



# 50 Jahre Dresdener Verfahrenstechnik

*01. und 02. Oktober 2003*

Technische Universität Dresden  
Barkhausen-Bau  
Heinz-Schönfeld-Saal (I/90)  
Georg-Schumann-Straße 11  
01187 Dresden



## Alkohol + Destillation => Unit Operation

(Little 1915)



Distillationsanordnung nach Petrus

Die Abtrennung von Bioethanol aus der Maische ist ein komplexer Prozess, der die Destillation als zentrale Unit Operation erfordert. In der Destillation wird die flüchtige Komponente (Ethanol) von der schwerflüchtigen Komponente (Wasser) getrennt. Die Destillation erfolgt in mehreren Stufen, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden.



Distillationsanordnung nach Little (1915)

Little (1915) hat sich für die Destillation als zentrale Unit Operation entschieden. Die Destillation wird in mehreren Stufen durchgeführt, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden. Die Destillation erfolgt in mehreren Stufen, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden.

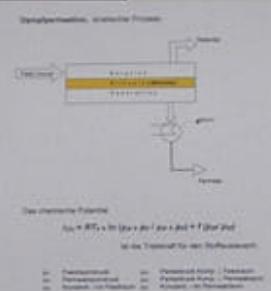
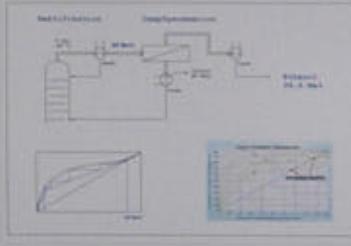


Distillationsanordnung nach Little (1915)

Die Destillation wird in mehreren Stufen durchgeführt, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden. Die Destillation erfolgt in mehreren Stufen, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden.

## Hybrid-Destillation mit Dampfpermeation

=> ignoriert den azeotropen Punkt



**Dampfpermeation zur Ethanoldestillation**  
Die Destillation von Ethanol aus der Maische ist ein komplexer Prozess, der die Destillation als zentrale Unit Operation erfordert. In der Destillation wird die flüchtige Komponente (Ethanol) von der schwerflüchtigen Komponente (Wasser) getrennt. Die Destillation erfolgt in mehreren Stufen, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden.

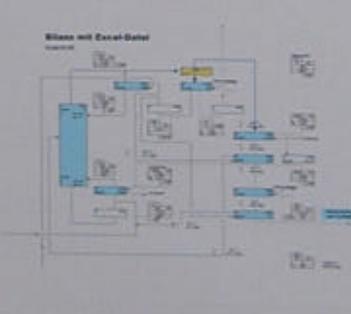
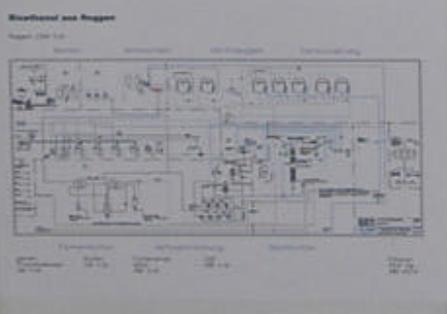
## Entwurf der Bioethanolanlage

**Destillationsverfahren**  
Die Destillation wird in mehreren Stufen durchgeführt, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden. Die Destillation erfolgt in mehreren Stufen, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden.



Die Destillation wird in mehreren Stufen durchgeführt, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden. Die Destillation erfolgt in mehreren Stufen, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden.

**Entwurf der Bioethanolanlage**  
Die Destillation wird in mehreren Stufen durchgeführt, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden. Die Destillation erfolgt in mehreren Stufen, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden.



**Dimensionierung mit Azeotrop**

Parameter	Value
...	...
...	...
...	...

Technologie: Aggregatensystem  
...

**Fazit:**  
Die Destillation wird in mehreren Stufen durchgeführt, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden. Die Destillation erfolgt in mehreren Stufen, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden.

**Auswertung:**  
Die Destillation wird in mehreren Stufen durchgeführt, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden. Die Destillation erfolgt in mehreren Stufen, wobei die Destillate in einer bestimmten Reihenfolge abgezogen werden.

