

## Verfahrenstechnik als eigenständige Wissenschaft



Von P. Graßmann\*

### Summary

“Verfahrenstechnik” should not be considered as a superposition of fluid dynamics, thermodynamics and chemistry. It is shown by many examples that the problems to be solved are more general than those treated up till now in these sciences. The combination of heat- or mass-transfer with fluid dynamics leads to the counter current principle not only used in engineering but in living organism too. The miniaturization reached in the living world could in many cases be an example for the technical development.

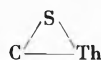
### Verbreiterung der Grundlagen

Unter Verfahrenstechnik versteht man<sup>1</sup> die «ingenieurwissenschaftliche Disziplin, die sich mit der technischen Durchführung von Verfahren befaßt, die Stoffe nach Art, Eigenschaften oder Zusammensetzung verändern». Treffender wäre also die Bezeichnung «Stoffwandlungstechnik». Die Aufgabe des Verfahreningenieurs umfaßt also die Planung und Auslegung von Anlagen, die Berechnung und Konstruktion von Apparaten und das

\* Prof. Dr. Dr. E. h. P. Graßmann, Institut für Verfahrens- und Kältetechnik, ETH, Sonneggstraße 3, 8006 Zürich

Inbetriebsetzen und Überwachen von Anlagen. Dazu tritt, besonders für den Hochschulingenieur, noch die Forschung und die Entwicklung neuer Verfahren. Anlagen und Apparate dienen dabei der Stoffwandlung von der Herstellung eines chemischen Produktes bis zur Aufarbeitung eines Beizereiabwassers, von der Lebensmittelverarbeitung bis zur Blutreinigung mit der künstlichen Niere<sup>2</sup>.

Man könnte denken, daß für diese Aufgabe neben den allgemeinen Grundlagen des Ingenieurwesens die Gesetze der Strömungslehre S, der Thermodynamik Th und der Chemie C ausreichend wären.



Aber auch hier ist das Ganze mehr als die Summe der Teile. Chemie, Thermodynamik und Strömungslehre geben noch längst keine Verfahrenstechnik, ebensowenig wie aus den Eigenschaften der drei Elemente Kohlenstoff C, Thorium Th und Schwefel S die Eigenschaften aller ihrer Verbindungen abgeleitet werden können. Vor allem zeigt sich immer wieder folgendes:

1. Der Verfahreningenieur benötigt oft Kenntnisse auf bisher kaum bearbeiteten Teilgebieten dieser drei Fächer.
2. Die Verknüpfung der drei genannten Gebiete führt zu prinzipiell neuen Fragestellungen und Möglichkeiten.
3. Die so erarbeiteten Erkenntnisse lösen manches Rätsel auf ganz anderen Gebieten als der Verfahrenstechnik. Die Beispiele hierfür seien vor allem dem Gebiete der Biologie entnommen. Prinzipien, die un geändert von der Welt der Technik in die Welt des

Lebens übertragbar sind, dürfen aber als grundlegend gelten.

Die erste Behauptung sei nur mit Beispielen aus der Strömungslehre belegt:

Als vor etwa dreißig Jahren sich die Verfahrenstechnik mit mehrphasigen Strömungsvorgängen befassen mußten, da war darüber in der Literatur über Strömungslehre praktisch nichts zu finden, hatte sich diese doch im Hinblick auf ihre wichtigsten Anwendungsgebiete: Schiffbau, Turbomaschinen und Luftfahrt, bisher fast nur mit einphasigen Medien befaßt.

Weiterhin harrten große Gebiete der Rheologie der Bearbeitung. Beispielsweise war über die Strömung körniger Stoffe in Bunkern fast nichts bekannt.

Auch die Theorie der dimensionslosen Kennzahlen war weiter auszubauen. Um sich im Dickicht der 200 bis 300 Kennzahlen<sup>3</sup> der Verfahrenstechnik nicht zu verirren, ist eine Theorie dringend erforderlich.

