

Was ist eigentlich Verfahrenstechnik

Aus Ausgangsstoffen werden hochwertige Endprodukte erzeugt

Was es mit den Unit Operations auf sich hat

Worin sich thermische und mechanische Verfahren unterscheiden

Wie sich die Verfahrenstechnik im Laufe der Geschichte entwickelt hat

## Kapitel 1

# Verfahrenstechnik – was ist das eigentlich?

**D**ie Verfahrenstechnik ist, wie der Name schon andeutet, eine technische Disziplin. Hier wird kein Gerichtsverfahren verhandelt, niemand verurteilt oder freigesprochen. Auch mit der leidigen Verkehrspolitik hat der Verfahrenstechniker nichts am Hut, er ist nicht für den Stau im morgendlichen Berufsverkehr verantwortlich. Und verfahren können Sie sich auch ohne Verfahrenstechnik.

## Verfahrenstechnik, die Stoffumwandlungstechnik

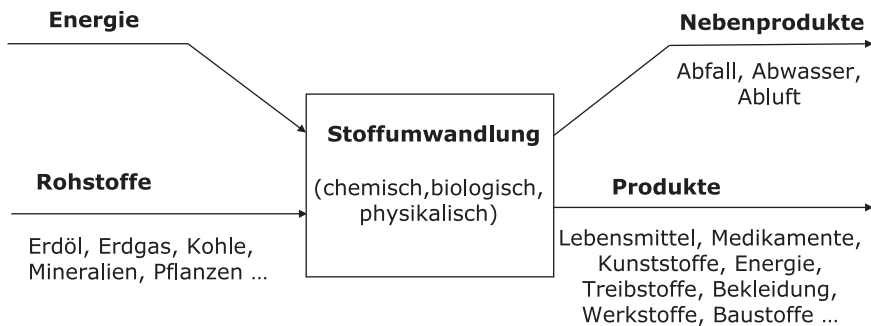
Die Verfahrenstechnik befasst sich mit der Umwandlung von Rohstoffen in Produkte des alltäglichen Lebens. Dazu müssen Sie Rohstoffe in höherwertige Endprodukte umwandeln. Dies erreichen Sie, wenn Sie die Rohstoffe in ihrer

- ✓ Art,
- ✓ Eigenschaft und/oder
- ✓ Zusammensetzung

verändern. Sie können den Verfahreningenieur mit einem Koch vergleichen, der aus verschiedenen Zutaten ein neues Gericht (Produkt) kreiert.



Aus Rohstoffen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Mineralien, Pflanzen) werden durch Stoffumwandlung höherwertige Produkte wie zum Beispiel Lebensmittel, Medikamente, Kunststoffe, Bekleidung, Werkstoffe, Baustoffe, Energie oder Treibstoffe hergestellt (Abbildung 1.1).



**Abbildung 1.1:** Herstellung von Endprodukten

## Stoffe werden umgewandelt

Um hochwertige Endprodukte zu erzeugen, müssen Ausgangsstoffe umgewandelt, verändert werden. Nun wandeln sich Stoffe leider nicht von allein um, sie müssen gewissermaßen gezwungen werden. Zur Umwandlung von Rohstoffen in verkaufsfähige Produkte müssen Sie dem System daher immer Energie zuführen.

Leider fallen bei der Stoffumwandlung teilweise Nebenprodukte wie Abwasser, Abfall oder Abluft an, die behandelt werden müssen, damit sie gefahrlos an die Umwelt abgegeben werden können. Auch dies ist Aufgabe des Verfahrenstechnikers: er hält die Umwelt sauber!

Wie können Sie eine Stoffumwandlung herbeiführen?

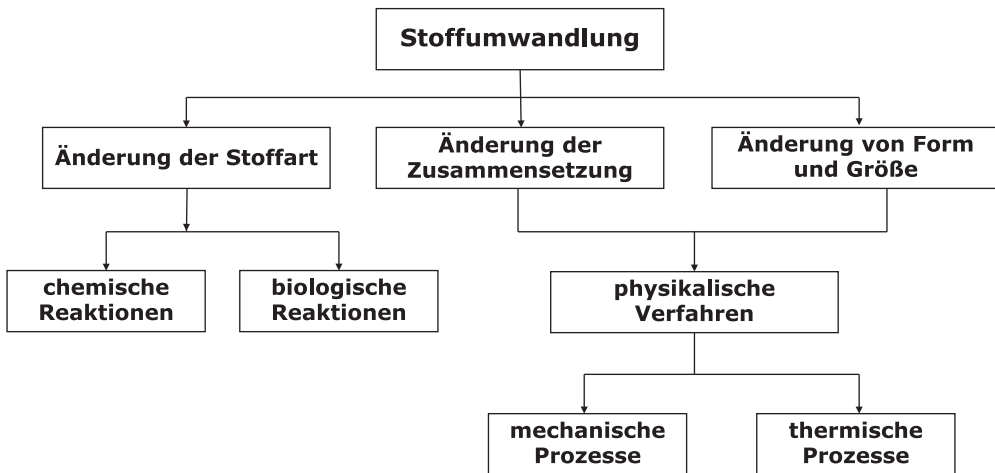


Die Stoffumwandlung kann erfolgen durch (siehe Abbildung 1.2)

- ✓ Änderung der Stoffart durch chemische und biologische Reaktionen (zum Beispiel Herstellung von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) aus Stickstoff und Wasserstoff, biologische Umwandlung von Zucker in Alkohol durch Gärung),
- ✓ Änderung der Zusammensetzung (zum Beispiel Trennung des Zuckersafts in Zucker und Wasser, Destillation von Alkohol aus einer wässrigen Lösung),
- ✓ Änderung der Form und Größe (zum Beispiel Zerkleinerung von Zuckerrüben, Mahlen von Getreidekörnern zu Mehl).

