist, kann die Absorption sowohl im Gegen- als auch im Gleichstrom betrieben werden.

Überprüfung des Lösungskonzeptes

In einer Laboratoriumsanlage wurden umfangreiche Desorptionsversuche mit dem System $\text{CO}_2/\text{Wasser-Luft}$ durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Bild 19 zusammen mit denen für andere Gas/Flüssigkeit-Kontaktapparate dargestellt. Aufgetragen ist die mittlere spezifische Stofftransportgrösse $\beta_1 a_p$ über dem Verhältnis \dot{V}_g/\dot{V}_f , wobei \dot{V}_g der Volumenstrom des Gases und \dot{V}_f der der Flüssigkeit ist. Dem Arbeitsprinzip nach muss die Stoffaustauschmaschine mit der Sprühkolonne verglichen werden. Dabei ergibt sich, dass die Stoffaustauschleistung der Maschine um einen Faktor von etwa 40 bis 50 grösser ist als jene der Sprühkolonne. Auch wenn eine «technische» Stoffaustauschmaschine gegenüber der «Laboratoriumsmaschine» etwas an Stoffaustauschleistung einbüsst, so ist die Überlegenheit

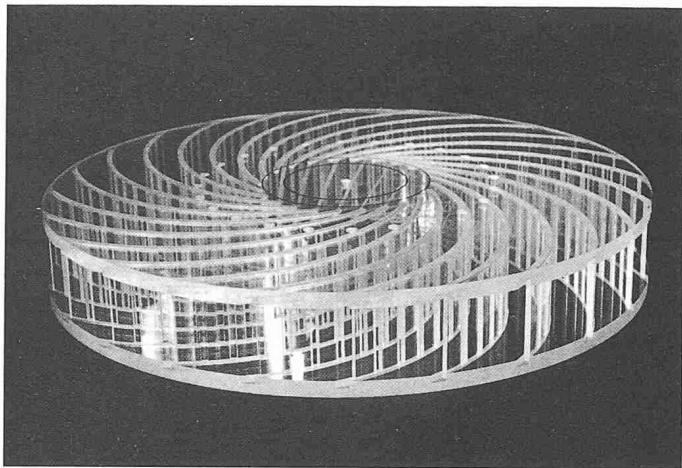


Bild 17. Aus Plexiglas gefertigtes Zerstäubungsrad mit geschlitzten Schaufeln

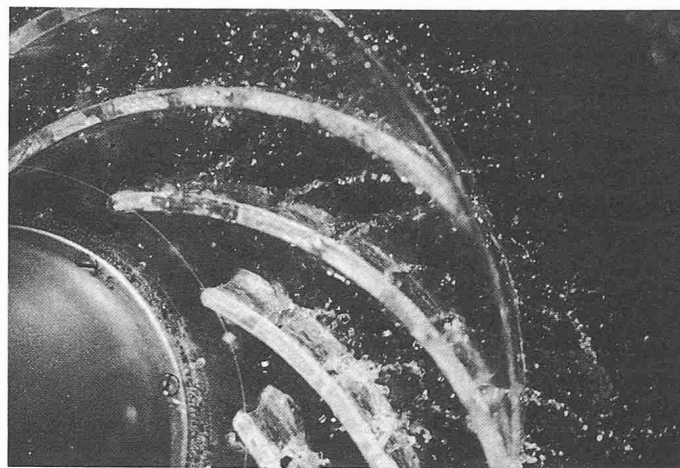


Bild 18. Photographische Aufnahme der Flüssigkeitszerstäubung im Zerstäubungsrad

gegenüber der Sprühkolonne immer noch sehr überzeugend. Abschliessend sei erwähnt, dass sich die Maschine zur Nassabscheidung von Feinstäuben sehr gut bewährt hat.

Zusammenfassung

Die Wirtschaft steht in einem Strukturwandel, dessen Ausmass und Folgen nur mit den Ereignissen der «Gründerzeit» zu Ausgang des vergangenen Jahrhunderts vergleichbar sind. Die Lösung der wirtschaftlichen Gegenwartsprobleme ist wegen der sozialen Verpflichtung des wirtschaftlichen Handelns ungleich schwieriger als vor hundert Jahren. Andererseits ist dank der Entwicklung der technischen Wissenschaften ein machtvolles Instrumentarium verfügbar, das die gezielte Lösung der anstehenden Probleme erleichtert.