#### Verallgemeinerung der Gesetze der Strömungslehre

Doch nun zum zweiten Punkt, zum Neuen, das sich aus der Verknüpfung ergibt! Die Strömungslehre setzt fast immer voraus, daß sich die Teilchen mit der Zeit nicht ändern und somit vertauschbar sind und miteinander vertauschbar bleiben. Verfahrenstechnik dagegen ist Stoffwandlungstechnik. Wenn sich aber in einem Prozeß die Teilchen wandeln, so muß jedem von ihnen zumindest eine Größe zugeschrieben werden, die sozusagen seinem «Alter» entspricht. Als «Alter» sei dabei die Zeit bezeichnet, seit der es der betreffenden Einwirkung, z. B. erhöhter Temperatur, eines Katalysators oder ultravioletter Strahlung ausgesetzt ist. Damit ist es nicht mehr vertauschbar mit irgendeinem anderen. Das führt aber zu einem grundsätzlichen Unterschied zwischen der Betrachtungsweise des Hydro- oder Aerodynamikers und der des Verfahrenstechnikers. Er ist vergleichbar dem Unterschied der Bose-Einstein-Statistik, die nicht unterscheidbare Teilchen voraussetzt, und der klassischen Boltzmann-Statistik, in der die Einzelteilchen, z. B. die Gasmoleküle, als unterscheidbar angesehen werden. Man kann also nicht nachträglich an der Strömungslehre einige Korrekturen anbringen, um sie für die Verfahrenstechnik tauglich zu machen, sondern beide Betrachtungsweisen unterscheiden sich in ihren Grundlagen. Natürlich werden auch bei strömungstechnischen Versuchen immer wieder einzelne Teilchen markiert, um ihren individuellen Weg zu verfolgen. Das ändert aber nichts an der Tatsache, daß erst in der Verfahrenstechnik diese Individualität konsequent in die Theorie eingebaut wurde.

Nur aufgrund dieser Individualität läßt sich der für die Verfahrenstechnik grundlegende Begriff des Verweilzeitenspektrums definieren. Dieser erweist sich als unerläßlich, ob wir nun die Vorgänge in einer Kugelmühle, in einem thermischen Gegenstromapparat, z. B. einer Extraktionskolonne, oder in einem chemischen Reaktor in den Griff bekommen wollen.

Gerade weil diese Betrachtungsweise die Individualität der einzelnen Teilchen beachtet, läßt sie sich auf viele andere Gebiete außerhalb der Verfahrenstechnik anwenden.

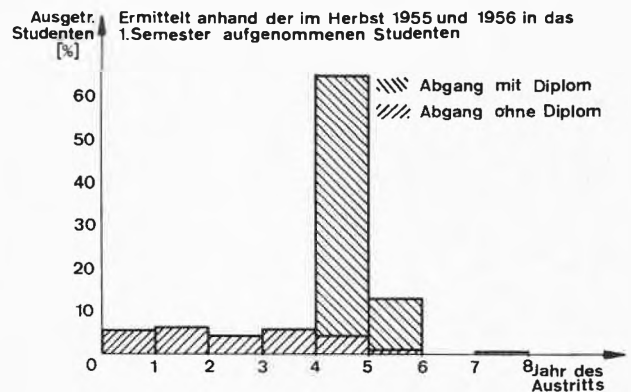


Abb. 1. Verweilzeitenspektrum der Studierenden an Abteilung III A der ETH

Abb. 1 zeigt z. B. das Verweilzeitenspektrum der Studenten der Abteilung für Maschinen-Ingenieur-Wesen an der ETH Zürich. Man erkennt, daß vergleichsweise wenig Studenten vom Studium abspringen oder endgültig in den Vorexamina durchfallen und die meisten programmgemäß im 9. Semester mit dem Diplom abschließen. Um es aufzustellen, mußte der Studiengang jedes einzelnen Studenten verfolgt werden. Es genügt nicht, die Abgänge oder Zugänge zu den einzelnen Semestern zu kennen.

Zur Beurteilung der Belastung eines Straßenabschnittes sagt die Zahl der ihn passierenden Fahrzeuge nicht viel aus. Aus der mittleren Verweilzeit läßt sich jedoch bei Kenntnis der Straßenlänge die mittlere Belegung der Straße mit Fahrzeugen und damit der mittlere Fahrzeugabstand ableiten. Die Breite des Verweilzeitenspektrums ist ein Maß für die Unterschiede der Geschwindigkeit und damit – unter meist in guter Näherung zutreffenden Voraussetzungen – auch ein Maß für die Häufigkeit des Überholens.

Die meisten der grundlegenden Gleichungen der Strömungslehre, z. B. die Kontinuitäts- und die Navier-Differentialgleichung setzen u. a. voraus:

1. das betreffende Fluid darf als Kontinuum betrachtet werden;
2. jedem Raumpunkt wird nur *ein* Geschwindigkeitsvektor zugeordnet.

In der Verfahrenstechnik müssen wir eine dieser Voraussetzungen fallen lassen. Damit eine Trennung von Lösungen möglich wird, muß nämlich die Geschwindigkeit ihrer Komponenten verschieden sein. Soll eine Menschenmenge in Männer und Frauen geschieden werden, so müssen die Männer nach der einen, die Frauen nach der anderen Seite gehen. Dieser Vergleich könnte dazu verführen, die Voraussetzung der Kontinuumsmechanik

aufzugeben, also molekular kinetisch zu rechnen. Das würde schon bei Gasen zu riesigen mathematischen Schwierigkeiten führen, für Flüssigkeiten ist aber dieser Weg vorläufig noch vollständig versperrt, weiß doch weder der Physiker noch der Chemiker Genaueres über die molekularen Bewegungen in diesen.