Während die Änderung der Stoffart durch chemische und biologische Reaktionen hervorgerufen wird, erfolgt die Änderung der Zusammensetzung beziehungsweise der Form und

Größe durch physikalische Verfahren. Diese können Sie in thermische (siehe Teil III) und mechanische Prozesse (siehe Teil IV) unterteilen (Abbildung 1.2).



**Abbildung 1.2:** Einteilung der Stoffumwandlungsverfahren



Bei mechanischen Prozessen erfolgt, das haben Sie sicher vermutet, die Stoffumwandlung durch den Eintrag von mechanischer Energie, zum Beispiel bei der

- ✓ Zerkleinerung von Zuckerrüben in Schnitzel durch mechanisch arbeitende Messer oder der
- ✓ Zerkleinerung von Getreide in Mehl durch Mühlen.

Bei den thermischen Prozessen ist das nicht ganz so anschaulich, da die Stoffumwandlung im molekularen Bereich stattfindet. Einem Stoffgemisch muss Energie in Form von Wärme oder Kälte zu- oder abgeführt werden, damit es zu einer Stoffänderung kommt.



Beispiele sind hier die

- ✓ Trocknung eines feuchten Guts oder die
- ✓ Alkoholdestillation, wo durch Erhitzen der alkoholhaltigen Lösung der Alkohol mit der geringeren Siedetemperatur (78 °C) vor dem Wasser mit einer Siedetemperatur von 100 °C verdampft. Dadurch wird Alkohol von Wasser getrennt.

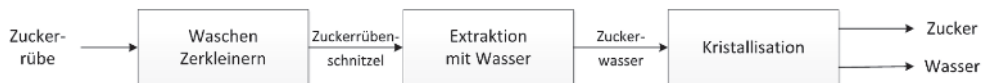
## Sind Stoffumwandlungsprozesse eigentlich kompliziert?

Bevor die eigentliche Stoffumwandlung stattfinden kann, sind häufig vor- und nachbereitende Maßnahmen erforderlich, was die Komplexität des Verfahrens leider erhöht. In Abbildung 1.3 können Sie die typische Abfolge eines Stoffumwandlungsprozesses erkennen. Bevor der Hauptschritt der Stoffumwandlung durchgeführt werden kann, muss der

Rohstoff vorbereitet werden. Durch die folgende Stoffumwandlung wird das neue Produkt erzeugt. Dieses verfügt häufig nicht über die gewünschte Reinheit. Um ein verkaufsfähiges Produkt zu realisieren, ist eine Aufbereitung erforderlich.



### Beispiel Zuckerherstellung



**Abbildung 1.3:** Verfahrenskette der Stoffumwandlung



Schauen Sie sich als Beispiel die Zuckerherstellung an. Die Zuckerrüben müssen in der Vorbereitung gewaschen und zu Schnitzeln kleingeschnitten werden. In der physikalischen Stoffumwandlung wird in einem Extraktionsturm (Extraktion und Kristallisation werden in Teil III erklärt) der Zucker mit Wasser aus den Zuckerrübenschnitzeln herausextrahiert, also herausgelöst. In der nachfolgenden Aufbereitung wird der Zucker vom Wasser getrennt (kristallisiert) und als verkaufsfähiges Produkt gewonnen.

Die Zahl der Verfahren und Prozesse, in denen Stoffe umgewandelt werden, ist sehr groß, weshalb die Verfahrenstechnik die Grundlage vieler Industriezweige bildet, wie zum Beispiel

- ✓ Chemische Industrie,
- ✓ Petrochemie,
- ✓ Pharmazeutische Industrie,
- ✓ Lebens- und Genussmittelindustrie,
- ✓ Papier- und Zellstoffindustrie,
- ✓ Bergbau,
- ✓ Hüttenwesen,
- ✓ Steine- und Erdenindustrie,
- ✓ Energiewirtschaft,
- ✓ Umwelttechnik,
- ✓ Entsorgungsindustrie.

Jetzt werden Sie vielleicht denken: Um Himmels willen, das sind ja alles völlig unterschiedliche Verfahren. Wie soll ich das jemals verstehen, das ist ja viel zu kompliziert! Keine Sorge, die Verfahrenstechnik bietet auch hierfür Lösungen. In allen Prozessen tauchen gleiche Aufgabenstellungen auf: An verschiedenen Stellen des Prozesses muss Wärme übertragen werden, müssen Feststoffe zerkleinert oder Flüssigkeiten mit Pumpen transportiert werden. Diese universellen Verfahrensschritte werden zu Grundoperationen zusammengefasst, den Unit Operations. Jetzt müssen Sie jeden Prozess nur noch in diese Grundoperationen zerlegen, schon sind Sie fertig. Gut, die Grundoperationen müssen Sie noch berechnen und auslegen, das lernen Sie aber in den folgenden Kapiteln.