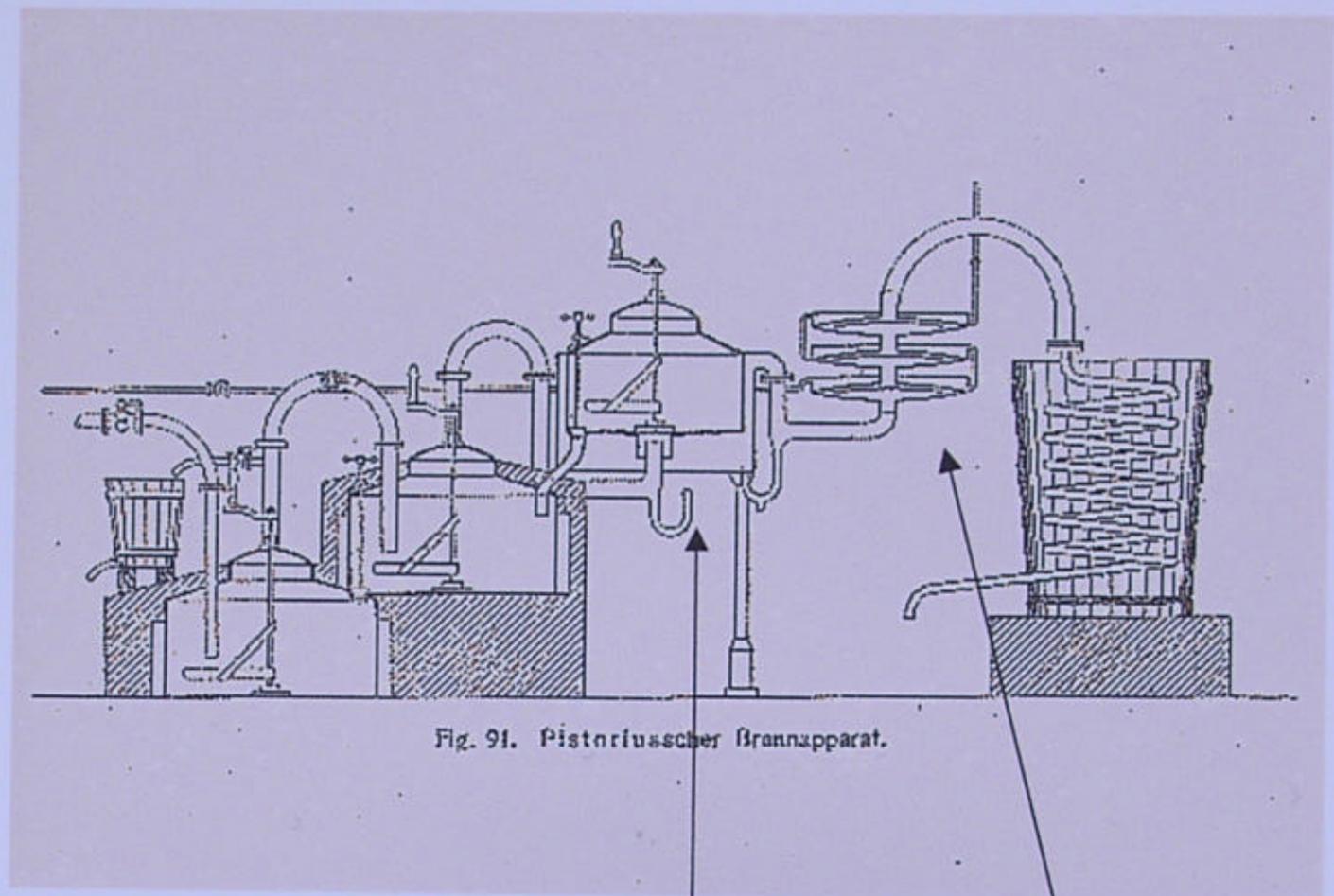


Fig. 91. Pistorius'scher Brennapparat.

Destillationsapparatur nach Pistorius

Vorwärmer

Pistorius'sche Becken  
Dephlegmation +  
Rektifikation

**Fortschritt:**

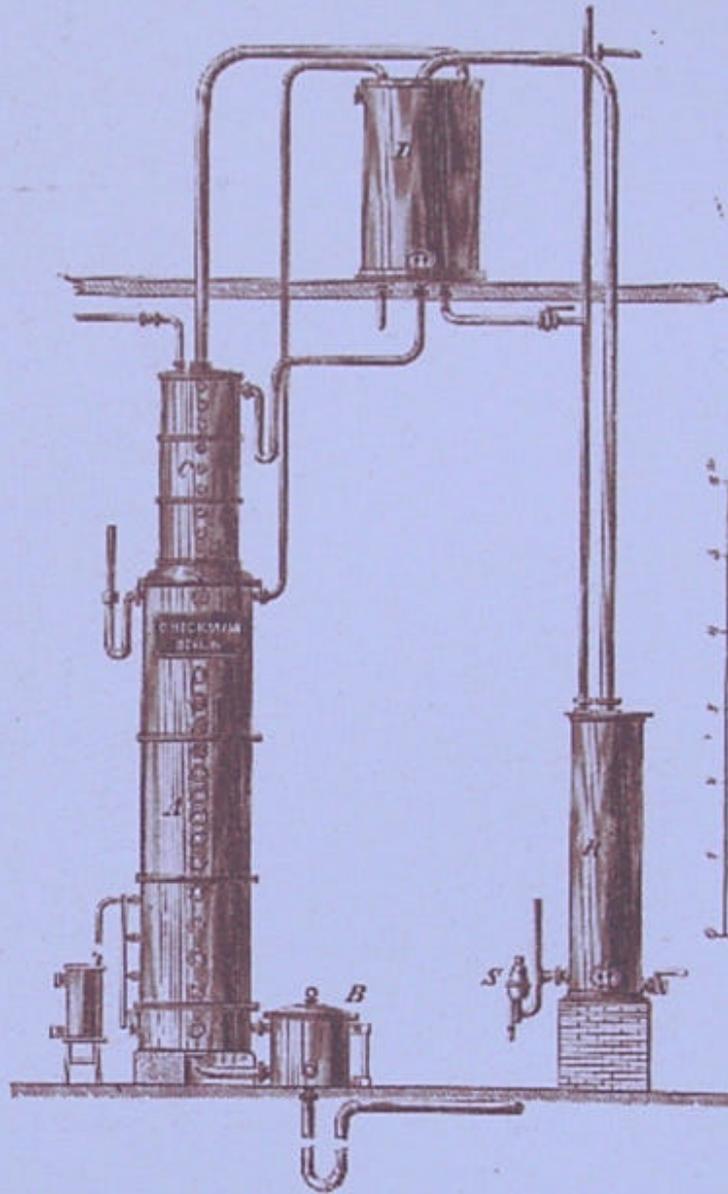
Einsparung an

Zeit: Dampfheizung, größere Gefäße,  
Arbeitskraft: In einem Schritt 80%-iger Alkohol,  
Brennmaterial: Vorwärmer, Dampfheizung.