**Sich gegenseitig durchdringende Geschwindigkeitsfelder**

Es bleibt somit nur der zweite Weg, nämlich die Betrachtung des Fluids als Kontinuum mit sich durchdringenden Geschwindigkeitsfeldern der einzelnen Komponenten. Die Kopplung dieser Geschwindigkeitsfelder wird durch Diffusionskonstanten phänomenologisch beschrieben. Die Navier-Stokes-Gleichung wird damit zu einem noch vergleichsweise einfachen Grenzgesetz einer Familie wesentlich komplizierterer Gleichungen. Dementsprechend müssen wir uns meist mit strömungstechnisch einfachen Problemen begnügen.

Betrachten wir etwa die Trocknung. Hierbei muß das in dem zu trocknenden Gut enthaltene Wasser an das Trockenmittel – meist Luft – übertragen werden. Solange das Gut noch durch und durch feucht ist, ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt im wesentlichen die Diffusion des Wasserdampfes durch die am Trockengut haftende laminare Luftschicht. Wir könnten uns also zunächst für ein Oberflächenelement das in Abb.2 gezeigte Modell zurechtlegen.

Obwohl wir ruhende Luft und einen von der Konzentration unabhängigen Diffusionskoeffizienten vorausgesetzt haben, ergibt sich für den rechts dargestellten Partialdruckverlauf des Wassers keine Gerade. Der Grund ist der sogenannte konvektive Verdrängungsstrom<sup>4, 5</sup>.

Bei technischen Trocknern bringen wir das Trockengut aber nicht in ruhende, sondern in bewegte Luft. Diese streicht also am Körper entlang, während der Wasserdampf senkrecht zur Gutoberfläche in die Luft hineindiffundiert. An die Stelle des gezeigten einfachen Modells treten also jetzt zwei sich rechtwinklig durchdringende Strömungsfelder, nämlich das Strömungsfeld des Trägermediums – in unserem Fall der Luft – und das des diffundierenden Wasserdampfes.

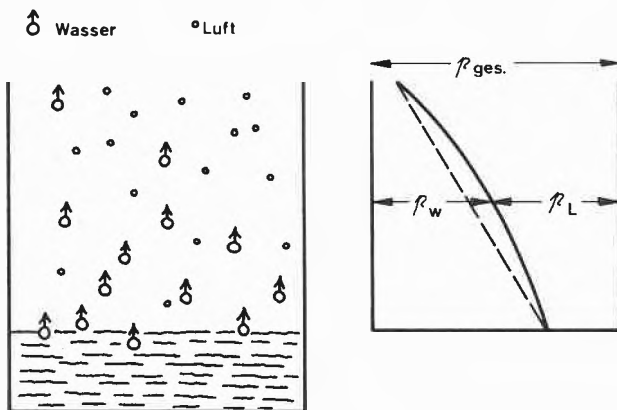


Abb.2. Verdunstung von Wasser in Luft.  $p_w$ ,  $p_L$  Partialdrücke von Wasser bzw. Luft

**Das Gegenstromprinzip**

Zu überraschenden und für die verschiedensten Wissensgebiete, auch für die Verfahrenstechnik, hochwichtigen Ergebnissen gelangen wir, wenn beide im Stoffaustausch befindliche Phasen parallel zur Grenzfläche in entgegengesetzter Richtung strömen. Dieses Gegenstromprinzip sei zunächst an einem Beispiel aus der Meereskunde erläutert.

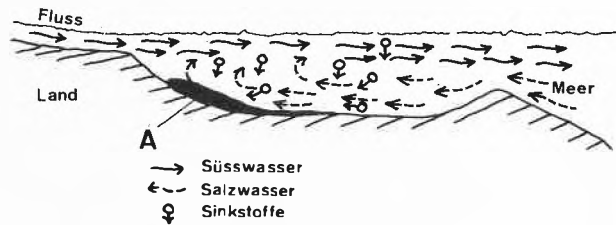


Abb.3. Gegenstrom beim Einmünden eines Flusses in das Meer

Abb.3 zeigt die Strömung bei der Einmündung eines Flusses in eine Bucht oder einen Fjord. Das leichtere Süßwasser schwimmt auf dem Meerwasser und wird dieses teilweise nach außen mitreißen. Dieses mitgerissene Wasser wird vom Meer her ergänzt, d.h. es bildet sich ein landwärts gerichteter Tiefenstrom aus. Im Flußwasser enthaltene Sinkstoffe und abgestorbene Algen sinken zum Tiefenstrom hin ab, werden von diesem landwärts verfrachtet und bei A abgelagert. Das mit dem Oberstrom fortgerissene Meerwasser wird wieder in das Meer hinausgetragen. Der Gegenstrom der beiden horizontalen Trägerströme und der dazu senkrechte, viel langsamere Transport der Sinkstoffe nach unten und des mitgerissenen Wassers nach oben führt also zu einer Anreicherung der einen Komponente – der Sinkstoffe – an der Umlenkstelle bei A.