## Prozesse in Unit Operations zerlegen

Um eine Stoffänderung zu erreichen und ein verkaufsfähiges Produkt zu erzeugen, können verfahrenstechnische Prozesse sehr komplex werden. Um solche Prozesse einer Berechnung zugänglich zu machen, werden sie in ihre »Bausteine« zerlegt, die Unit Operations oder Grundoperationen. Hier hat sich auch im deutschsprachigen Raum der Begriff Unit Operations durchgesetzt, den Sie auch benutzen sollten. Niemand spricht von Grundoperationen (hört sich ja auch fade an). Bei den Unit Operations laufen die physikalischen, biologischen oder chemischen Vorgänge immer nach den gleichen Grundprinzipien ab, egal welches Produkt erzeugt wird. Dadurch erfolgt die Auslegung der einzelnen Unit Operations immer nach dem gleichen Schema. Der Verfahrensingénieur macht daher nichts weiter als

- ✓ einen komplexen Prozess in seine Unit Operations zu zerlegen,
- ✓ die Unit Operations auszulegen (das lernen Sie in den folgenden Kapiteln) und am Ende
- ✓ die Unit Operations zu der gewünschten Gesamtanlage zusammenzufügen.

Das Zusammenfügen der verschiedenen Unit Operations zu einer Gesamtanlage wird Prozesssynthese genannt. Dann muss die Anlage nur noch gebaut werden. Nun ja, und nach der Inbetriebnahme möglichst auch funktionieren.

## Einteilung der Unit Operations

Tabelle 1.1 zeigt beispielhaft einige Unit Operations der Verfahrenstechnik. Die Verfahren werden allgemein nach ihrem Zweck in

- ✓ Reagieren,
- ✓ Vereinigen,
- ✓ Trennen,
- ✓ Zerteilen,
- ✓ Wärmeübertragen sowie
- ✓ Lagern, Verpacken, Fördern und Formgeben

Reagieren	Vereinigen	Trennen	Zerteilen	Wärmeübertragen	Lagern, Verpacken, Fördern, Formgeben
Chemisch	Mechanisch	Thermisch	Mechanische	Thermisch	Fördern
-Rührreaktor	-Rührer	-Destillation	Zerkleinerung	-Rekuperatoren	-Gurtförderer
-Rohrreaktor	-Mischer	-Rektifikation	-Brecher	-Absorptionskälteanlagen	-Becherwerke
-Katalysator	-Knetter	-Extraktion	-Mühlen	-Dampfstrahlkälteanlagen	-pneumatische Förderer
-Verbrennung		-Adsorption	-Schneiden	-Trocknung	-Schneckenförderer
		-Kristallisation		-Dampferzeuger	-Pumpen
Biologisch		-Absorption			-Verdichter
-Gärung		-Membrantechnik			
-Fermentation					
-biol. Abwasserreinigung		Mechanisch			Lagern
		-Sichtung			-Silos
		-Filtration			-Behälter
		-Sedimentation			-Becken
		-Zentrifugieren			
		-Membrantechnik			Formgeben
					-Tablettieren

**Tabelle 1.1:** Unit Operations der Verfahrenstechnik (Beispiele)

eingeteilt. Um den jeweiligen Zweck zu erreichen, sind physikalische, chemische oder biologische Kräfte erforderlich, wodurch die speziellen Unit Operations festgelegt werden.

## Unit Operations am Beispiel eines Kohlekraftwerks



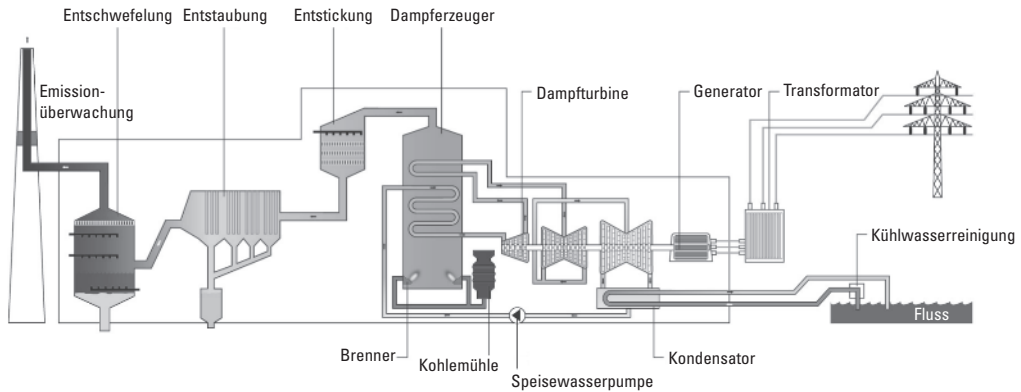
Für ein Kohlekraftwerk können Sie verschiedene Unit Operations anhand von Abbildung 1.4 identifizieren. Die angelieferte Kohle gelangt über Fördereinrichtungen zur Kohlemühle. Hier wird die Kohle staubfein zermahlen und mit vorgewärmter Luft getrocknet. Zusammen mit der Verbrennungsluft wird die Kohle in die Brennkammer eingeblasen und verbrannt. Bei der Oxidation der Kohle wird durch die exotherme Reaktion Wärme frei und es entstehen heiße Verbrennungsgase. Diese durchströmen den Dampferzeuger des Hauptkessels. Hierbei handelt es sich um ein von Wasser durchflossenes Wärmetauschersystem. Das Wasser nimmt die Wärme der Verbrennungsgase auf und verdampft dadurch bei hohen Temperaturen (über 500 °C) und Drücken (200 bar). In der Dampfturbine gibt der Dampf die in ihm gespeicherte Wärmeenergie als mechanische Energie an die Turbine ab. Die sich dadurch mit etwa 3000 Umdrehungen pro Minute drehende Welle der Turbine überträgt ihre Bewegungsenergie auf den Generator.