Die Alkoholgewinnung durch Weindestillation ist seit ca. 1100 nachweislich erwähnt. Der Alkohol wurde hauptsächlich zur Herstellung von Medizin verwendet. Seit der Pestepidemie im 14. Jh. erfährt er eine starke Verbreitung auch als Trinkalkohol. 1870 gab es allein in Deutschland 16.000 Brennereien.

Die wichtigste Destillationsapparatur in der ersten Hälfte des 19. Jh. war die 1817 zum Patent angemeldete Anlage vom Kaufmann und Rittergutsbesitzer Johann H. L. Pistorius aus Weißensee/Berlin.

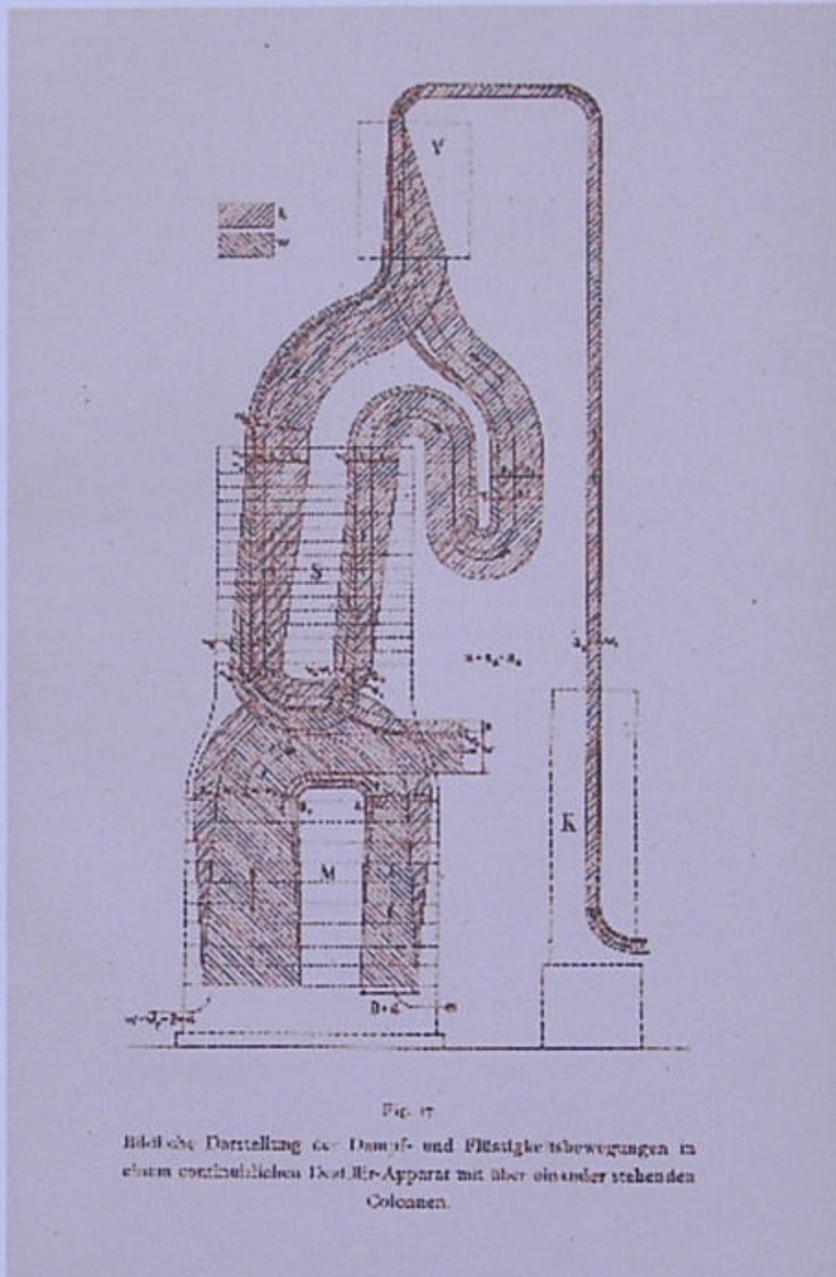
Pistorius war der erste, der in Deutschland zwei Destillierblasen benutzte, um damit ein alkoholreicheres Destillat zu erhalten. Die Apparatur von Pistorius war ein großer Fortschritt in Bezug auf Einsparung von Zeit, Arbeitskraft und Brennmaterial. Mit ihr wurde Weingeist mit 80% Alkohol in einem Schritt erreicht.