Die breite Anwendung, die das Gegenstromprinzip in der thermischen Verfahrenstechnik<sup>7</sup> findet, ist allgemein bekannt. Als Beispiele seien genannt die Rektifikation, die Flüssig-flüssig-Gegenstromextraktion, die Gegenstromgaswaschung, das Trennrohr und schließlich der oft angewandte Gegenstromwärmeaustauscher. Auch in senkrechten oder geneigten Klüften der Erdkrinde dürften sich oft ideale Voraussetzungen für eine Gegenstromtrennung vorfinden, sorgt doch das geothermische Gefälle für die Aufheizung unten bei Kühlung von oben. Es kann sich dann ein Flüssigkeits-Dampfgegenstrom wie auch eine freie Konvektion, also Gegenstrom in einer homogenen Phase, ausbilden. Beruht die oft überraschend hohe Reinheit der in solchen Klüften gefundenen Kristalle vielleicht auf der Wirkung des Gegenstromes?

Ein Leben der Wirbeltiere auf dem Festlande wäre nicht möglich ohne den raffinierten Gegenstromapparat in ihren Nieren; wäre der Wasserverlust durch die Ausscheidung eines nicht aufkonzentrierten Harns doch viel zu groß!<sup>8</sup> Die Tiefseefische könnten ihre Schwimmblasen nicht bis zu einem Druck aufpumpen – ausrei-

chend, um den hohen hydrostatischen Druck ihrer Umgebung Stand zu halten –, verfügten sie nicht über den Gegenstromapparat des «rete mirabile»<sup>8</sup>. Der Wärmebedarf der in kalten Gegenden lebenden Warmblütler wäre wesentlich höher, würde nicht in Gegenströmen das zu den Extremitäten fließende Blut durch das von dort kommende Blut gekühlt<sup>8</sup>. Die Temperatur der Beine, die wegen der erforderlichen Beweglichkeit nur schlecht thermisch isoliert sein können, läßt sich so wesentlich tiefer halten als die der Leibeshöhle.

Es ist die Vereinigung von Thermodynamik und Strömungslehre, die zur Erkenntnis dieses universellen Prinzips geführt hat. Es waren Verfahreningenieure, die seine Theorie entwickelt, es in die Technik eingeführt haben.

### Mehrphasige Strömungen

In technischen Apparaten müssen große Durchsatzmengen verarbeitet werden. Dazu sind große Berührungsflächen zwischen den im Stoffaustausch stehenden Strömen erforderlich. Sie werden, wenn immer möglich, dadurch hergestellt, daß sich beide Stoffströme unmittelbar berühren, ja meist sich durchdringen. Bei den üblichen Anordnungen zur Rektifikation z.B. perlt der aufsteigende Dampf durch die auf den Böden aufgestaute Flüssigkeit hindurch<sup>7</sup>. Damit gelangt man in das Gebiet der zwei- oder eventuell sogar mehrphasigen Strömungsvorgänge, die in der Verfahrenstechnik eine große Rolle spielen<sup>9</sup>. erinnert sei an Verdampfung und Zerstäubung, an die Flüssig-flüssig-Extraktion und an die Strömung eines Flüssigkeits-Dampf-Gemisches durch eine Rohrleitung. Von der Strömungslehre her bekannt sind zwar die Gesetze für die Strömung durch Kanäle mit festen Wänden und für die Umströmung fester Körper. Hier aber ist die Phasengrenze selbst beweglich. Ihre Form ist eine Funktion der Strömung. Keine Dampfblase gleicht der anderen. Es erscheint zunächst aussichtslos, die Vorgänge durch mathematische Gleichungen in den Griff zu bekommen.

Aber die Wirtschaft fordert genaue Berechnung dieser Vorgänge, denn jede Unsicherheit muß durch Sicherheitszuschläge – besser würde man von einer Unwissenheitssteuer reden – abgegolten werden.

Zunächst waren die Strömungsvorgänge derartiger Systeme mit zwei flüssigen Phasen zu klären: Wie groß sind z.B. die Gasblasen? Was ist ihre Form? Wie schnell steigen sie auf (Abb.4)?

