

Karlsruher Akademische Reden
Neue Folge Nr. 25

Professor Dr.-Ing. Hans Rumpf

Die Mechanische
Verfahrenstechnik auf dem
Wege zur Wissenschaft

Rektoratsrede

gehalten bei der Jahresfeier am 3. Dezember 1966

Verlag C. F. Müller Karlsruhe

1967

Mein Thema „Die Mechanische Verfahrenstechnik auf dem Wege zur Wissenschaft“ kann in zweifacher Weise verstanden werden: Man könnte von der Meinung ausgehen, daß die Mechanische Verfahrenstechnik heute eine voll ausgebildete Wissenschaft sei, und den Weg betrachten, den sie bis hierhin genommen hat. Dann ist das Referat wissenschaftsgeschichtlicher Art. Oder man ist der Ansicht, die betrachtete Disziplin sei heute noch keine Wissenschaft aber auf dem Weg dorthin; dann wird man dies auf Grund des jetzigen Wissensstandes begründen müssen und die zukünftigen Entwicklungstendenzen zu analysieren trachten.

Die gleiche Doppeldeutigkeit würde unsere Frage auch bei anderen Wissensgebieten zulassen. Nur möchte ich mir nicht herausnehmen, die Frage bei einer anderen als der eigenen Disziplin in diesem doppelten Sinne zu stellen, wiewohl ich mir denken könnte, daß zum Beispiel David Hilbert, als er um die Jahrhundertwende – in einer Grundlagenkrise der Mathematik – damit begann, seine formalistische Methode zur axiomatischen Begründung der Mathematik zu entwickeln, selbst das Thema „Die Mathematik auf dem Wege zur Wissenschaft“ nicht allein retrospektiv, sondern auch im Hinblick auf die zukünftige Struktur dieser Wissenschaft behandelt hätte, die schon 2500 Jahre früher ein königliches Ansehen genossen hat.

Die Wissenschaften sind immer unterwegs. Sie erleiden dabei Phasenumwandlungen. In solchen Perioden eines Strukturwandels wird man eher geneigt sein, ein Wissensgebiet auf dem Wege zu sehen, in einem neuen Sinne oder überhaupt erst Wissenschaft zu werden.

Hier wird eine Unbestimmtheit offenkundig, die in dem Gebrauch des Begriffes Wissenschaft liegt und es dem strengen Betrachter verbietet, das Wort Wissenschaft überhaupt zu verwenden, ohne seine jeweilige Bedeutung genauer zu definieren. Wir wollen uns aber nicht dazu verleiten lassen, in die Problematik der Wissenschaftsdefinition einzusteigen, da sonst zu befürchten ist, daß wir zur eigentlichen Sache überhaupt nicht kommen. Ich möchte es auf das Ende des Vortrages verschieben, etwas allgemeiner über Aufgabe und Methode einer technischen Wissenschaft zu sprechen,

um den Standort der Mechanischen Verfahrenstechnik noch genauer bestimmen zu können. Zunächst muß ich sagen und wohl einige Zeit darauf verwenden, was Verfahrenstechnik ist und welche Fragen die Mechanische Verfahrenstechnik behandelt.

Wir verstehen unter Verfahrenstechnik die Technik der Stoffwandelungsverfahren. Dabei sollen nicht nur chemische Stoffumwandlungen sondern auch Umwandlungen der physikalischen Struktur der stofflichen Systeme gemeint sein. Dies ist eine sehr weitgreifende Formulierung und bedarf der Abgrenzung vor allem gegenüber den Techniken der Stoffbearbeitung und Formgebung. Ich möchte mich aber nicht mit einer genauen Grenzziehung aufhalten und Grenzstreitigkeiten heraufbeschwören, die unvermeidlich wären, weil die Grenzen der Verfahrenstechnik fließend sind und ihr Gebiet sich mit vielen anderen Gebieten der Technik und Wissenschaft überschneidet.

Verfolgen wir einmal den Weg der bergbaulich gewonnenen Feststoffe, etwa der Erze oder Kohle. Beim Abbau der Stollen verbündet sich die Verfahrenstechnik mit einer speziellen Maschinenteknik des Stoffabbaus, der Fördertechnik und Wasserhaltung. Fragen der Geologie und Bodenmechanik spielen hinein. Verfahrenstechnischer Art sind dabei auch die Aufgaben der Staubabscheidung und Explosionsverhütung, angrenzend der Komplex der hygienischen und medizinischen Auswirkungen. Die geförderte Kohle oder das Erz wird anschließend in einem vielstufigen Aufbereitungsprozeß von dem mitgeführten und verwachsenen Gestein getrennt. Die dabei angewandten Verfahrensarten gehören alle zur Mechanischen Verfahrenstechnik. Sie werden aber nicht nur bei der Aufbereitungstechnik, sondern in der gesamten Verfahrenstechnik benutzt.

Die verwachsenen Erz- oder Kohleteilchen müssen in einem oder mehreren Zerkleinerungsprozessen aufgeschlossen werden, so daß die einzelnen Teilchen stofflich möglichst homogen sind. Man erhält dann ein Gemisch von Körnern. Die weitere Aufgabe besteht in der Trennung der Teilchen. Wie bei Aschenputtel – die guten ins Töpfchen, die schlechten ins Kröpfchen – so soll beim Aufbereiten diese Trennung nach der Stoffart – Kohleteilchen von Gesteinsteilchen – erfolgen.

Wir wollen an dieser Stelle das spezielle Beispiel verlassen und einen Blick auf die Gesamtheit der Trennverfahren werfen. Hin-

sichtlich der für die Trennung maßgeblichen Teilcheneigenschaften unterscheiden wir zweckmäßig 5 Gruppen.

Die erste Gruppe nützt die unterschiedlichen geometrischen Abmessungen der Teilchen aus. Hierzu gehört vor allem die Siebung. Ein Beispiel aus der Landtechnik sind die sogenannten Trieure, in denen Unkrautkörner von Getreidekörnern nur auf Grund verschiedener Form ausgelesen werden.