Der Generatorläufer dreht sich in einem Magnetfeld und wandelt dadurch seine Bewegungsenergie in elektrische Energie um. Über den Transformator wird der Strom als Produkt an die Kunden verkauft. Die nicht nutzbare Wärme wird im Kondensator über das Kühlwasser als Abwärme abgegeben, der Dampf kondensiert, das Kühlwasser erwärmt sich.

Die im Dampferzeuger abgekühlten Verbrennungsgase (Rauchgase) können nicht direkt an die Umwelt abgegeben werden, da bei der Verbrennung von Kohle als umweltbelastende Emissionen Stickoxide, Staub und Schwefeldioxid anfallen, die aus dem Abgasstrom entfernt werden müssen. Hier wird ein weiteres Aufgabengebiet der Verfahrenstechnik deutlich, der Umweltschutz. Mittels eines chemisch-katalytischen Verfahrens (DENOX) werden in der Entstickungsanlage durch Eindüsung von Ammoniak die Stickoxide zu elementarem Stickstoff reduziert. Die Entfernung der im Rauchgas mitgeführten Flugasche erfolgt mittels elektrischer Abscheider (Elektrofilter). Die Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) bildet den Abschluss der Rauchgasreinigung. In Waschtürmen (Absorption, die Erklärung liefert Ihnen Teil III) wird das Rauchgas mit einer Waschflüssigkeit (Kalksuspension) besprüht. Das Schwefeldioxid wird von der Waschflüssigkeit aufgenommen und reagiert hier mit dem Kalkstein zu Gips, der an die Baustoffindustrie verkauft wird. Ein Saugzug saugt das Rauchgas durch die Anlage. Das Rauchgas verlässt das Kraftwerk gereinigt über den Kamin.

Für das Beispiel Kraftwerk gemäß Abbildung 1.4 können unter anderem folgende Unit Operations identifiziert werden:

- ✓ Lagerung (Kohlehalde),
- ✓ Förderung (Kohleförderung über Gurtförderer),
- ✓ Zerteilen (mechanische Zerkleinerung in der Kohlemühle),
- ✓ Reagieren (Verbrennung als chemische Reaktion),
- ✓ Wärmeübertragen (Dampferzeuger),
- ✓ Reagieren (Entfernung von Stickstoffoxiden durch katalytische chemische Reaktion),
- ✓ Trennen (mechanische Trennung von Gas und Feststoff in der Entstaubung),
- ✓ Trennen (thermische Trennung von  $\text{SO}_2$  und Gas durch Absorption),
- ✓ Wärmeübertragen (Kondensator).



**Abbildung 1.4:** Unit Operations am Beispiel eines Kohlekraftwerks (EnBW)

## Thermische und mechanische Verfahren

In Abbildung 1.2 haben Sie gesehen, dass die physikalische Stoffumwandlung durch thermische oder mechanische Prozesse erfolgen kann. Was unterscheidet diese beiden Prozessarten aber voneinander? Thermische und mechanische Verfahren weisen folgende charakteristische Unterschiede auf:

### ✓ Mechanische Verfahren:

- Sie haben es mit makroskopisch großen Teilen zu tun (Feststoffe, Flüssigkeitstropfen, Gasblasen), die Teil eines mehrphasigen Stoffsystems sind.
- Die Bewegung makroskopisch großer Einzelteile wird durch die Gesetze der Mechanik beschrieben, nämlich durch das Einwirken äußerer Kräfte (zum Beispiel Schwerkraft, Fliehkraft, Trägheitskraft), thermische Molekularbewegungen können vernachlässigt werden.
- Die Zerlegung mehrphasiger Systeme in die einzelnen Komponenten (Phasen) erfolgt durch mechanische Verfahren.



Wird ein Gasstrom entstaubt, so ist dies ein typisches mechanisches Verfahren. Das mehrphasige System, bestehend aus Gas und Feststoff, wird in die einzelnen Komponenten, das heißt in die Phasen Gas und Feststoff zerlegt.

### ✓ Thermische Verfahren:

- Die Komponenten eines Stoffgemischs liegen als molekulare Einzelteilchen vor und bilden eine homogene Phase.
- Die Bewegung der Einzelteilchen (Moleküle) innerhalb der Phase ist ungeordnet und chaotisch (Brownsche Molekülbewegung).



- Die Zerlegung homogener Gemische in Teilströme erfolgt durch thermische Verfahren. Ein homogenes Gemisch besteht aus einer Phase, in der sich mehrere Komponenten befinden.



Ein homogenes Gemisch ist beispielsweise eine Flüssigkeit, die aus Wasser und Alkohol besteht. Dieses homogene Gemisch können Sie durch thermische Trennverfahren in die Komponenten Wasser und Alkohol zerlegen.

- Dominiert die ungeordnete, chaotische Bewegung von Molekülen (Brownsche Molekularbewegung), ist eine Trennung nur durch thermische Verfahren möglich.

Die Masse der Teilchen entscheidet somit, ob die Stoffumwandlung mit den Gesetzen der Mechanik oder den Gesetzen der Thermodynamik zu berechnen ist.