Bildet sich ein Schaum? Das sind Probleme, in die etwa ein Dutzend Variable eingehen. Durch Einführung dimensionsloser Kennzahlen läßt sich die Variablenzahl in diesem Fall um 3 verringern, aber auch dann ist das Problem noch schlimm genug, bleiben doch immer noch 9 Variable. Unter der Annahme, daß zur Festlegung jeder Abhängigkeit 5 Meßpunkte nötig sind, so wäre ein Zweivariablenproblem durch eine durch 5 Meßpunkte gestützte Kurve gelöst. Bei drei Variablen würden aber

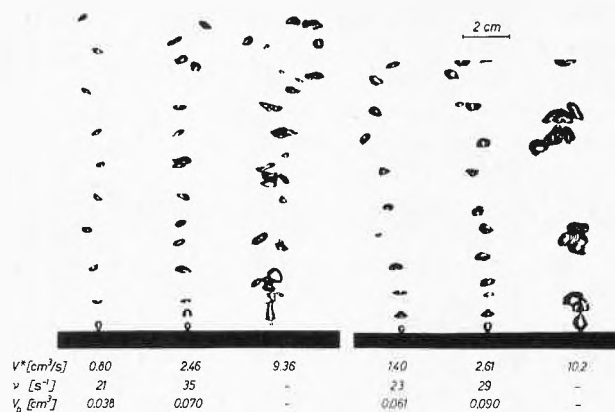


Abb. 4. Die Formen der Blasen sind mannigfaltig!<sup>17</sup>

$V^*$  = der durch die Düse eintretende Luftstrom

$\nu$  = Ablösefrequenz der Blasen

$V_b$  = Blasenvolumen

schon 5 Kurven mit je 5 Meßpunkten benötigt. Mit jeder Variablen mehr potenziert sich also die Zahl der Meßpunkte. Für 9 Variable wären nach dieser Überlegung  $5^8 = 390625$  Meßpunkte erforderlich. Jedoch ist die Natur so nett, daß man dem Problem oft auch mit wesentlich weniger Meßpunkten beikommt<sup>9</sup>.

### Die Flüssig-flüssig-Grenzfläche

Weiter waren die Vorgänge an einem Element der Grenzfläche zu klären. Das von Ludwig Prandtl für den Kontakt zwischen einem Fluid und einer festen Wand geschaffene Modell der laminaren Unterschicht war hier offenbar nicht anwendbar, ist es doch durchaus denkbar, daß beim Kontakt zweier flüider Phasen die Wirbel bis zur Grenzfläche selbst reichen (Abb.5). Um dem Stoffaustausch an derartigen Grenzflächen durch Gleichungen zu erfassen, mußten neue Modelle, wie Penetrationstheorie und Oberflächenerneuerungstheorie, erdacht und mathematische Folgerungen daraus gezogen werden<sup>7,9</sup>. Trotz aller Turbulenz bleiben beim Stoffaustausch immer noch Distanzen in der Größenordnung von  $1/10$  mm, die durch den vergleichsweise langsamen Vorgang der Diffusion überbrückt werden müssen. Um zu technisch brauchbaren Durchsatzleistungen zu gelangen, müssen

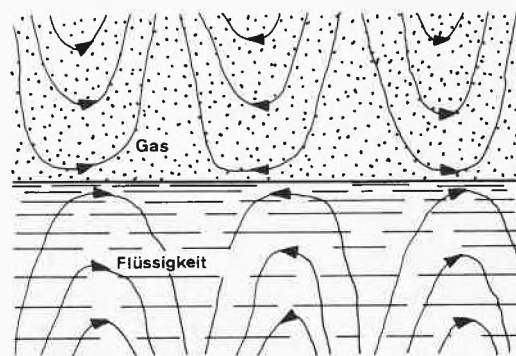


Abb. 5. Zwischen zwei fluiden Medien muß sich keine laminare Unterschicht ausbilden

also große Flächen pro Volumeneinheit untergebracht werden.

Dies gilt ebensowohl für die Welt des Lebens wie für die der Technik.

Wie bewältigt die belebte Natur dieses Problem?

### Große Austauschflächen auf kleinem Raum

Die Pflanze stülpt die benötigten Austauschflächen, also Wurzeln und Blätter, aus sich heraus, das Tier dagegen und auch der Mensch tragen riesige Austauschflächen in ihrem Inneren mit sich herum. Dabei sind bei Pflanze, Tier und Mensch die sich berührenden Medien ausnahmslos durch Membranen voneinander abgeschirmt. Dagegen strebt man in der Technik, wenn irgend möglich, den unmittelbaren Kontakt an.

Beim Einzeller genügt zum Austausch meist noch die äußere Zellwand, und zwar aus denselben geometrischen Gründen, die es auch gestatten, den Inhalt eines Reagenzglases von außen her schnell zu erhitzen, während wir für größere Kessel bekanntlich ausgedehnte innere Austauschflächen benötigen. Sie sind oft auf erstaunlich kleinem Platz untergebracht. So beträgt z. B. die Oberfläche des menschlichen Darms  $200 \text{ m}^2$ !<sup>10,11</sup>

Eine technische Anlage zur Gewinnung von Süßwasser aus Brackwasser nach dem Verfahren der umgekehrten Osmose mit rund  $\frac{1}{4}$  der Membranfläche des menschlichen Darms zeigt Abb. 6.