Eine zweite Gruppe sind die Auftriebsmethoden, mit denen die Teilchen in einer Flüssigkeit auf Grund ihres Dichteunterschiedes getrennt werden. Diese Methode hätte Aschenputtel auch anwenden können. Die Flüssigkeitsdichte muß zwischen den Dichten der beiden zu trennenden Substanzen liegen. Da die Dichte des Wassers diese Bedingungen selten erfüllt, hilft man sich auf zweierlei Weise, bei den sogenannten Schwerflüssigkeitsverfahren dadurch, daß die wirksame Flüssigkeitsdichte durch die Zugabe feingemahlener schwerer Stoffe erhöht wird, bei den Flotationsverfahren dadurch, daß die wirksame Dichte einer der beiden Substanzen durch Anlagerung von Gasblasen herabgesetzt wird.

Eine dritte Gruppe von Trennverfahren beruht auf der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeit der Teilchen in einem Gas oder einer Flüssigkeit. Eine unterschiedliche Sinkgeschwindigkeit beobachtet man zum Beispiel bei Hagelkörnern und Schneeflocken, beides Eisteilchen, oder in einer Tasse Kakao, in der sich die groben Kakaoteilchen als Satz absetzen, während die feinen noch in der Schwebelage bleiben. Die Sinkgeschwindigkeit hängt sowohl von der Teilchendichte als auch der Teilchengröße und der Teilchenform ab. Zu dieser Gruppe zählen eine große Zahl verschiedener Methoden des Sedimentierens in einem stationär, d. h. gleichmäßig strömenden Gas oder Flüssigkeitsstrom unter der Wirkung der Schwerkraft oder Fliehkraft und ebenso die mit einer pulsierenden Strömung arbeitenden Setzverfahren.

Eine vierte Gruppe von Trennverfahren nutzt das unterschiedliche Reibungs- und Stoßverhalten der Teilchen auf einer Feststoff-Oberfläche aus. Bei der Erzaufbereitung benutzt man die sogenannten Herde, schräggestellte hin und her bewegte profilierte Flächen, über die sich das feuchte Gut mit im statistischen Mittel unterschiedlichen Bahnen hinbewegt. Ein Beispiel aus der Getreideaufbereitung ist der Paddy-Auslesetisch zum Trennen von

geschälten und ungeschälten Reis- oder Haferkörnern – Paddy ist ungeschälter Reis – der sich den großen Reibungsunterschied der behaarten geschälten Körner und der glatten ungeschälten Körner in sehr witziger Weise zunutze macht.

Als fünfte Gruppe sind die elektrischen und magnetischen Trennverfahren zu nennen, die auf unterschiedlicher elektrischer Ladung oder verschiedener Magnetisierung der Teilchen beruhen.

An den Beispielen werden Sie die Parallelität der Aufgaben und Methoden bei der Erzaufbereitung und bei der Verarbeitung der pflanzlichen Stoffe bemerkt haben. In der Getreidemüllerei erfolgt der Aufschluß des Getreidekorns und die Trennung in die asche-reiche Schalensubstanz, die Kleie und die stärkereichen Mehlkörner in einer vielstufigen Aufeinanderfolge von Zerkleinerungs- und Trennprozessen. Wie die Erzaufbereiter im Laufe langer Erfahrung eine Reihe ingeniöser Trennmethoden gefunden haben, deren Arbeitsprinzip nicht immer klar zu durchschauen ist und auch vom erfahrenen Fachmann nicht immer physikalisch überzeugend interpretiert wird, haben auf der anderen Seite die Weizen-, Roggen-, Reis-, Hafer- und Gewürzmüller in ebenso langer Erfahrung ihrem Stoff abgeschaut, wie er sich bei dieser oder jener Behandlung verhält und dabei ebenfalls wirksame Lösungen gefunden.

Als Trennverfahren lernten wir bis jetzt solche Verfahren kennen, bei denen Teilchen auf Grund unterschiedlicher Eigenschaften voneinander getrennt werden. Hinzu kommen die sogenannten Abscheideverfahren, das sind diejenigen Trennverfahren, bei denen die Teilchen von dem sie umgebenden flüssigen oder gasförmigen Trägerstoff getrennt, bzw. in diesem konzentriert werden. Solche Abscheideverfahren muß man einschalten, wenn man reine Gase oder reine Flüssigkeiten gewinnen will, also zum Beispiel bei der Reinhaltung von Luft und Wasser, aber ebenso bei den sehr zahlreichen Produktionsprozessen, bei denen man reine Gase oder Flüssigkeiten benötigt, bzw. herstellen möchte oder die Feststoffe möglichst isoliert gewinnen will. Die Abscheideverfahren beruhen entweder darauf, daß die Teilchen von einem durchströmten Sieb oder Filter zurückgehalten werden, wobei das Strömungsmittel durch diese Teilchenschicht hindurchströmt, oder auf der Sedimentation der Teilchen im Strömungsmittel unter der Wirkung von

Schwerkraft und Fliehkraft, oder von elektrischen Feldkräften. Dabei gelten die gleichen Bewegungsgesetze wie bei den zuvor genannten Sedimentationsverfahren zum Trennen unterschiedlicher Teilchen.

Bei sehr feinen Teilchen nutzt man auch den Diffusionstransport der Teilchen in einem Konzentrationsgefälle oder einem Temperaturgefälle. Die Folgen eines solchen thermophoretischen Transportprozesses feiner Teilchen von einer wärmeren zur kälteren Zone kann die Hausfrau an der schnellen Verschmutzung der Vorhänge erkennen, die über der Heizung vor dem kalten Fenster hängen.

Wir kehren nochmals zum Beispiel der Kohle zurück. Ein Teil der Kohle wird als Stückkohle oder Kohlenstaub verbrannt, ein Teil, insbesondere bei der Braunkohle wird brikettiert. Die Brikettierung ist ein mechanisches Verfahren der Agglomeration. In die gleiche Verfahrensgruppe gehören beispielsweise das mit dem Brikettieren eng verwandte Tablettieren der Arzneimittel, das Granulieren oder Pelletisieren der Düngemittel, Erze, von Zement und vielen Chemikalien und Lebensmitteln – denken Sie etwa an Instant-Kakao – oder das Dragieren der Lebensmittel und Pharmazeutika.