Maische-Destillierapparat Fa. C. Heckmann Berlin 1889

Alkohol gab den Anlaß zur Destillationstechnik und veranlaßte die Kupferschmiede zu kreativen Apparatekonstruktionen. Die Firma C. Heckmann, Berlin, baute seit 1824 Destillationsanlagen für Alkohol, Bauart Pistorius, und seit 1870 kontinuierliche Destillationsanlagen, zunächst Bauart Savalle (gelochte Böden), bald darauf mit Kapselböden und eigener Konstruktion.

Die Rektifizierkolonne wurde zu einer wesentlichen Apparatur im rapiden Wachstum der chemischen Großindustrie, wie z.B. mit der Erdöl-, Benzin- und Methanoldestillation.



**Bildliche Darstellung von E. Hausbrand:  
 Dampf- und Flüssigkeitsbewegungen in einem kontinuierlichen Apparat**

aus E. Hausbrand „Die Wirkungsweise der Rectificir- und Destillir-Apparate“, Verlag Springer, Berlin 1893.

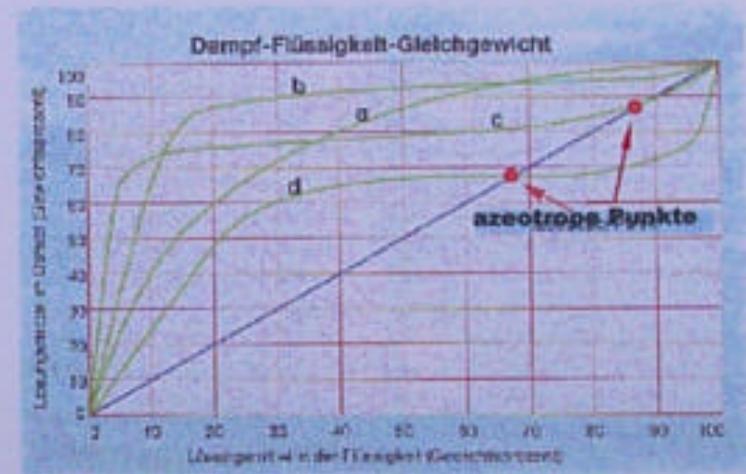
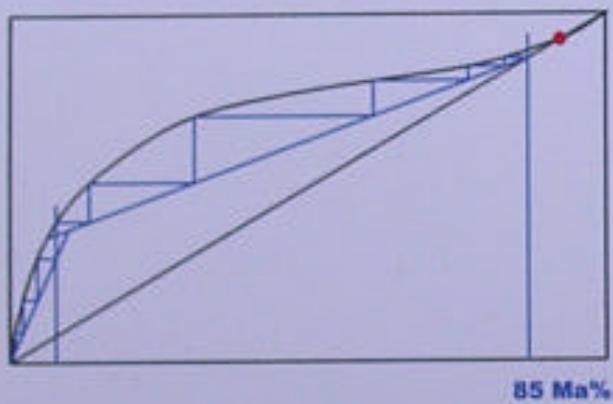
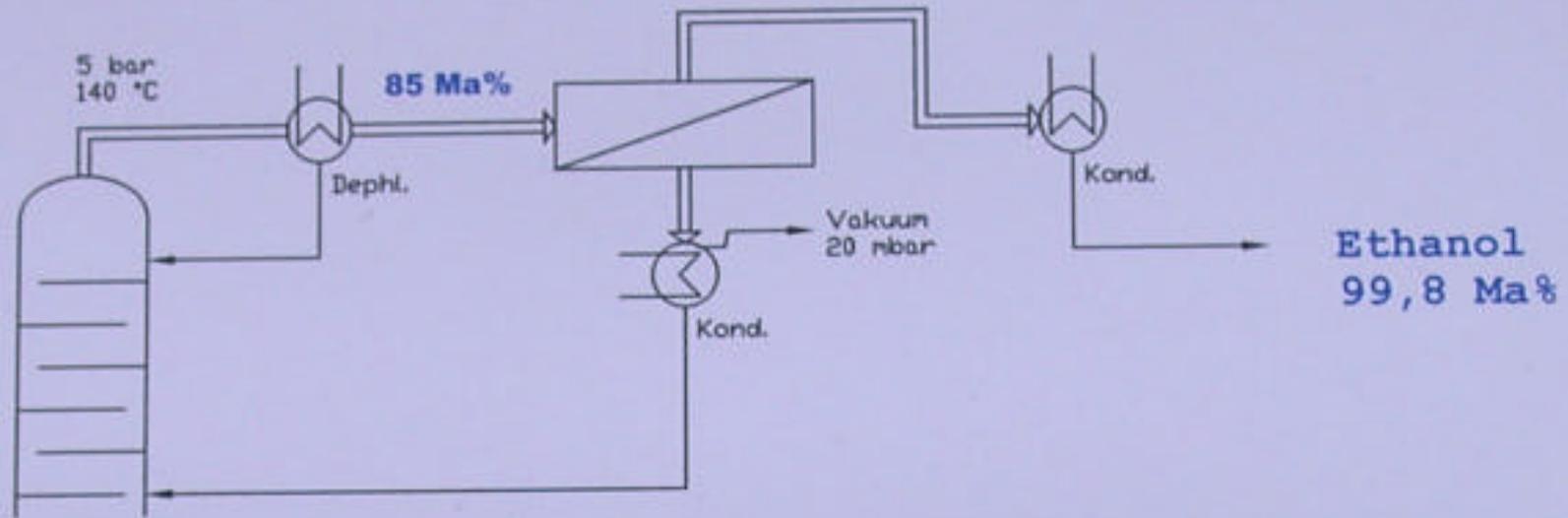
Textzitat: Es ist also in bezug auf den Wärmeverbrauch billiger, zuerst mindergradigen Spirit herzustellen und aus diesem den hochgradigen Spirit, als direkt aus der Maische sogleich hochgradigen Alkohol zu gewinnen.