Innovation wird als das Schwungrad der Technik bezeichnet. In unserer durch die Wissenschaften geprägten Zeit ist Innovation als «Realisation des wissenschaftlich Möglichen» anzusehen. Zur Durchführung von Innovationen stellt die technische Wissenschaft die in der «Innovationstechnik» zusammengefasste «Methodik des Innovierens» zur Verfügung. Diese Methodik ist lehrbar und lernbar. Mit ihrer Hilfe werden Innovationen planbar und kontrollierbar:

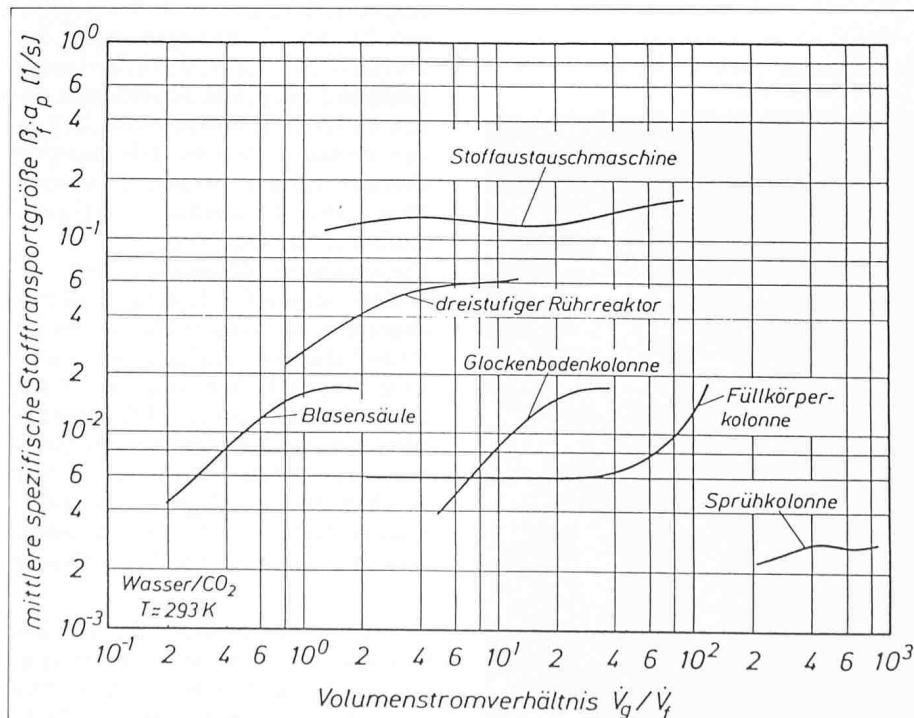
Innovationen fordern den kreativen Geist, in dem sich Ratio und Intuition zur Einheit verbunden haben. Die Methodik des Innovierens zeigt, dass uns die wissenschaftlichen Erkenntnisse den Zugang zu den intuitiven Erkenntnissen erleichtern.

Besonders bedeutsame Abschnitte des Innovationsprozesses sind die Defini-

tion des Innovationszieles und die Ideenfindung auf wissenschaftlicher Grundlage. Diese Teilprozesse wurden an zwei Beispielen für Stoffaustauschgeräte erläutert. Die konsequente Anwendung der Innovationstechnik führt zu Gerätekonzeptionen, die den Rahmen evolutionärer Entwicklung sprengen und die Geräteentwicklung in revolutionierenden Sprüngen vorwärts treiben.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr.-Ing. H. Brauer, Institut für Chemieingenieurtechnik, Technische Universität Berlin, D-1000 Berlin 12.

Bild 19. Spezifische Stofftransportgrösse $\beta_f a_p$ in Funktion des Volumenstromverhältnisses \dot{V}_g/\dot{V}_f für verschiedene technische Geräte



Literatur

- [1] G. Mensch: Die dritte technologische Revolution – Nutzen für die Menschheit oder Bedrohung des sozialen Friedens; erschienen in: Future, Ingenieur Digest Verlagsgesellschaft mbH, Mainz 1981
- [2] H. Brauer, H. Schmidt-Traub: Computer-gestützte Lehre in der Verfahrenstechnik; Chem.-Ing.-Techn. 43(1971)20, S. 1097/1105
- [3] K. Elgeti: Energie-Einsparung – Eine Herausforderung; Chem.-Ing.-Techn. 51(1979)12, S. 1233/1237
- [4] H. Schlachter: Der Verfahreningenieur in der chemischen Industrie; Vortrag an der Technischen Universität München, 19.3.1978
- [5] H. Hoffmann: Wertanalyse; Erich-Schmidt-Verlag, Berlin 1979
- [6] H. Hoffmann: Kreativitätstechniken für Manager; Verlag Moderne Industrie, Landsberg am Lech, 1981
- [7] H. Brauer: Innovationstechnik; Vorlesung an der Technischen Universität Berlin
- [8] H. Brauer: Development and Performance of a Stagnation Jet Mixer; Ger. Chem. Eng. 4(1981) S. 144/154
- [9] H. Brauer: Power Consumption in Aerated Stirred Tank Reactor Systems; in: Advances in Biochemical Engineering 13, S. 87/119, Springer Verlag Berlin, Heidelberg 1979
- [10] H. Brauer: Wärmetransport in Rührgefässen; Wärme- und Stoffübertragung 13(1980) S. 105/113
- [11] A. Mersmann, W.-D. Eienkel, M. Käppel: Auslegung und Massstabsvergrößerung von Rührapparaten; Chem.-Ing.-Techn. 47(1975) S. 953/964