Etwa 40–45 % der Steinkohle werden verkocht. Dabei werden die flüchtigen Bestandteile aus der erweichenden Feinkohle ausgetrieben. Sie sind zum Teil Ausgangsstoffe der chemischen Industrie, die damit in unser Blickfeld rückt. Die chemische Industrie stellt aus den organischen Rohstoffen, zu denen vor allem auch das Erdöl und Erdgas und noch das Holz zu zählen ist, aus Wasser und Luft und den im Steinbruch oder Bergbau gewonnenen festen anorganischen Ausgangsstoffen Hunderttausende verschiedener Produkte her. Jedes Produkt ist das Ergebnis eines vielstufigen Verfahrensablaufs. Im Zentrum steht die chemische Reaktion. Bei ihrer technischen Verwirklichung muß dafür gesorgt werden, daß die festen, flüssigen oder gasförmigen Reaktionspartner unter den für den Reaktionsablauf optimalen physikalischen Bedingungen miteinander in Kontakt kommen. Dies ist eine Aufgabe des Mischens und des Wärme- und Stofftransportes. Dadurch greifen die mechanischen und thermischen Verfahren in den chemischen Prozeß ein. Die den Reaktionsapparat verlassenden Produkte können im allgemeinen nicht direkt ihrer Bestimmung zuge-

führt werden. Sie müssen voneinander getrennt und aufgearbeitet werden.

Jede chemische Produktion erfordert also eine Vielzahl physikalischer d. h. mechanischer und thermischer Prozesse, die der chemischen Reaktion vorangehen, sie unmittelbar beeinflussen und ihr folgen. Die Investitionskosten für die physikalischen Verfahrensstufen sind im Mittel doppelt so groß wie die Kosten für den reinen Reaktionsteil.

Außer der chemischen Industrie gibt es viele andere in ihrer Produktionsstruktur sehr ähnliche Stoffwandlungsindustrien, bei denen die chemische Reaktion einen vergleichbaren, einen viel kleineren oder gar keinen Anteil am gesamten Umwandlungsprozeß beansprucht, zum Beispiel die Baustoffindustrien, die keramische und Glasindustrie, die Schleifmittelindustrie, die Eisenhüttenindustrie, die Düngemittelindustrie, soweit sie nicht bereits zur chemischen Industrie gehört, die Zellulose- und Papierindustrie, mit einem gewissen Produktionsanteil auch die Leder- und Textilindustrie, die Lebensmittel- und Futtermittelindustrie.

Mit Rücksicht darauf, daß die chemische Industrie nur einen Teil der Stoffumwandlungstechnik ausmacht, hat man in Deutschland vor ca. 30 Jahren den Namen Verfahrenstechnik für die Technik und das Ingenieurwesen der Stoffumwandlungsverfahren gewählt. In England und Amerika war bereits die Bezeichnung Chemical Engineering gebräuchlich. Beide Seiten sind nicht vollkommen glücklich. In England hört man gelegentlich, daß die Bezeichnung Process engineering vorzuziehen sei und in Deutschland bedauert man vielfach, daß seinerzeit nicht der Ausdruck Chemie-Ingenieurwesen übernommen wurde, der sich heute in der ganzen Welt durchgesetzt hat und sich dabei keinesfalls auf die chemische Technik beschränkt. Läßt man die Verfahrenstechnik die drei Gebiete Thermische, Mechanische und Chemische Verfahrenstechnik umfassen, so wird sie dem Sachbereich nach mit dem Chemical Engineering identisch.

Wenn wir ihren Ort im Raume der Wissenschaften näher beschreiben wollten, müßten wir in einem mehrdimensionalen Diagramm zwischen Physik, Chemie und Maschinenbau als den Hauptkoordinaten einen Raum ausmachen, der sich im Hinblick auf die chemischen Reaktionen nach der Chemie zu, hinsichtlich der physikali-

schen Verfahren und der Kerntechnik nach der Physik zu und mit Rücksicht auf die technische Gestaltung, auf Berechnung, Entwurf, Konstruktion, Fertigung und Betrieb nach dem Maschinenbau zu erstreckte und selbstverständlich mit der physikalischen Chemie, aber auch mit der Geologie, Mineralogie, Metallurgie und Pharmazie einerseits und dem Bauingenieurwesen, etwa der Bodenmechanik, dem Wasserbau und der Baustoffkunde andererseits gemeinsame Bezirke besäße.

Je nach den örtlichen und historischen Gegebenheiten haben sich Schwerpunkte entwickelt. Das angelsächsische Chemical Engineering nahm seinen Ausgangspunkt von der chemischen Technologie. In Deutschland lehnte sich die Verfahrenstechnik stark an den Maschinenbau an und zugleich pflegte die Technische Chemie die chemisch orientierte Seite. Heute wird die Notwendigkeit zu einem gemeinsamen Vorgehen immer deutlicher. Andere Disziplinen, wie der Bergbau und das Hüttenwesen, einschließlich der Fachrichtung Steine und Erden, die Wissensgebiete der Papieringenieure, Textilingenieure, Brauereingenieure, der Landtechnik beschränken sich auf bestimmte Stoffbereiche. Demgegenüber strebt die Verfahrenstechnik als Wissenschaftsdisziplin an, gerade das den verschiedenen stofflichen Anwendungen Gemeinsame und Grundsätzliche der einzelnen Umwandlungsmöglichkeiten zu erkennen und auf wissenschaftlich geklärte, quantitativ beschreibbare Erscheinungen zurückzuführen.

Hiermit sind wir nun beim eigentlichen Thema und wollen uns fragen, wie die Mechanische Verfahrenstechnik auf diesem Wege zur wissenschaftlichen Fundierung vorangeschritten ist, wo sie heute steht und wohin sie weitergehen muß. Ich kann dies nur an Beispielen deutlich machen.

Wie wir sahen, gehören zu den mechanischen Verfahren das Zerkleinern und Agglomerieren, eine große Zahl von Trennverfahren und das Mischen. Alle diese Techniken sind sehr alt. Das Mahlen von Feldfrüchten, das Anreiben von Farbstoffen, das Mischen keramischer Massen lernte der Mensch schon in den frühen Tagen steinzeitlicher Kulturen.

In den Hochkulturen entwickelten sich handwerkliche Manufakturen für Farbstoffe, für Textilien, Leder, Papier, für Nahrungs- und Genußmittel. Der Bergbau und das Hüttenwesen blühten.