Das Beispiel der Rauchgasreinigung nach Kohlekraftwerken verdeutlicht Ihnen diese Zusammenhänge (Abbildung 1.5). Das durch Verbrennung erzeugte Rauchgas besteht hauptsächlich aus Stickstoff ( $N_2$ ), das mit der Verbrennungsluft zugeführt wird, aber nicht an der Verbrennungsreaktion teilnimmt. Der andere Hauptbestandteil des Rauchgases ist Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ), das durch die Oxidation des Kohlenstoffs der Kohle entsteht. Kohlenstoffdioxid ist zwar ein Treibhausgas, es sind hierfür aber keine konkreten Grenzwerte festgelegt. Neben diesen beiden Hauptkomponenten enthält das Rauchgas als für die Umwelt ungefährliche Komponenten Sauerstoff ( $O_2$ ), der als Überschuss der Verbrennung zugeführt wird, sowie Wasserdampf ( $H_2O$ ), der aus der Reaktion des Sauerstoffs mit dem in der Kohle enthaltenen Wasserstoff entsteht. Als umweltschädliche Stoffe, für die in der Gesetzgebung Grenzwerte festgelegt sind, entstehen bei der Verbrennung der Kohle die Gase Stickstoffoxid ( $NO_x$ ) und Schwefeldioxid ( $SO_2$ ) sowie Asche als Feststoff. Diese Stoffe müssen aus dem Gasstrom entfernt werden.

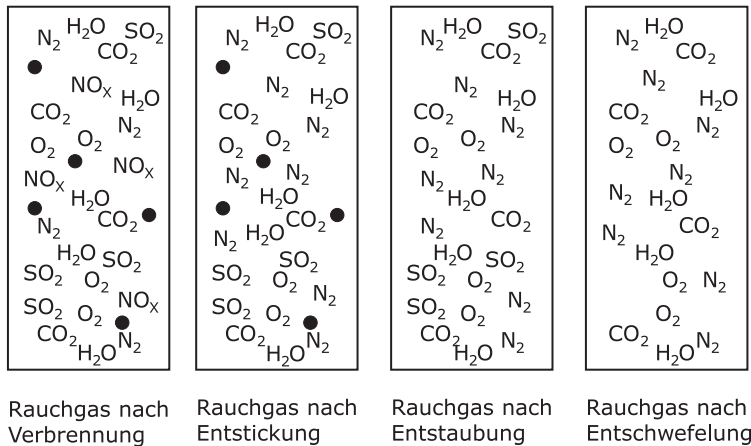
Nach dem Dampferzeuger strömt das Rauchgas der Rauchgasreinigung zu. Hier werden die umweltschädlichen Stoffe abgeschieden oder in ungefährliche umgewandelt. Zuerst wird in der Entstickung das  $NO_x$  ( $NO_x$  ist die Summenformel für die beiden Stickstoffoxide  $NO$  und  $NO_2$ ) in einer katalytisch-chemischen Reaktion zu elementarem Stickstoff reduziert:



Das umweltschädliche Stickstoffdioxid ( $NO_2$ ) wird mittels Ammoniak ( $NH_3$ ) zu den ungefährlichen und in der Atmosphäre natürlich vorkommenden Stoffen Stickstoff ( $N_2$ ) und Wasserdampf ( $H_2O$ ) umgewandelt.

In der Entstaubung werden die Aschepartikel abgeschieden. Hierbei handelt es sich um ein typisches mechanisches Trennverfahren. Die Feststoffphase wird von der Gasphase getrennt. Eine hundertprozentige Ascheabscheidung vorausgesetzt, besteht das Rauchgas jetzt nur noch aus einer gasförmigen Mischphase. In der letzten Unit Operation werden die Schwefeldioxidmoleküle

## ● Aschepartikel



**Abbildung 1.5:** Thermische und mechanische Trennverfahren am Beispiel der Rauchgasreinigung

aus dem Gasstrom abgeschieden. Die Trennung des  $SO_2$  vom Restgasgemisch findet innerhalb einer Phase und somit im molekularen Bereich statt. Dies ist ein typisches thermisches Trennverfahren (Absorption). Das gereinigte Rauchgas verlässt das Kraftwerk danach gereinigt über den Kamin.

## Geschichte der Verfahrenstechnik

Keine Sorge, Sie werden hier nicht tief in die Geschichte eindringen, werden keine Historiker oder Ähnliches. Der Autor hat sich auch nur bedingt für Geschichte interessiert, das einzige, was er aus dem Geschichtsunterricht mitgenommen hat, ist »333 bei Issos Keilerei«, das erste direkte Aufeinandertreffen der Kriegsherren Alexander der Große auf makedonischer und Dareios III. auf persischer Seite. Etwas Geschichte kann aber nicht schaden. Sie werden sehen, wo die Verfahrenstechnik ihre Wurzeln hat und wie sie sich in den letzten Jahrzehnten zu einer bedeutenden Wissenschaft entwickelt hat.