Hier haben wir also sicher noch manches zu lernen! Das aus mikroskopisch kleinen Anfängen heraus erwachsene Leben versteht sich eben besser auf die Miniaturisierung als die vom Menschen geschaffene Technik, die mit Gebilden begann, deren Gewichte und Abmessungen mit denen des Menschen vergleichbar waren. So sind typische, tierische Membranen nur 5 bis 10 nm dick (<sup>12</sup>, S.10). Man muß 5000 solcher Membranen aufeinanderlegen, um die Dicke eines Blattes Papier zu erhalten.

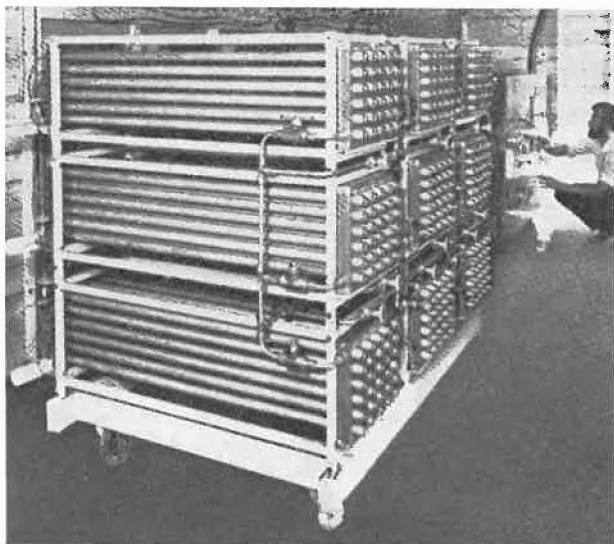


Abb. 6. Versuchsanlage für umgekehrte Osmose für  $25 \text{ m}^3/\text{d}$ <sup>15</sup>

### Die «langsame» Diffusion als Informationsübermittler

Die bis in den molekularen Bereich vordringende Miniaturisierung erlaubt es dem Organismus, Diffusionsvorgänge sogar in der Informationsübermittlung einzusetzen. Die Fortpflanzung eines Reizes längs einer Nervenfaser, wobei Geschwindigkeiten über  $100 \text{ m/s}$  erreicht werden<sup>13</sup>, ist zwar ein weitgehend elektronischer Vorgang, aber die Reizübermittlung von einer Nervenzelle zur anderen in den sogenannten Synapsen wird durch einen Diffusionsprozeß von Acetylcholin bzw. Nor-Adrenalin eingeleitet. Diese Stoffe mit Molekulargewichten etwas unter 200 müssen durch eine etwa  $30 \text{ nm}$  dicke Membran diffundieren. Als Verfahreningenieure wissen wir, daß die Zeit für einen solchen instationären Diffusionsvorgang größenordnungsmäßig gegeben ist durch

$$t \approx L_c^2/D.$$

Dies ergibt in unserem Fall, wenn wir in cm und s rechnen und für  $D$  den sicher merklich zu großen Wert der genannten Stoffe im Wasser einsetzen,

$$t \approx (30 \cdot 10^{-7})^2/0,7 \cdot 10^{-5} = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ s}.$$

Das ist zwar eine wesentlich zu kurze Zeit, denn die Neurophysiologen messen Zeiten von 1 bis 2 ms. Es lassen sich aber auch viele Gründe angeben, die diese Zeiten merklich verlängern. Auch wenn der Grenzwert von  $10^{-6} \text{ s}$  erreicht würde, wären damit die Synapsen immer noch etwa drei Zehnerpotenzen langsamer als die Transistoren heutiger Computer, aber Elektronen sind nun mal schneller und wendiger als Moleküle!

### Gestaltung nach eingepprägten Gesetzen

Sowohl in der Welt des Lebens wie der Technik bedarf der Aufbau solch komplizierter miniaturisierter Systeme einer Steuerung, einer Anweisung sozusagen, wo etwas entstehen soll. Es ist unmöglich, daß diese in allen Einzelheiten vererbt wird. Was vererbt wird, sind gewisse Gestaltungsprinzipien. Diesen inneren Gesetzen folgend wächst der Organismus heran. Wie können wir in der Technik solche Möglichkeiten verwirklichen? Nun, auch wir müssen sehen, nicht durch Fräsen, Stanzen, Drehen und Schweißen einem Werkstück die gewünschte Form aufzuzwingen, sondern müssen die Wachstumsbedingungen so wählen, daß auch das technische Gebilde aufgrund der gegebenen Gesetze sozusagen von selbst diese Form annimmt. Das erscheint utopisch, aber gewisse Anfänge sind gemacht, wie die folgenden, freilich noch recht primitiven Beispiele zeigen.