Diese Techniken beruhten auf der von Generation zu Generation weitergegebenen Erfahrung. Ihr Wissen wurde beschreibend dargestellt.

Das 1556 erschienene berühmte Buch von Georg Agricola „De re metallica“ ist eine Art Kochbuch, eine sehr ins Einzelne gehende Beschreibung der bergmännischen Methoden, das mit sorgfältigen detaillierten Zeichnungen versehen ist, aus denen man genau entnehmen kann, wie man bei der Ausübung der einzelnen Verfahrensschritte vorzugehen hat. Erklärungen fehlen weitgehend. Eine derart genaue und vollständige Beschreibung ist aber bereits ein wichtiger erster Schritt zur Wissenschaft.

Erst zwei bis drei Jahrhunderte später, gegen das Ende des 18. Jahrhunderts findet die wissenschaftliche Lehre und Erforschung dieser Ingenieurkünste in der Gründung der Bergakademien betonte Pflegestätten. 1770 wurde die später in der Technischen Hochschule aufgegangene Bergakademie Berlin, 1775 und 1776 die Bergakademien Clausthal und Freiberg gegründet. Hier bemühte man sich auch um ursächliche Erkenntnisse und mathematische Darstellung mechanischer Aufbereitungsverfahren.

Wir wollen der Problematik solcher Bemühungen am Beispiel des Zerkleinerns nachgehen. 1867 veröffentlichte Peter Ritter von Rittinger, ein Altmeister der wissenschaftlichen Aufbereitungstechnik, sein Zerkleinerungsgesetz. Es besagt, daß der Energieaufwand beim Zerkleinern der neugeschaffenen Oberfläche proportional sei. Rittinger ging von der Vorstellung aus, daß bei einer Spaltung neue Spaltflächen geschaffen werden und glaubte, daß je Flächeneinheit einer neugeschaffenen Spaltfläche ein bestimmter Energiebetrag aufzubringen sei. Dies war aber eine willkürliche Annahme, die aus einer Modellvorstellung rührte, die den Vorgang des Zerkleinerns nicht richtig abbildet. Das Zerkleinern eines Gesteinsbrockens erfolgt nicht auf dem Wege der Spaltung, sondern dadurch, daß er durch Druck oder Stoß beansprucht wird. Aber auch eine etwa mit einem scharfen Messer oder Keil ausgeführte Spaltung eines Kristalls muß nicht das Rittingersche Postulat erfüllen.

Leider hat sich diese Methodik des Denkens bis heute fortgesetzt. Die Geschichte der Zerkleinerungstheorie ist eine Geschichte

leichtfertiger Denkweisen, die immer von sehr vereinfachenden oder auch willkürlichen Vorstellungen ausgehen.

Das zweite Zerkleinerungsgesetz wurde 1885 von Kick aufgestellt. Kick war Professor an der Technischen Hochschule in Prag. Er schreibt in seiner Veröffentlichung „Über die proportionalen Widerstände“, daß er von Redtenbacher in Karlsruhe zu seinen Untersuchungen angeregt worden sei. Sein Gesetz ist ein Ähnlichkeitsgesetz und als solches in der ersten Aussage korrekt. Sie besagt, daß bei ähnlicher Verformung ähnlicher Körper mit gleichem Stoffverhalten die Formänderungsarbeit dem Volumen proportional sei. Das Gesetz hat für Zerkleinerungsvorgänge nur deshalb wenig Wert, weil die Voraussetzung des gleichen Stoffverhaltens selbst bei verschiedenen großen Teilchen ein und desselben Stoffes nicht erfüllt sind. Die zweite Kicksche Feststellung, daß dann auch der Bruchflächenverlauf ähnlich sein müsse, entspricht wieder einer vereinfachenden Vorstellung und ist physikalisch nicht begründbar.

Um eine physikalisch richtige Auskunft zu erhalten, wird man die Physik der Bruchvorgänge zu betrachten versuchen. Die Physik des spröden Bruches wurde 1920 von Griffith auf eine einwandfreie energetische Bedingung zurückgeführt. Beim Bruch entstehen neue Oberflächen. Oberflächen sind Träger einer im Vergleich zum Stoffinneren zusätzlichen Energie, der Grenzflächenenergie. Diese Grenzflächenenergie ist bei den Festkörpern ebenso vorhanden wie bei den Flüssigkeiten. Bei diesen ist sie daran schuld, daß ein Tropfen als Kugel zusammengehalten wird. Sie bewirkt also bei einer Flüssigkeit, daß diese nicht beliebig zerteilt werden kann, sondern daß hierzu, denken Sie an das Zerstäuben des Brennstoffs im Dieselmotor, zusätzliche Energie erforderlich ist.

Entsprechend besagt die Griffithsche Bruchbedingung, daß für die Bruchflächenbildung von Festkörpern neue Grenzflächenenergie erforderlich ist und daß diese dadurch angeliefert wird, daß die bei der vorangegangenen Beanspruchung im Körpervolumen elastisch gespeicherte Energie bei der Bruchbildung frei wird. Diese Bedingung einer Umsetzung von volumengespeicherter in eine flächenabhängige Energie ist ganz analog der Forderung, daß bei der Kristallisation zunächst ein Kristallkeim oder bei der Kondensation ein Kondensationskeim gebildet werden müsse. Sie führt zu

dem Postulat, daß bei der Rißbildung als Rißkeim ein Anriß bestimmter Länge vorhanden sein muß. Die Größe dieses erforderlichen Anrisses, des sogenannten Griffithrisses, hängt von der Beanspruchung ab. Man denke an den Glasschneider: Wenn man eine Glasplatte mit einem Diamanten ritzt und damit einen scharfen Anriß erzeugt, dann kann man sie mit der Hand brechen. Wäre andererseits ein Glasstab von ca. 1 cm² Querschnitt völlig frei von jedem Anriß und jeder Fehlstelle, so könnte man eine Last von ca. 50 t, also 2–3 voll beladene Güterwagen an ihn hängen, weil dann bei einem Bruch im ganzen Querschnitt die sogenannte molekulare Zerreißfestigkeit überwunden werden müßte. Ist dagegen ein Anriß vorhanden, so muß nur an der Rißspitze, wo ja die Materiebausteine bei fortschreitendem Riß voneinander getrennt werden, die molekulare Festigkeit erreicht werden.