### Am Anfang war ... das Feuer

Die Entdeckung und Nutzung des Feuers stellen quasi den Beginn des verfahrenstechnischen Zeitalters dar. Der Mensch konnte jetzt durch ein einfaches Verfahren Naturstoffe in ihm genehme Formen umwandeln. So konnten zum Beispiel durch Räuchern Lebensmittel haltbar gemacht werden. Bezog sich der Einsatz zuerst auf die Nahrung, wurde schon bald auch Ton zu stabilen Gefäßen geformt. Sie merken: all dies ist Stoffumwandlung. Aus Ausgangsstoffen werden höherwertige Endprodukte hergestellt. Ton und Wasser werden gemischt und dann getrocknet und gebrannt. In der Bronzezeit (etwa 6000 v. Chr.) wurden

durch das Rösten von Erzen reine Metalle gewonnen, die zu Schmuck, vornehmlich aber zu Waffen geformt wurden. Dieser Vorgang zieht sich durch die menschliche Geschichte: es war wichtig, einen Vorsprung in der Waffentechnologie zu haben, um den Feinden überlegen zu sein. Schon früh stellte der Mensch fest, dass ein Hieb mit dem Schwert beim Feind größere Wirkung erzielte als der Schlag mit der Holzkeule.

## Früh übt sich: Destillation

Neben Waffen und Schmuck spielte auch der Alkohol im Laufe der Jahrhunderte eine große Rolle. Der biologische Gärprozess wurde bereits von den Babyloniern genutzt. So konnten sie Fruchtsaft in alkoholische Getränke umwandeln, die Stimmung stieg sofort. Aber auch Milch konnte zu Joghurt und Käse veredelt werden.

Vermutlich entdeckte der Mensch dies alles eher zufällig, so ist es kein Wunder, dass die Grundzüge der technischen Verfahrenstechnik, obwohl das damals noch niemand so nannte, die Erzeugung von Alkohol (siehe Abbildung 1.6), Arzneimitteln, Parfüm und Metallen waren. Auch die Grundlagen der Filtration waren schon in der Antike bekannt. Wein und andere Getränke wurden geklärt und damit der Trinkgenuss noch erhöht.



**Abbildung 1.6:** Weinklärung in der Antike

Im vierten Jahrhundert v. Chr. schlug Aristoteles die Möglichkeit der Destillation vor. Er schrieb: »Durch die Destillation können wir das Meerwasser trinkbar machen und der Wein genauso wie andere Flüssigkeiten können diesem gleichen Prozess ausgesetzt werden«. Gar nicht dumm, zuerst kam das Trinkwasser, dann der Alkohol. Die Destillation ist ein alter

Prozess, der bis in das Jahr 2000 v. Chr. zurückgeht. Die ersten Destillationen werden China, Ägypten und Mesopotamien zugeschrieben, vor allem zu medizinischen Zwecken, aber auch mit dem Ziel Essenzen und Parfüms herzustellen.

Selbstverständlich diente die Destillation auch zur Erzeugung hochprozentiger Getränke, um die Stimmung der Adligen, teils auch der gemeinen Bevölkerung, zu heben. Schon im Jahr 800 v. Chr. haben die Chinesen ein »hochgeistiges« Getränk aus Reis destilliert. Anfangs wurde solcher Alkohol für medizinische Zwecke verwendet, um die Lebenserwartung zu verlängern (das sogenannte »Heilwasser« oder »Elixier des Lebens«). Nun, für viele ist der Alkohol auch heute noch ein Elixier des Lebens, obwohl sorgfältig damit umgegangen werden sollte. Die ersten alkoholischen, destillierten Getränke wurden aus Trauben und Honig hergestellt. Abbildung 1.7 zeigt den Aufbau eines sehr alten Destillierkolbens.



**Abbildung 1.7:** Aufbau einer ursprünglichen Destilliervorrichtung

Die Erfindung der Alkoholdestillation wird dem arabischen Gelehrten Abu Musa Dschabir ibn Hayyan (circa 800 n. Chr.) zugeschrieben. Dschabir nahm einen runden Topf mit einem hohen Ausgießrohr, einem Teekessel nicht unähnlich. Unter das Ausgießrohr stellte er ein Gefäß und sammelte den sich kondensierenden Dampf. Da Dschabir ein Weingenießer war, füllte er Wein in den Kessel und fragte sich, was wohl passieren würde. Sie wissen heute, was geschah, der gute Dschabir hatte die Alkoholdestillation erfunden, den ersten Weinbrand genossen. Generationen von Genießern und Trinkern sind ihm dafür heute noch dankbar.

Im Jahre 1478 veröffentlichte ein österreichischer Arzt namens Michael Puff von Schrick das erste Buch über die Destillation. Und jetzt raten Sie einmal, was geschah. Genau, das Buch wurde ein absoluter Bestseller, in 20 Jahren gab es 14 Neuauflagen. Offiziell war es selbstverständlich ein medizinisches Nachschlagewerk! Viele Leser wussten aber nun zum ersten Mal, was Sie mit Ihren mühsam gesammelten Feldfrüchten anfangen konnten.