Abb. 7 zeigt die Zerstäubung einer Flüssigkeit. Die Flüssigkeit läuft auf der Innenseite eines um seine vertikale Achse rasch rotierenden Rohres nach abwärts. An seiner ebenen Austrittskante bilden sich in regelmäßigen Abständen Flüssigkeitsstrahlen, die dann wieder gesetzmäßig in gleich große Tropfen zerfallen. Beides

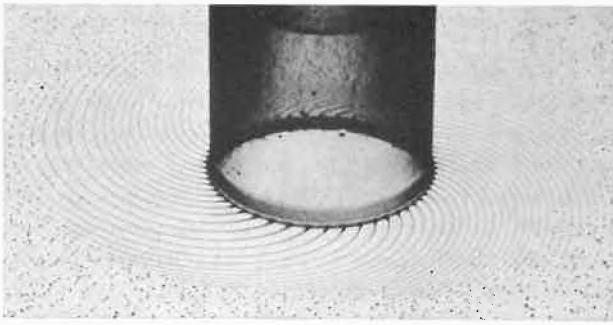


Abb. 7. Zerstäubung einer Flüssigkeit

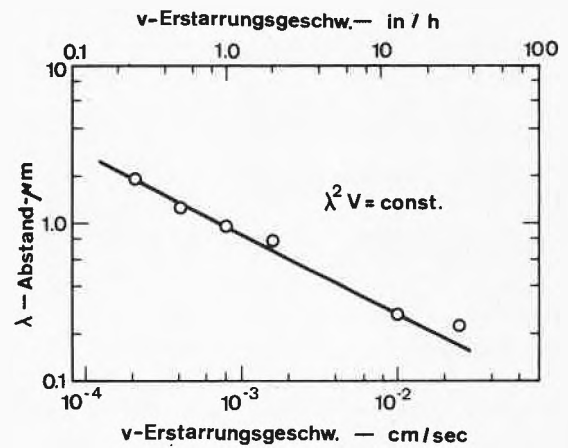
wird nicht durch irgendeine äußere Formgebung erzwungen, sondern folgt aus den den jeweiligen Systemen eingetragenen Gesetzen.

Als zweites Beispiel sei auf die Herstellung von Metallsieben mit Maschenweiten von z. B.  $0,5 \mu\text{m}$  hingewiesen. Hier ist nicht nur der Herstellungsprozeß verfahrenstechnisch sehr interessant, sondern derartige Siebe würden auch die Lücke zwischen den mechanisch hergestellten Sieben und den auf der Molekularstruktur beruhenden Siebvorrichtungen, wie Molekularsieben und Kunststoffmembranen, schließen. Bei der eutektischen Erstarrung scheiden sich bekanntlich zwei feste Phasen ab. Sie liegen entweder als Lamellen nebeneinander, sie können sich auch zellenartig durchdringen oder die eine Komponente wächst in Form langer dünner Nadeln durch die andere hindurch. Durch die sogenannte gerichtete Erstarrung<sup>14</sup> läßt sich erreichen, daß diese Nadeln alle senkrecht zur Erstarrungsfront gerichtet, also untereinander parallel sind und nahezu gleichen Durchmesser und Abstand besitzen.

Wie kommt das zustande? Die Natur scheint hier einem Minimalprinzip zu folgen. Seine Anwendung auf diesen speziellen Fall wird zwar von manchen Physikern bestritten, aber die Natur scheint sich hier lieber den Wünschen der Ingenieure zu fügen, als sich dem Widerspruch der Physiker zu beugen. Dieses Minimalprinzip läßt sich etwa wie folgt aussprechen. Bilden sich nur wenige, aber vergleichsweise dicke Nadeln, so ist zwar die zur Schaffung der Grenzfläche erforderliche Arbeit klein, aber es muß die für die Bildung der Nadeln erforderliche Masse über eine große Strecke transportiert werden. Bei vielen, aber dünnen Nadeln ist es gerade umgekehrt. Minimiert man die Summe der Oberflächenarbeit und der Arbeit für den Massetransport, so gelangt man zu der in Abb. 8 gezeigten Beziehung, die durch die experimentellen Ergebnisse gut bestätigt wird.

Durch Herausätzen der Nadeln aus senkrecht zur Nadelrichtung geschnittenen Platten lassen sich dann Siebplatten mit einigermaßen gleichen Löchern erhalten.