Die Erfüllung dieser Bedingung ist auf Grund der Kerbwirkung möglich, infolge einer Spannungssteigerung an der scharfen Rißspitze. Man kann sich diese Spannungssteigerung ganz ähnlich vorstellen wie die Zusammendrängung der Stromlinien, d. h. die Geschwindigkeitssteigerung bei der plötzlichen Verengung eines Strömungskanals. Das physikalische Problem der Sprödbruchbildung und des Rißfortschrittes stellt sich somit als ein Problem der Kerbspannungslehre dar. Seit wenigen Jahren hat sich eine eigene Disziplin innerhalb der Mechanik, die „Fracture mechanics“ gebildet, die die Lösung solcher Kerbspannungsaufgaben betreibt. Stimulierend waren hier die Probleme der Sprödbruchvermeidung bei hochbeanspruchten Bauteilen, etwa im Flugzeugbau und der Raumfahrt. Ihre mangelnde Beherrschung hatte u. a. zu einigen folgenreichen und vielbeachteten Flugzeugkatastrophen, zum Auseinanderbrechen mehrerer Liberty-Schiffe während des Krieges und zum plötzlichen Bruch von Brücken geführt.

Die kerbtheoretische Lösung liefert die Kenntnis des Spannungsverlaufes in der Umgebung eines sich ausbreitenden Risses, wobei sich an der Rißspitze extrem hohe Beanspruchungen einstellen, die zur Trennung des molekularen Stoffzusammenhaltes ausreichen. Die eigentliche physikalische Frage ist nun die Erkenntnis der Verformungsvorgänge und der molekularen Erscheinungen beim Rißfortschritt. Es zeigt sich, daß insbesondere das Gebiet hoher Energiekonzentrationen an der Rißspitze zu vielen Reaktionen Anlaß geben kann, zu mikroplastischen Verformungen, zu

Strukturänderungen, zu elektronischen Prozessen, zu adsorptiven und chemischen Reaktionen.

Diese Betrachtungen werden für viele von Ihnen recht unanschaulich sein, obwohl sich oft die Gelegenheit bietet, die Folgen der Erscheinungen anschaulich vor Augen geführt zu bekommen. Jeder Bruch eines Porzellantellers oder eines Weinglases oder gar ein Sprung in einer Fensterscheibe – kürzlich ein eingeschlagenes Schaufenster in einem Juweliergeschäft in der Kaiserstraße – bringt für den Bruchtheoretiker bei allem Bedauern des Schadens einen gewissen, oft großen Reiz der Anschauung und Erkenntnis mit sich.

Die Erkenntnisse der Fracture mechanics und der physikalischen und physikalisch-chemischen Fragestellungen nützen uns auch zum Verständnis der Brucherscheinungen beim Zerkleinern. Wir sind aber nicht in der Lage, das Verhalten der zu zerkleinernden Teilchen auf Grund dieser physikalischen Einsichten vorauszuberechnen. Dies hat hauptsächlich zwei Gründe:

Erstens sind die Teilchen unregelmäßig geformt. Wir können deshalb die bei der Beanspruchung entstehenden Spannungszustände nicht berechnen, noch nicht einmal vor der Anrißbildung, geschweige denn, daß das Kerbspannungsproblem lösbar wäre, das den Spannungsverlauf rings um den sich bildenden Riß beschreibt.

Zweitens haben wir zu wenig Kenntnis von den Anriß- und Fehlstellensystemen, die für die Bruchauslösung und Bruchverzweigung verantwortlich sind. Wir sahen ja, daß ein Rißkeim da sein muß. Auch bei metallischen Werkstoffen ist die Kardinalfrage des Sprödbruchproblems, wie ein solcher bruchauslösender Riß entstehen kann. In einem unregelmäßig geformten zu zerkleinernden Teilchen, etwa einem Kalkstein- oder Farbstoffteilchen sind diese Fragen noch viel undurchsichtiger. Oft sind die Anrisse, etwa an der Oberfläche glasiger Stoffe oder als Spalte in inhomogenen Gesteinsstrukturen oder Zellstrukturen schon vorhanden, in anderen Fällen müssen sie erst mittels eines Gleitprozesses gebildet werden.

Wir sind also noch nicht in der Lage, die physikalischen Vorgänge, die sich bei der Zerkleinerung eines Teilchens abspielen, genau und im einzelnen zu verfolgen.

Trotz dieser Unkenntnis gibt es neuere Zerkleinerungstheorien. Sie beruhen einmal darauf, daß man die Zerkleinerung eines Teilchenkollektivs als statistischen Prozeß auffaßt und Modellvorstellungen zugrundelegt, die der statistischen Behandlung zugänglich sind. Eine solche Theorie stammt von dem berühmten russischen Mathematiker Andrei Kolmogoroff. Sie hat den Vorteil, daß sie nachprüfbar phänomenologische Voraussetzungen über den Zerkleinerungsablauf einführt, die allerdings in der Wirklichkeit nur selten verwirklicht sind. Andere Theorien gehen von der Annahme bestimmter statistischer Verteilung der Fehlstellen in einem Korn aus. Sie sind meines Erachtens Musterbeispiele für aufwendige Theorien, die für die Sache praktisch keinen Aussagewert haben, also mehr der Verstandeschulung als der Sacherkenntnis dienen. Solche Theorien werden ja nicht selten produziert und durch die Erfahrung scheinbar belegt. Man vergleicht ihre Ergebnisse mit der experimentellen Erfahrung, wobei bestimmte, in der Theorie noch offen gelassene Anpassungsgrößen dem experimentellen Befund angepaßt werden. Man neigt zu der Annahme, daß die Theorie hinreichend bestätigt, d. h. brauchbar sei, wenn sie die experimentell gefundenen Funktionszusammenhänge wiedergibt. Man bleibt aber den Nachweis dafür schuldig, daß vor allem diese und nicht auch eine andere, vielleicht sogar widersprechende Theorie bei geeigneter Wahl der ihr eigenen Anpassungsgrößen das gleiche leisten könne. Ein strenger Beweis für eine solche Unmöglichkeit ist zwar nicht zu liefern, man sollte aber verlangen, daß gezeigt werde, wodurch sich eine Theorie vor anderen denkbaren Theorien auszeichnet.