Hausbrand war einer der ersten wissenschaftlich arbeitenden Ingenieure auf dem Gebiet des Chemischen Apparatewesens. Seine Losung: „Das Studieren und Sammeln von Erfahrungen ist die Quelle zur Erkenntnis.“

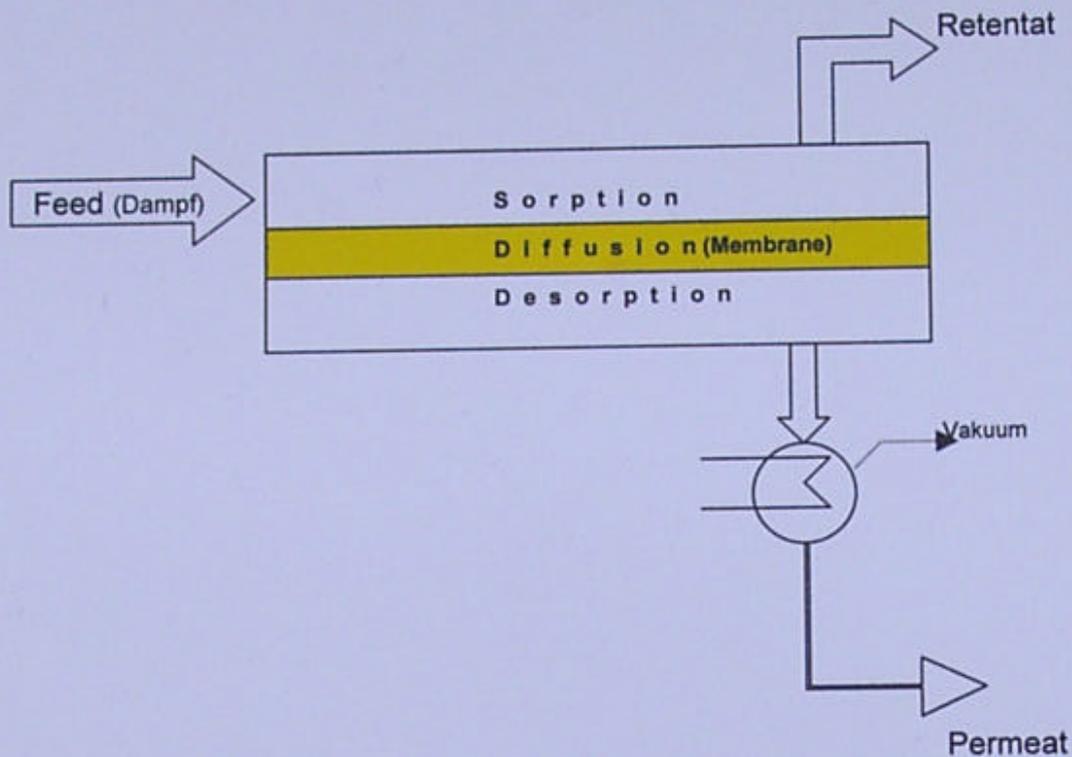


## Rektifikation

## Dampfpermeation



## Dampfpermeation, kinetischer Prozess



## Das chemische Potential

$$\Delta\mu_i = RT_F \times \ln (y_{iF} \times p_F / y_{iP} \times p_P) = f (p_{iF} / p_{iP})$$

ist die Triebkraft für den Stoffaustausch.

$p_F$	Feedraumdruck	$p_{iF}$	Partialdruck Komp. i, Feedraum
$p_P$	Permeatraumdruck	$p_{iP}$	Partialdruck Komp. i, Permeatraum
$y_{iF}$	Konzentr. i im Feedraum	$y_{iP}$	Konzentr. i im Permeatraum

## Dampfpermeation zur Ethanolentwässerung

Zur Entwässerung von Ethanol wird häufig noch die Extraktiv- oder Azeotrop-Destillation sowie die Molsieb-Adsorption angewendet, weil der Pervaporationsprozeß (PV) als zu aufwendig erscheint. Im Gesamtprozeß jedoch zeigte Tusel schon 1980 deutliche Energieeinsparungen für die Herstellung von Biosprit mittels PV. Bei der Ethanolgewinnung aus Zuckerrohr (Ethanolprogramm Brasilien) sind demnach gegenüber der Azeotropdestillation (Entrainer Benzol) bis 40% Energieeinsparungen durch PV-Technologie möglich.

Die Dampfpermeation (DP) besitzt weitere Vorteile:

- Produktzirkulation auf der Feedseite nicht erforderlich, da Molekülbeweglichkeit in der Dampfphase.
- Zwischenerhitzer nicht erforderlich, da kein Phasenwechsel.

Das chemische Potential als treibende Kraft realisiert in beiden Verfahren auf der Feedseite maximal den Sättigungsdruck der permeierenden Komponente, die Dampfphase kann deshalb insbesondere bei geringen Feedkonzentrationen eine höhere Sorptions-Flußrate realisieren.