## Unter Tage: Bergbau

Ein weiterer wichtiger Bereich der frühen industriellen Tätigkeit war der Bergbau. Neben der Gewinnung von Erzen spielte hier zum ersten Mal die Luftverunreinigung eine entscheidende Rolle. Luftverunreinigungen wurden durch Gewerbe mit hohem Energieverbrauch wie zum Beispiel Töpfereien und Räuchereien für Fisch und Fleisch verursacht. Die Eisenerzgewinnung stellte aber bis in das 19. Jahrhundert die Hauptquelle für Luftverunreinigungen dar, da neben den sauren Röstgasen auch schwermetallreiche Stäube freigesetzt wurden. Hierdurch wurden neben der gesundheitlichen Beeinträchtigung der Menschen Schäden an Äckern, Wiesen, Nutztieren und Früchten angerichtet. Da die Erzgewinnung und damit auch der Hüttenbetrieb im Mittelalter in Deutschland fast ausschließlich auf die Mittelgebirge (Harz, Erzgebirge) beschränkt blieb, führte dies vornehmlich in den dortigen Tälern zu Konflikten zwischen den Hüttenleuten und den Großgrundbesitzern beziehungsweise Bauern. Die Böhmisches Könige und Kurfürsten verlangten bei Hüttenbetrieben im Erzgebirge eine Abluftreinigung mit den in Abbildung 1.8 gezeigten Flugstaubkammern (hier eine Darstellung aus dem Jahr 1556 von De Agricola), damit den anliegenden Feldern und Viehweiden kein weiterer Schaden zugefügt wird. Wohlgemerkt: Hier ging es nicht um den Schutz der Menschen, die waren in den Zeiten zu ersetzen, die Felder aber gehörten den Großgrundbesitzern, die durch den Verkauf der Felderträge ihren Wohlstand sichern wollten.

In den Flugstaubkammern konnte der Grobstaub aus dem Abgas abgeschieden werden. Dazu wurde der Rauch bei G aus dem Kamin in die Flugstaubkammer D geleitet. Aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeit in der Kammer fielen die groben Partikel nach unten aus und sanken auf den gefliesten Boden. Das von groben Partikeln gereinigte Abgas strömte bei E in den Kamin F und ins Freie. Dass Menschen in diesem Prozess keine große Bedeutung hatten, zeigt die Reinigung der Staubkammern. Der abgesetzte Staub wurde von der die Leiter hinaufsteigenden Person mit dem Reisigbesen D zusammengekehrt, sodass der Staub dem Schmelzvorgang A wieder zugeführt werden konnte. Die Reinigungskraft hatte eine feste Arbeitsstelle. Da die Schmelzöfen für den Reinigungsvorgang selbstverständlich nicht abgeschaltet wurden, könnte man hier aber auch von einer zeitlich befristeten Stelle sprechen! Die dargestellten Rauchfänge stellen den Beginn der Umwelttechnik dar.

## Die Industrialisierung

Während bis Ende des 18. Jahrhunderts Herstellungsprozesse verschiedener Waren (zum Beispiel Papier und Lebensmittel) bei den Zünften abliefen, sorgten die im 19. Jahrhundert entstehenden Fabriken für eine industrielle Nutzung verfahrenstechnischer Operationen. Besonders die Erfindung von Anilinfarben rief eine stürmische Entwicklung der chemischen Industrie hervor:

- ✓ 1863 Meister, Lucius & Co, Hoechst, später Hoechst AG,
- ✓ 1863 Friedrich Bayer & Co, Barmen, später Bayer AG,
- ✓ 1865 Badische Anilin- und Sodafabriken, Ludwigshafen, später BASF und
- ✓ 1867 Aktiengesellschaft für Anilinfarben, Berlin, später AGFA.

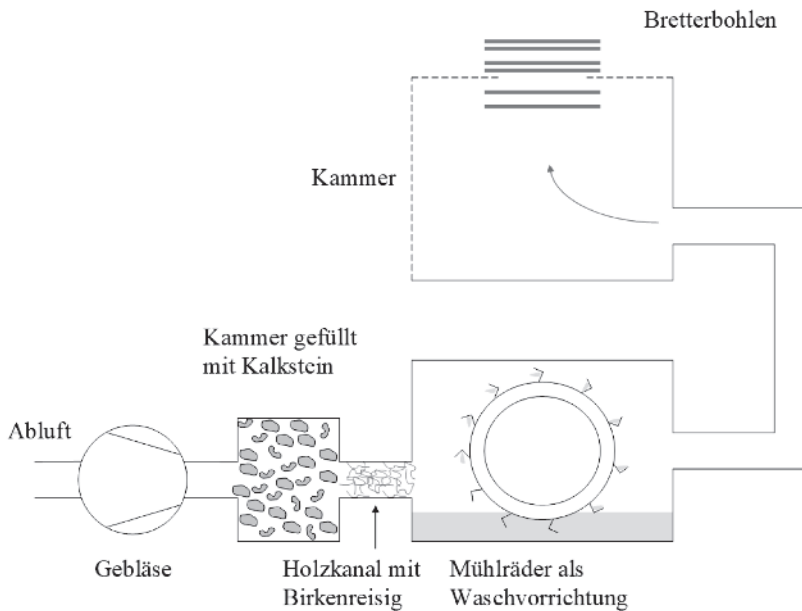




**Abbildung 1.8:** Historische Flugstaubkammer

Durch die starke Industrialisierung wurde aber auch die Kehrseite der Medaille sichtbar: die Umwelt wurde immer mehr in Mitleidenschaft gezogen. Mitte des 19. Jahrhunderts wurde aufgrund der massiv steigenden Industrialisierung in der Umgebung der industriellen Zentren ein weit verbreitetes Waldsterben festgestellt, dem besonders empfindliche Nadelhölzer wie Fichte und Tanne zum Opfer fielen. Sie sehen, auch das Waldsterben ist nicht neu! Da besonders das Erzgebirge betroffen war, wurden die Schadensmechanismen von der Bergakademie Freiberg sowie der Forstakademie Tharandt in Sachsen untersucht. 1872 erschienen in England Untersuchungen von Smith zu demselben Thema. Hier wurde erstmals der Begriff »saurer Regen« erwähnt. Nach dem Verständnis der Ursachen wurde nach geeigneten Gegenmaßnahmen gesucht. Die Verfahrenstechnik beziehungsweise Umwelttechnik nach heutigen Maßstäben war noch unbekannt, Maßnahmen wurden dadurch nach dem »Trial-and-Error-Prinzip« mit teilweise bescheidenen Erfolgen durchgeführt.