Bei der Zerkleinerung eines Teilchenkollektivs in einer Mühle ist die Lage besonders komplex. Es überlagern sich drei unbekannte Systeme: die Beanspruchungen der einzelnen Teilchen, die Spannungsverteilung im Teilchen und die bruchbeeinflussenden Fehlstellensysteme in den Teilchen, ein weites Feld für einander widersprechende Theorien.

Wenn die Zerkleinerungswissenschaft hier nicht in eine Sackgasse geraten will, muß sie sich ein sicheres phänomenologisches Fundament schaffen. Dieses gewinnt man aus Versuchen am Einzelteilchen unter definierten und variierten Beanspruchungsbedingungen. Dies ist ein experimentelles Forschungsprogramm, das eine spezielle Meßtechnik verlangt. Die Ergebnisse solcher Messungen

geben allein die notwendige Information über das Stoffverhalten und erlauben mit Hilfe von Rechenautomaten die Vorausberechnung optimaler Lösungen. Um ein Beispiel zu nennen. 1964 wurden in der Welt 410 Millionen Tonnen Zement produziert und dabei für das Mahlen etwa 30–40 Milliarden kWh gebraucht, das ist etwa das Doppelte des Energiebedarfes des Landes Baden-Württemberg. Ist diese Energie erforderlich? Welcher Anteil kann gespart werden? Die Frage ist theoretisch nicht zu lösen. Sie war bis heute nicht beantwortbar.

Außer Zweifel hat in der Praxis im stetigen Zusammenspiel von Erfindung, Erprobung und Verbesserung ein empirischer Optimierungsprozeß stattgefunden, der vielleicht bereits zu einem Stand der Technik geführt hat, der nicht mehr weit von dem erreichbaren Optimum entfernt ist. Man sollte aber wissen, wo das physikalisch erreichbare Optimum liegt, um danach beurteilen zu können, in welchem Ausmaß weitere Entwicklungsarbeit wirtschaftlich vertretbar ist. Die Experimente an Einzelteilchen haben uns hierüber in jüngster Zeit einige Aufschlüsse gebracht. Demzufolge überschreitet der Energiebedarf der industriellen Zementmahlung den minimal erforderlichen Energiebedarf etwa um das Fünffache. Allerdings läßt sich auch sagen, daß die hierfür erforderlichen optimalen Beanspruchungsweisen im Großbetrieb mit 100 t Stundenleistung nicht verwirklicht sein werden.

Soviel als ein kurzer Problemeinblick in die Wissenschaft des Zerkleinerns. Sie enthält selbstverständlich noch sehr viele weitere Fragen und Aufgaben, deren Darlegung über die paradigmatische Absicht dieses Berichtes hinausgehen würde.

Günstiger ist die wissenschaftliche Position bei den Agglomerationsverfahren, obwohl viel weniger wissenschaftliche Arbeit geleistet wurde und die verfahrenstechnische Wissenschaft des Agglomerierens noch sehr in den Anfängen steht. Ihre Grundlage ist die Physik der Hafterscheinungen.

Wenn sich zwei Teilchen oder ein Teilchen und eine ebene Wand berühren oder in geringem Abstand gegenüberstehen, ziehen sie sich auf Grund molekularer Anziehungskräfte, der sogenannten Van-der-Waals-Kräfte an. Diese Van-der-Waals-Kräfte lassen sich aus bestimmten Stoffwerten berechnen, wenn die Krümmungsradien und der Abstand der Teilchen an der Kontaktstelle bekannt

sind. Die Berechnung wird dadurch komplizierter, daß die tatsächlichen Krümmungsradien von der Oberflächenrauigkeit abhängen und daß die Kontaktstellen sich unter der Wirkung der Van-der-Waals-Anziehung elastisch und plastisch verformen, doch sind auch diese Einflüsse theoretisch mit verhältnismäßig guter Genauigkeit erfaßbar. Der Einfluß der Van-der-Waals-Kräfte wird um so größer, je kleiner die Teilchen sind. Wenn Sie ein Sandkorn von 1 mm Durchmesser auf eine Kunststoffplatte legen und diese neigen, rutscht es ab. Das Gewicht des Teilchens ist größer als die Haftkraft. Machen Sie den gleichen Versuch mit einem Teilchen von $\frac{1}{1000}$ mm, d. i. ein Mikron Durchmesser, so können Sie die Wand um 180° kippen, das Teilchen bleibt haften. Die Rechnung ergibt, daß die Van-der-Waals-Haftkraft des 1-Mikron-Teilchens etwa das Millionfache des Teilchengewichtes beträgt. Abschleuderversuche in Zentrifugen bestätigen diese Rechnung.

Mit so kleinen Teilchen haben wir es aber häufig zu tun. Die Farbpigmente entfalten ihre beste Wirkung, wenn ihre Teilchengröße zwischen 0,2 und $1 \mu\text{m}$ liegt. Die Zuckerteilchen in einer Schokolade sollen kleiner als $20 \mu\text{m}$ sein, weil sie sonst auf der Zunge fühlbar sind. Kristallines Penizillin soll Teilchengrößen zwischen 5 und $10 \mu\text{m}$ besitzen, damit es bei der Injektion die Öffnung der Kanülen nicht verstopft, die Abbindezeit des Zements hängt entscheidend von der Teilchengröße ab, wobei Korngrößenbereiche zwischen $5 \mu\text{m}$ und $30 \mu\text{m}$ als optimal angesehen werden, die Hartmetalle werden aus Teilchen von wenigen μm Durchmesser gesintert, der braune Rauch der Konverter, der früher die Ruhrlandschaft belebte und aus den Abgasen abgeschieden werden muß, hat Teilchengrößen von $\frac{1}{100}$ bis $\frac{1}{10} \mu\text{m}$.