Schließlich wurden Zeolithmembranen entwickelt, die gegenüber den organischen Membranen bis 300 °C temperaturstabil, bis 30 bar druckstabil sind und ohne Membranquellung arbeiten. Hömmerich, RWTH Aachen, untersuchte diese Membranen und konnte deutlich höhere Permeatflüsse gegenüber Polymermembranen feststellen. Der höhere Permeatfluß macht die Zeolithmembran wirtschaftlich.

Die Installation der DP-Module erfolgt in Rohrbündel-Batterien, Feed in Serie, Permeat parallel geschaltet, und zum Vakuumkondensator, 20 mbar, führend.

Die Material- und Energieeinsparung gegenüber z.B. der Azeotrop-Destillation sind beträchtlich: 30% der Anlagenkosten, 42% der Heizdampfmenge und 20% der Elektroenergie.

Dennoch sind Membranherstellungskosten und Standzeiten noch ein deutlicher Kostenfaktor. Es ist aber absehbar, daß auch die sehr teuren Zeolithmembranen (2,5 T€/m<sup>2</sup>) preisgünstiger werden. Im Vergleich der Technologien erreicht die Dampfpermeation schon heute einen eindeutigen Kostenvorteil.

# Destillationstechnik

## Vorlesung

### VORWORT

1. Lehrbrief  
1956

Die nachstehenden Ausführungen behandeln den Stoff, den Herr Prof. Dipl.-Ing. J. Boesler in seiner Vorlesung über Destillationstechnik an der Technischen Hochschule Dresden bietet. Dabei wurde der wachsenden Bedeutung der destillativen Trennung von Mehrstoffgemischen, die in der Literatur noch verhältnismäßig wenig behandelt wurde, besonders Rechnung getragen. Die Destillation von Zweistoffgemischen wird hier nur der Vollständigkeit halber und daher etwas kurz behandelt, da darüber schon genügend gute deutsche Arbeiten existieren, von denen hier nur diejenigen von Herrn Prof. Dr.-Ing. Emil Kirschbaum, Technische Hochschule Karlsruhe, erwähnt werden sollen. Die folgenden Ausführungen erheben keinen Anspruch auf eine erschöpfende Behandlung der Destillation von Mehrstoffgemischen, sie sollen vielmehr dem Studierenden die Probleme der Destilla-



**Prof. Dipl.-Ing. J. Boesler 1960**



**Prof. Dipl.-Ing. J. Boesler 1960**

... "Um das Verständnis für die bei der Destillationstechnik auftretenden und dem Anfänger oft begrifflich schwer zu fassenden Probleme zu erleichtern, wird von einer abstrakten, rein mathematischen Darstellungsweise, die überdies bei der Berechnung von Destillationskolonnen oft auch verwirrend wäre, abgesehen und auf vorstellungsmäßiges Ansetzen der erforderlichen Gleichungen großer Wert gelegt"....

## Entwurf der Bioethanolanlage

**Der Markt:** Alkohol wird zu einem bedeutenden Marktfaktor. In den USA sind in den letzten Jahren zahlreiche Großanlagen auf der Basis stärkehaltiger Rohstoffe errichtet worden. Das NREL (National Renewable Energy Laboratory) berichtet z.B., daß aus Lignocelluloseabfällen und Energiepflanzen in USA die Produktion von 50.000 m<sup>3</sup> Biosprit pro Tag möglich ist. Damit kann die CO<sub>2</sub>-Erzeugung durch Kraftfahrzeuge um bis zu 90% gesenkt werden und notwendige Importsteigerungen für Erdöl können unterbleiben. Auch die Europäische Union plant die verstärkte Erzeugung von Bioethanol. Bei einem Biokraftstoffanteil von 1% am Gesamtverbrauch an fossilen Kraftstoffen in der EU können bis zu 75.000 neue Arbeitsplätze entstehen, der Großteil davon in ländlichen Gebieten.