Aufgrund der beschriebenen Probleme wurden erste verfahrenstechnische Anlagen im Bereich des Umweltschutzes errichtet. So beschreibt Wislicenus die Reinigung saurer Rauchgase in Schindlers Blaufarbwerken bei Blockau im Erzgebirge im Jahre 1908 (Abbildung 1.9 soll die Abluftreinigungsanlage schematisch skizzieren, wie Sie anhand des folgenden Texts ausgesehen haben könnte):



**Abbildung 1.9:** Abluftreinigung einer Ultramarinfabrik

»Besonders erwähnenswert ist das Beispiel einer sächsischen Ultramarinfabrik, die noch vor wenigen Jahren ihrer Waldumgebung ungemein gefährlich war, heute aber vollen Erfolg mit der Kombination von Entsäuerung mit Luftverdünnung erzielt hat. Die Abgase werden zunächst durch große, mit Kalkstein gefüllte Kammern mittels eines Ventilators hindurchgetrieben und so der ursprünglich sehr hohe Säuregehalt beträchtlich herabgesetzt, aber nicht ganz entfernt. Statt die Restgase durch den Schornstein in die Luft

abzuführen, werden sie durch einen langen mit Birkenreisig gefüllten Holzkanal noch zu einer weiteren Waschvorrichtung, wo sie große, über Mühlräder stürzende Wassermassen passieren, geführt und schließlich durch die zahlreichen Ritzen einer aus losen Bretterbohlen gebildeten geräumigen Kammer an die Luft entlassen. Es entweicht nur ein feiner Nebel mit wenig Schwefelsäure beziehungsweise  $\text{SO}_3$ , der an Schädlichkeit nicht mit den ursprünglichen Schwefelsäuregasen vergleichbar ist«.

Es handelte sich bei der Anlage somit um ein frühes verfahrenstechnisches Konzept, das aus Adsorption mit chemischer Umsetzung am Kalk, einem Biofilter (Holzkanal mit Birkenreisig), einer Absorption mit Wasser als Absorbens (Mühlräder) sowie einem Tropfenabscheider (Kammer mit Bretterbohlen) bestand, siehe Abbildung 1.9. Heutige Verfahreningenieure werden sich ob dieser Anlagenschaltung vor Freude auf die Schenkel schlagen und aus dem Lachen nicht mehr herauskommen. Damals fehlten aber die wissenschaftlichen Grundlagen (die Sie spätestens nach dem Lesen dieses Buchs kennen werden), es wurde nur gebaut, was bekannt war. Und dass basischer Kalkstein Säure bindet, wusste man bereits damals. Auch Mühlräder waren bekannt, konnten daher wohl auch bei der Abgasreinigung nicht schaden.

Chemische Produkte wurden in der industriellen Produktion immer wichtiger. So entwickelte der Chemiker Baekeland 1909 ein Verfahren zur Herstellung des ersten hochvernetzten duroplastischen Kunststoffs, des so genannten Bakelits. Im gleichen Jahr wird das Haber-Bosch-Verfahren zur Herstellung von Ammoniak großtechnisch entwickelt, die Grundlage für eine gewaltige weltweite Ertragssteigerung in der Landwirtschaft durch die wirtschaftliche Bereitstellung von Düngemitteln. Die Zusammenarbeit des Chemikers Haber, der die chemische Reaktion entwickelte, und des Ingenieurs Bosch, der für die praktische Umsetzung und die Beherrschung der hohen Drücke verantwortlich war, setzte hier Maßstäbe. Es wurde zunehmend deutlich, dass ein Ingenieur für die technische Umsetzung chemischer Verfahren erforderlich war. Ja genau: ein Verfahreningenieur!

## Die Entwicklung der Verfahrenstechnik

In Deutschland gab es im 19. Jahrhundert lediglich das Fachgebiet der chemischen Technologie, die Verfahrensbeschreibungen vom Rohstoff bis zum Endprodukt lieferte. Das Konzept der Unit Operations wurde erst 1893 von Lunge in Zürich und 1915 von Arthur D. Little am Massachusetts Institute of Technology (MIT) formuliert. Hier gab es ab 1880 auch den ersten Chemical Engineer. Erste Vorlesungen zur Verfahrenstechnik wurden in Deutschland 1928 von Kirschbaum an der damaligen TH Karlsruhe angeboten. Kirschbaum leitete ab 1941 das erste verfahrenstechnische Institut, das »Institut für Apparatebau und Verfahrenstechnik«. 1935 wurde vom VDI die »Arbeitsgemeinschaft für Verfahrenstechnik«, später »Fachausschuss Verfahrenstechnik«, ins Leben gerufen, die Verfahrenstechnik etablierte sich langsam als wissenschaftliches Arbeitsgebiet. Es dauerte, bedingt durch den 2. Weltkrieg, allerdings bis zum Jahr 1952, als in Aachen das erste Institut für Verfahrenstechnik gegründet wurde. Seit 1959 wird Verfahrenstechnik an allen bedeutenden technischen Hochschulen angeboten.