Die Van-der-Waals-Haftung ist nicht der einzige Bindungsmechanismus bei der Agglomeration. Das Kind, das im Sandkasten spielt, muß den Sand anfeuchten. Trocknet der Sand aus, so fallen die schönen Bauwerke zusammen. Die Verfahrenstechnik nutzt dieses Phänomen bei der Feuchtgranulation. Die Bindung wird in diesem Fall durch Kapillarkräfte vermittelt. Dieser Mechanismus ist theoretisch am besten zugänglich. Die berechneten Festigkeiten stimmten mit den Meßwerten gut überein.

Ich möchte noch auf eine dritte Gruppe von Erscheinungen eingehen, auf die Bewegungen der Teilchen und Teilchensysteme, die

sowohl bei den Zerkleinerungs-, Agglomerations- und Misch-Verfahren als auch bei allen Trennverfahren bedeutsam sind.

Der einfachste Modellfall liegt vor, wenn man die Bewegung einzelner Teilchen in einem Strömungsmittel betrachtet, die hinreichend weit voneinander entfernt sind, so daß man die gegenseitige Beeinflussung der Teilchen vernachlässigen kann. Solche Aufgaben sind theoretisch lösbar. Man muß zunächst die Trägerströmung mit den Methoden der Strömungslehre bestimmen und kann dann die Teilchenbewegung in der Trägerströmung berechnen, bei einfachen Fällen durch geschlossene Integration der Bewegungsgleichungen, in komplizierten Fällen mit graphischen, bzw. auf dem Digital-Computer lösbaren Näherungsmethoden oder mit Hilfe von Analog-Rechenmaschinen. Auf diese Weise lassen sich die auf der isolierten Teilchenbewegung beruhenden Trennverfahren theoretisch behandeln, z. B. die Windrichtung im aufsteigenden oder spiraligen Trägergasstrom, die Abscheidung in Zyklonen, das Absetzen in Zentrifugen.

Sehr viel schwieriger wird die Bestimmung der Bewegungsvorgänge, wenn die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen berücksichtigt werden müssen. Diese treten bereits bei der Teilchenbewegung im Strömungsmittel auf, wenn die von den Teilchen verursachten Strömungen sich gegenseitig beeinflussen, ohne daß die Teilchen sich zu berühren brauchen. Weitere Wechselwirkungen sind Teilchenstöße und Haftkräfte zwischen den Teilchen.

Die gegenseitige Strömungsbeeinflussung beginnt bereits bei Volumenkonzentrationen von $1/10$ Promille. Dabei treten unerwartete und seither nicht beachtete Phänomene auf, auf die einzugehen aber hier zu weit führen würde.

Die konzentrationsabhängige gegenseitige Strömungsbeeinflussung läßt sich in der Rechnung approximativ, mit Hilfe empirischer Daten berücksichtigen. Wenn dagegen die gegenseitigen Teilchenstöße ins Spiel kommen, werden die Berechnungsmöglichkeiten sehr viel fragwürdiger.

Betrachten wir als ein Beispiel für Teilchenstöße den Transportvorgang auf einer sogenannten Schüttelrinne oder einem Schwingesieb. Die Unterlage, eine Blechrinne oder ein Sieb schwinde hin und her mit schräg zur Fläche liegender Schwingungsrichtung.

Man kann sich ein einfaches Modell des Transportvorganges konstruieren, wenn man annimmt, daß alle Teilchen im Gleichtakt, also als eine zusammenhängende feste Masse von der Schwingrinne schräg nach vorne geworfen werden, nach vollzogener Wurfparabel wieder auf die schwingende Unterlage im sogenannten plastischen Stoß, d. h. ohne Rückprall auftreffen und bei der nächsten Abwurfphase erneut abgeworfen werden. Die Teilchenschicht würde sich dann schrittweise im Gleichtakt mit der Siebschwingung und alle Teilchen wie eine Armee im hüpfenden Gleichschritt vorwärtsbewegen. In Wirklichkeit bewegen sich die Teilchen aber nicht so, wie unser Modell es will. Sie übertragen gegenseitige Stöße, wodurch die Armee in Unordnung gerät. Einige Teilchen werden vorwärts, andere rückwärts gestoßen, die oberen Teilchen werden von den unteren in verschiedenen Richtungen getroffen und nicht von der Unterlage und tanzen gleichsam über diese hinweg, ohne sie überhaupt zu berühren. Es stellt sich ein völlig anderes Bewegungsspiel ein, als es dem Modell entspricht. Die Modellrechnung liefert nur die Tendenz des Einflusses von Schwingungsamplitude und Frequenz, aber nicht die tatsächliche Transportbewegung und -geschwindigkeit der Teilchen. Diese ist nicht gleichmäßig. Einige Teilchen gelangen schnell ans Ende der Rinne, andere verweilen lange. Man erhält eine statistische Verteilung der Verweilzeiten, aus der Mittelwert und Streuung der Transportgeschwindigkeit ermittelt werden können. Diese Verweilzeitverteilung muß man messen. Man kann auch ein statistisches Modell der Teilchenbewegung konstruieren. Dabei geht man zweckmäßig von der Theorie der sogenannten Markoffschen Prozesse aus, d. h. man setzt voraus, daß ein Teilchen sich schrittweise zufallsbeeinflusst bewege und dabei keine Rückerinnerung an die vorangegangenen Schritte besitze. Für jeden nächsten Schritt ist nur die augenblickliche Position und nicht der zuvor zurückgelegte Weg maßgeblich. Dieses Modell liefert eine Verweilzeitverteilung der Teilchen und damit die richtige Bewegungsstruktur.

Das Modell des Markoffprozesses läßt sich auch auf Mischprozesse anwenden. Während bei dem Transportprozeß sich die Längsvermischung überlagert und eine Verweilzeitverteilung erzwingt, kann bei einem Mischprozeß gerade der umgekehrte Prozeß sehr störend sein. Man möchte eine möglichst vollständige Vermischung erreichen, kann aber beobachten, daß nun selektive

Transportprozesse die Herstellung einer gleichmäßigen Mischung verhindern.

Versuche in unserem Institut haben gezeigt, daß es nahezu ausgeschlossen ist, zwei Fraktionen rieselfähiger Pulver in einem Mischer mit bewegten Mischorganen gleichmäßig zu vermengen, sofern die Teilchen beider Fraktionen größere Massenunterschiede besitzen. Obwohl die Mischorgane eines solchen Pulvermischers so gestaltet sind, daß möglichst unregelmäßige Bewegungen entstehen und nicht irgendeine Bewegung bevorzugt wird, ergeben sich doch selektive Transportkomponenten, und dies hat zur Folge, daß sich an bestimmten Stellen des Mischraumes die eine Komponente und an anderen Stellen die andere Komponente anreichert.