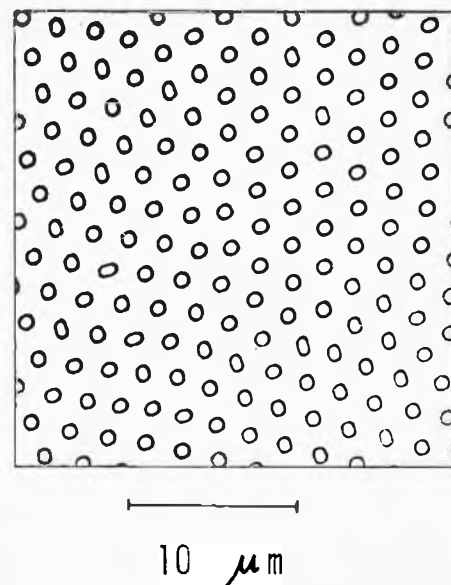
Für die Herstellung im Großen ist es allerdings besser, diese Platten nur als Matrizen zu verwenden, die zunächst auf dünne Kunststoffmembranen abgeformt werden. Werden diese dann durch Aufdampfen metallisiert, so lassen sich Siebe höchster Feinheit aus wohl praktisch beliebigen Metallen herstellen. So wurde z. B. eine Gold-

Abb. 8. Abhängigkeit des Nadelabstandes  $\lambda$  von der Erstarrungsgeschwindigkeit  $v$ <sup>16</sup>

platte mit  $20 \mu\text{m}$  Dicke mit  $10^9$  Löchern pro  $\text{cm}^2$  mit je  $0,5 \mu\text{m}$  Durchmesser hergestellt.

Sicher, dieses Verfahren ist heute noch nicht soweit entwickelt, daß sich damit billig große Filterflächen herstellen lassen. Es zeigt aber, wie es möglich wird, in bisher technisch unzugängliche Größenordnungen vorzustoßen, wenn man der Natur die Gestaltung nach den ihr eigenen Gesetzen überläßt.

Wahrscheinlich würden auch große verfahrenstechnische Apparate und Anlagen schöner und ihr Anblick auch vom ästhetischen Standpunkt befriedigender werden, wenn ihre Gestaltung klarer die zugrunde liegenden Naturgesetze offenbaren würde. Eine leicht geschwungene Brücke ist schön, wenn wir in ihrer Form die Gesetze der Statik erahnen, ein Flugzeug ist schön, denn seine äußere Form muß den Gesetzen der Aerodynamik entsprechen. Unsere Apparate aber sind nur Hüllen für das, was in ihrem Inneren vor sich geht und was wir fast

Abb. 9. Mo-Stäbchen in Ni-Al-Matrix,  $v = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$ <sup>16</sup>

nie zu Gesicht bekommen. So wirkt ihr Äußeres willkürlich und gesetzlos. Möge es einer späteren Generation von Verfahrensingenieuren vergönnt sein, auch hier Wandel zu schaffen.

So hinterläßt die im Kampf um die Anerkennung der Verfahrenstechnik erstarkte Pioniergeneration ihren Nachfolgern ein weites Feld für grundlegende Forschung und fruchtbare Entwicklung.

#### Literaturverzeichnis

- 1 K. Schiefer (Herausgeber), *Lexikon der Verfahrenstechnik*, Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart 1970, S. 541.
- 2 P. Graßmann, Hochschulbildung in Verfahrenstechnik, *Chimia* 23 (1969) 10, 345–51.
- 3 R. C. Weast (Herausgeber), *Handbook of Chemistry and Physics*, 52nd Edition, The Chemical Rubber Company, Cleveland 1971, S. F-270.
- 4 O. Krischer, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, Band 1, 2. Auflage, Verlag Springer, Berlin 1963, S. 176–80.
- 5 D. A. Frank-Kamenetzki, *Stoff- und Wärmeübertragung in der chemischen Kinetik*, Verlag Springer, Berlin 1959, Kap. III, S. 84–93.
- 6 R. C. Seagrave, *Biomedical Application of Heat and Mass Transfer*, The Iowa State University Press, 1971, S. 151.
- 7 P. Graßmann und F. Widmer, *Einführung in die thermische Verfahrenstechnik*, 2. Auflage, de Gruyter, 1974.
- 8 P. Graßmann, Verfahrenstechnik und Biologie, *Chemie-Ing.-Techn.* 39 (1967) 21, 1217–26.
- 9 P. Graßmann, *Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik*, 2. Auflage, Sauerländer, Aarau 1970.
- 10 P. Graßmann, Verfahrenstechnik und interdisziplinäre Forschung, *Chimia* 27 (1973) 6, 327–30.
- 11 T. H. Wilson, *Intestinal Absorption*, Saunders Company, Philadelphia/London 1962.
- 12 Z. Böszörményi, E. Cseh, G. Gárdos und P. Kertai, *Transport Processes in Living Organisms*, Budapest 1972, S. 17.
- 13 M. Schneider, *Physiologie des Menschen*, 15. Auflage, Verlag Springer, Berlin 1966, S. 462 ff.
- 14 W. Kurz, *Gerichtet erstarre eutektische Werkstoffe*, Verlag Springer, Berlin 1975.
- 15 British Information Services, *Desalination*, 2nd Edition, 1970.
- 16 W. De Sorbo und H. E. Chine, *Metal Membranes with Uniform Submicron Size Pores*, General Electric Technical Information Series 69-C-375, November 1969.
- 17 E. Weder, Diss. Nr. 4075, ETH Zürich 1967.