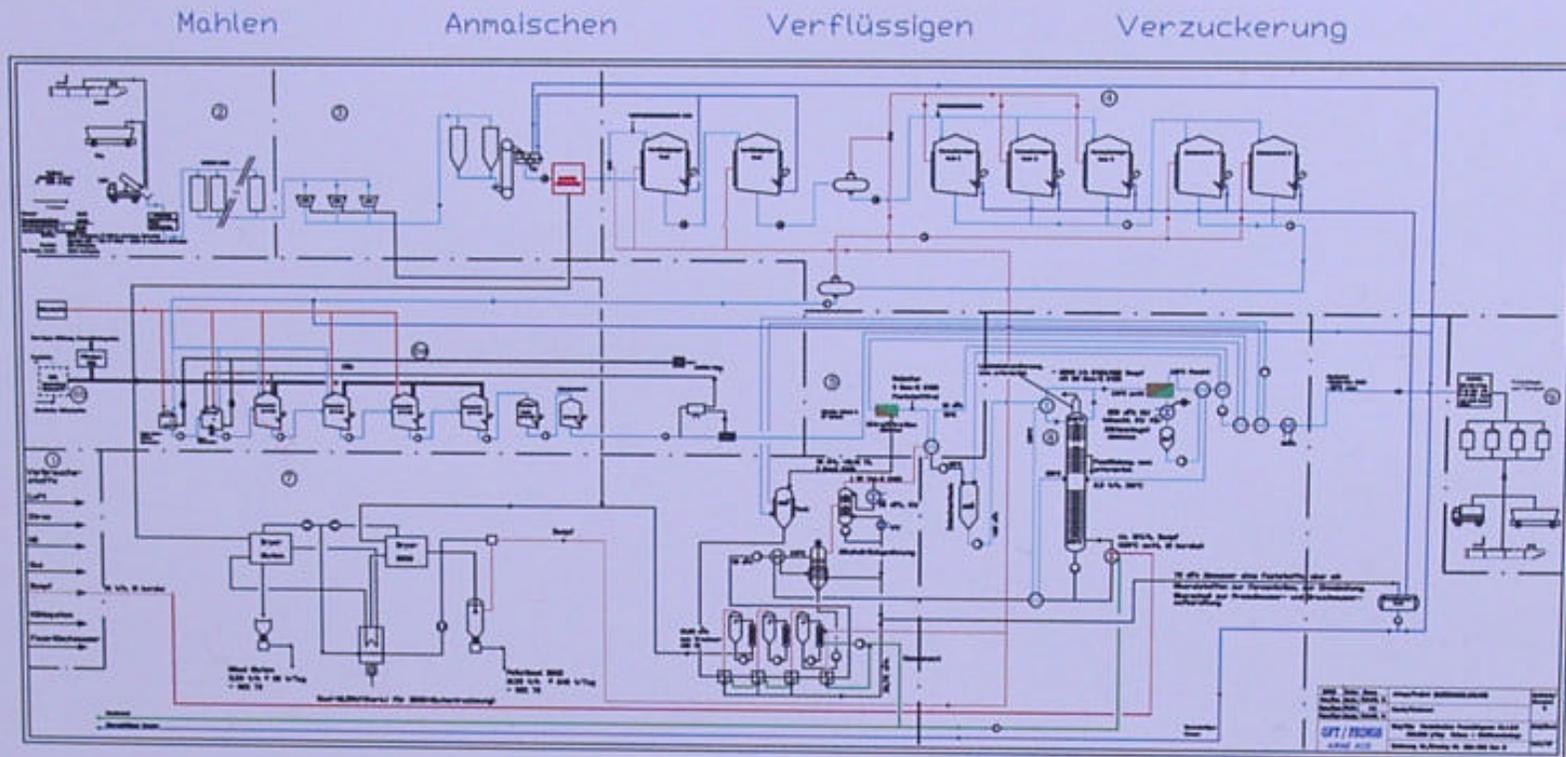
**Entwurfsarbeit mit Excel-Dateien:** Die sehr komplexe Anlage wird mit Hilfe von Material- und Energiebilanzen bis zu ihren Grundverfahren (Unit Operations) in einzelne Excel-Elemente herabgegliedert. Die Excel-Elemente eignen sich für einfache Bilanzformeln und können in übersichtlicher Form auch zu treffende Annahmen beinhalten. Ihre Parameter sind in Prozeßstufen, diese in Teilanlagen und schließlich in der Gesamtanlage verknüpft. Mit ihnen lassen sich die Hauptabmessungen der Apparate überschläglich ermitteln. Sowohl veränderte Produktmengen und Stoffkomponenten, als auch unterschiedliche Apparate und Schaltungen können berücksichtigt werden.

Der Nutzen der Excel-Schemata im Prozess-Engineering:

- Wesentliche Einflußfaktoren zur zweckmäßigen Gestaltung der Anlage können durch einfache Varianten ermittelt werden.
- Die Wärmeintegration für die komplexe Gesamtanlage kann mit der Excel-Datei entworfen werden.
- Die Hauptabmessungen der Apparate werden bereits mit der Excel-Datei überschläglich erfaßt.
- Der Aufwand an Entwurfsarbeit kann den Anforderungen der Planungsphase angepaßt und damit kostenoptimiert werden.
- Die Parametererfassung des Verfahrens in der Excel-Datei konkretisiert die Aufgabenstellung für die gezielte Simulation der Gesamtanlage.
- Die Material- und Energiebilanz liefert Kenndaten für die Zielstellung der Anlagenplanung.