Nach diesen Ausblicken in konkrete wissenschaftliche Probleme kehre ich nun zur Ausgangsfrage zurück. Wo steht die Mechanische Verfahrenstechnik auf ihrem Wege zur Wissenschaft?

Die Verfahrenstechnik ist eine Ingenieurdisziplin, ihre Wissenschaft eine technische Wissenschaft. Eine technische Wissenschaft soll die Unterlagen für die systematische und optimale Lösung technischer Aufgaben liefern. Eine notwendige erste Seite einer solchen Wissenschaft ist die systematische Beschreibung der verfügbaren technischen Möglichkeiten. Die Werkstoffkunde zum Beispiel liefert eine umfangreiche Phänomenologie der vorhandenen Werkstoffe und ihrer Eigenschaften. Diese ist unentbehrlich für den Ingenieur, der die Werkstoffe benutzt. Auch die Naturwissenschaft bedarf dieser phänomenologischen Seite, man denke an die Biologie und die Chemie. Die Mechanische Verfahrenstechnik wurde lange Zeit hindurch und wird auch heute noch vielfach empirisch betrieben und entwickelt. Bei der großen Variabilität des Stoffverhaltens ist eine entsprechend große Mannigfaltigkeit technischer Lösungen gefunden worden. In der wissenschaftlichen Behandlung nahm folglich die phänomenologische beschreibende Seite lange Zeit einen großen Raum ein. Man schaue in Lehrbücher der Aufbereitungstechnik oder die wenigen Bücher und Monographien, die es über Zerkleinern, Zentrifugieren, Filtern, Brikkettieren gibt, hinein und wird diese Feststellung bestätigt finden. Hinsichtlich dieser phänomenologischen, die Verfahren beschreibenden Seite unserer Wissenschaft möchte ich zwar nicht sagen,

daß wir am Ende angelangt sind, denn die empirische Entwicklung schreitet weiter, ich möchte aber doch annehmen, daß die Hauptleistung in der Vergangenheit liegt und daß wir den Weg zur Verfahrensphänomenologie zu einem guten Teil zurückgelegt haben. Eine technische Wissenschaft muß sich auf der anderen Seite um die theoretische Erkenntnis von Wirkungszusammenhängen und deren mathematische Darstellung bemühen. Dies führt sie zwangsläufig zur Naturwissenschaft, fordert die naturwissenschaftliche Forschung heraus wie andererseits die naturwissenschaftliche Erkenntnis zur technischen Anwendung drängt. Am Beispiel des Sprödbruches oder der Hafterscheinungen haben wir gesehen, wie technische Probleme die physikalische Forschung aktivieren. In der Mechanischen Verfahrenstechnik haben wir keinen Mangel an wissenschaftlichen Problemen dieser Art, auch nicht an theoretischen Fragen. Die Schwierigkeit liegt in der Kompliziertheit der Systeme. Nur ein Teil der gestellten Fragen ist so einfach gelagert, daß wir sie mit dem Rüstzeug, das uns die Mechanik, Strömungslehre, Thermodynamik, die Physik und Mathematik bereitstellen, unmittelbar behandeln und lösen können. Versuchen wir dies auch bei den komplexen Fragen, so geraten wir in die Gefahr der Simplifikation. Es werden zu einfache Modelle betrachtet. Die darauf aufbauenden Theorien haben keinen befriedigenden Aussagewert und keine technische Relevanz.

Somit sehen wir uns vor der Aufgabe, diese komplizierten Systeme und ihre Verhaltensstrukturen experimentell zu erforschen. Diese Experimente liefern eine Phänomenologie des Stoffverhaltens und der elementaren Verfahrensschritte, als Grundlage für Berechnung und Entwurf optimaler Lösungen. Das Experiment muß so angelegt sein, daß es den Anschluß an vorhandene naturwissenschaftliche Erkenntnisse herstellt. Dies bedeutet, daß die verfahrenstechnische Forschung unter Umständen weit in die angewandte Physik hineinreichen muß.

Auf der anderen Seite sollte man die technische Anwendung im Auge behalten. Die Industrie denkt hier manchmal zu kurzfristig, wenn sie glaubt, eine technische Forschung müsse unmittelbar zu technisch-wirtschaftlich verwertbaren Ergebnissen führen. Dies ist hier nicht gemeint. Die technische Forschung muß ein Fundament bauen, auf dem eine nächste Schicht und vielleicht sogar abermals

eine Schicht von Erkenntnissen abgestützt werden kann, bis der Sumpf der Unklarheiten soweit trockengelegt ist, daß man bei der technischen Anwendung der wissenschaftlichen Erkenntnisse nicht wieder hilflos versinkt. In diesem Sinne sollte man die technische Anwendung bei der Planung und dem Vollzug der technisch-wissenschaftlichen Forschung im Auge behalten. Dies setzt eine gewisse Urteilsfähigkeit voraus, die wahrscheinlich in der praktischen industriellen Erfahrung besser erworben werden kann als an der Hochschule. In der Mechanischen Verfahrenstechnik verlangt eine so geführte Forschung zugleich, daß die Arbeiten in einer gewissen Dichte und mit gegenseitigem Kontakt angesetzt werden, weil es wenig Sinn hat, hier einen Pfahl in den Sumpf zu schlagen und weit davon entfernt dann einen Stein hinabsinken zu lassen, sondern die eine Arbeit die andere stützen muß.

Ich möchte damit nicht sagen, daß nicht schon etliche Pfähle in dem Sumpf stecken und auch mehrere Steine hineingeworfen wären, auf die wir uns bereits stützen können. Ich wollte aber zum Ausdruck bringen, daß die Mechanische Verfahrenstechnik als experimentelle und theoretische Wissenschaft doch erst den Anfang ihres Weges zurückgelegt hat, daß noch viele Fragen ihrer wissenschaftlichen Lösung harren und daß, so hoffe ich, noch manches anregende und aufregende wissenschaftliche Abenteuer vor uns liegt.