# Bioethanol aus Roggen

Roggen: 1.500 t/d



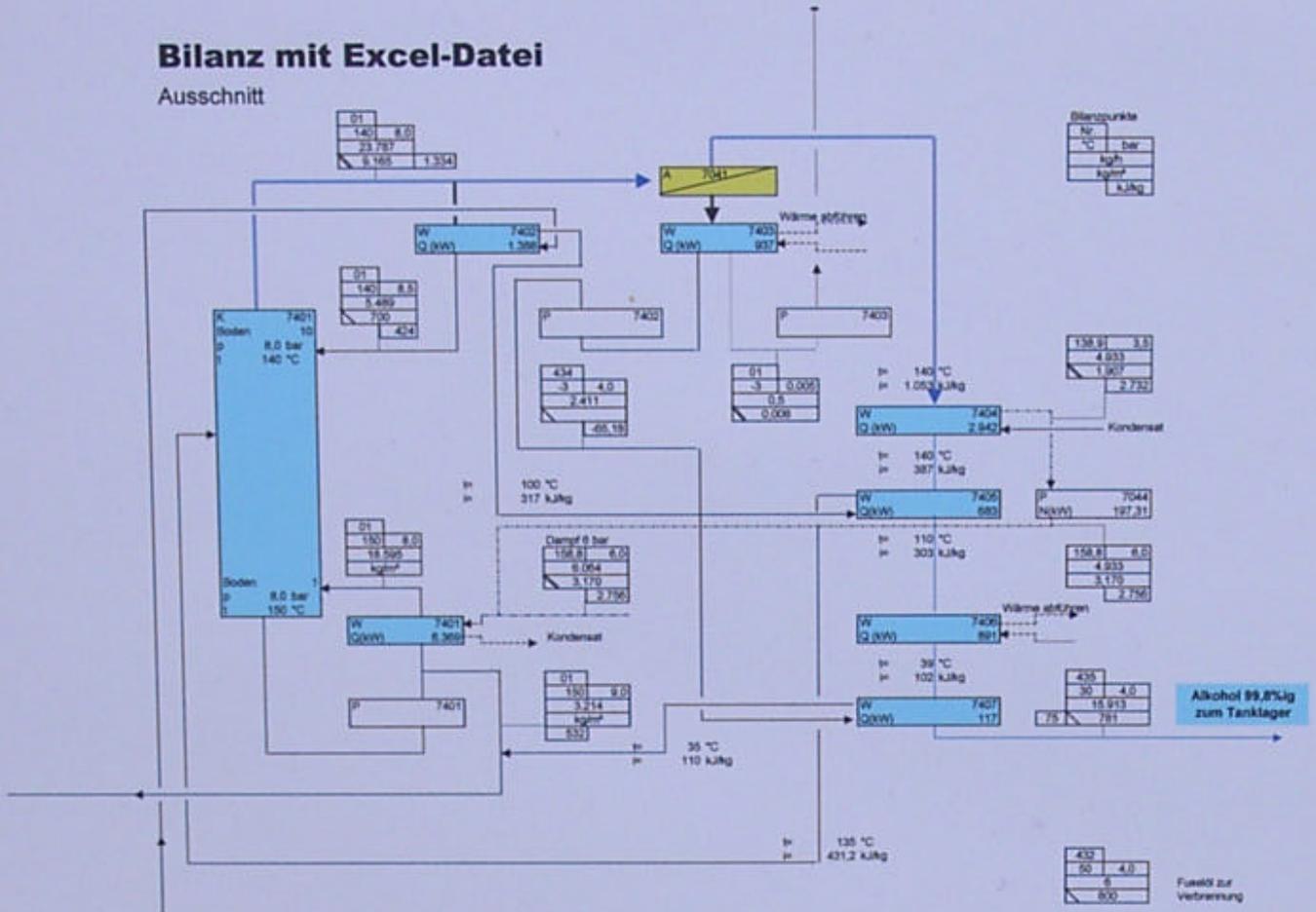
Fermentation		Hefeabtrennung		Destillation	
gerein. Prozesswasser	Gluten	Futterprod. DGGG	CO <sub>2</sub>	Ethanol	
100 t/d	130 t/d	400 t/d	490 t/d	99,8 %lg	
				480 m <sup>3</sup> /d	

Technologie: AgroChemische Systeme

Fa. ACS, Homburg,  
ARGE der Firmen GFT, Homburg, und Frings, Graz

# Bilanz mit Excel-Datei

Ausschnitt



## Fortschritt:

Einsparung an Zeit:

Dampferpermeation,  
Große Kapazitäten

480 m<sup>3</sup>/d,

960 m<sup>3</sup>/d,

1200 m<sup>3</sup>/d.

## Dimensionierung mit Excel-Datei

Durchmesser der Kolonnen

Kolonnen	Ber. Durchmesser			F-Faktor =	1,5	$(m/s) \cdot (kg/m^3)^{-0,5}$	
	$m_{Da}$	$\rho_{Da}$	$V_{Da}$			D	$A_{Kol}$
	kg/s	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /s	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	
<b>KO1</b>							
OSO	3,581	0,312	11,460	4,172	13,667	0,600	
USU	2,299	0,215	10,692	4,424	15,373	2,829	
<b>KO2</b>							
OSO	4,747	1,629	2,914	1,392	1,522	8,043	
USU	3,043	0,809	3,762	1,884	2,788	19,736	
<b>KO3</b>							
OSO	5,534	4,710	1,175	0,678	0,361	44,574	
USU	3,410	2,417	1,411	0,878	0,605	101,692	
<b>KO4</b>							
OSO	6,608	9,165	0,721	0,450	0,159	49	
OSO	6,608	3,2	2,065	0,990	0,770	10	

$D_{gew\ddot{u}nsht}$	$V_{Fl\ddot{u}ss}$	F-Faktor <sub>Fluss</sub>
m	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	
3,500	0,853	2,1
3,500	4,520	2,4
1,600	6,089	1,1
1,600	27,367	2,1
1,600	8,001	0,3
1,600	30,595	0,5

Kriterium:  
Geringer Druckverlust

1,000	9,982	0,3
1,000	9,982	1,5

**Arbeitskraft:** Biomasse-Konversion zu 99,8 %-igem Ethanol,  
Gluten und Futtermittel.

**Betriebsmittel:** Verbrauch an Heißdampf 0,9 kg/kg Ethanol,  
kein Wasserverbrauch,  
Ethanolkosten 48 €Cent/ Liter.