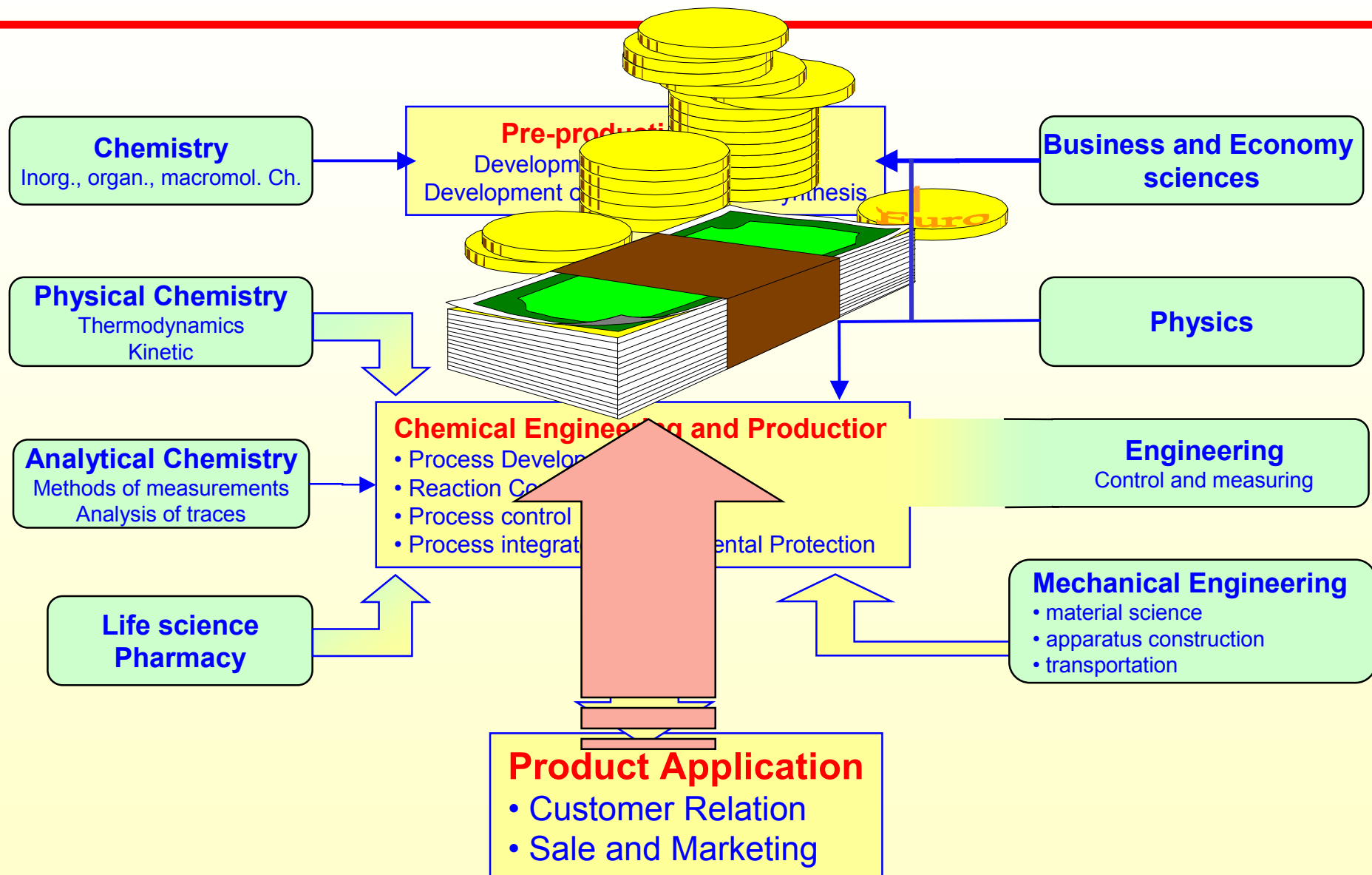


Process Design in Context of Natural Science and Engineering



Literatur

Industrielle Organische Chemie

Weissermel K., Arpe H.-J.
Industrielle organische Chemie (4. Auflage)
VCH Verlag, Weinheim 1994

Onken U., Behr A.,
Chemische Prozeßkunde
Thieme-Verlag, Stuttgart 1995

Fedtke M., Pritzkow W., Zimmermann G.,
Technische organische Chemie
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1992

Franck H.-G., Stadelhofer J.-W.,
Industrielle Aromatenchemie
Rohstoffe - Verfahren - Produkte
Springer-Verlag, Berlin 1987

Keim W., Behr A., Schmitt G.,
Grundlagen der industriellen Chemie
Salle und Sauerländer, Frankfurt 1986

Industrielle Anorganische Chemie

Büchner W., Schliebs R., Winter G., Büchel K. H.,
Industrielle anorganische Chemie
VCH Verlag, Weinheim 1986

Emons H.-H., Hellmold P., Holldorf H., Kümmel R., Martens H.,
Technische anorganische Chemie
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1990

allgemein

Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry
5. Auflage (englisch) VCH-Verlag ab 1985
4. Auflage (deutsch)

Kirk R. E., Othmer D. F.,
Encyclopedia of Chemical Technology
John Wiley and Sons, 3rd edition, New York 1978 - 1984

Einführung in die chemische Produktionstechnik

1. Aspekte der Energie- und Rohstoffversorgung

2. Industrielle organische Chemie

2.1. Ausgangsprodukte

Erdölstämmige Kohlenwasserstoffe

Produkte auf Kohlebasis

Synthesegas

nachwachsende Rohstoffe

2.2. Erzeugung von Primärchemikalien

Olefine

Aromaten

2.3. Organische Zwischenprodukte

3. Industrielle anorganische Chemie

Luftzerlegung

Chlorherstellung

Ammoniaksynthese

Salpetersäure

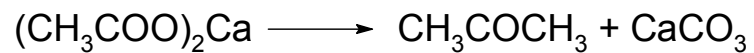
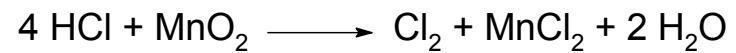
Düngemittel

1. Einführung

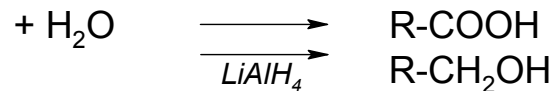
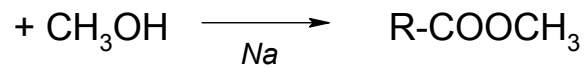
1.1 Besonderheiten chemischer Prozesse

Reaktionswege im Labor und in der Technik

Labor



natürliche Fette



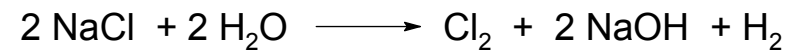
Chlor

Aceton

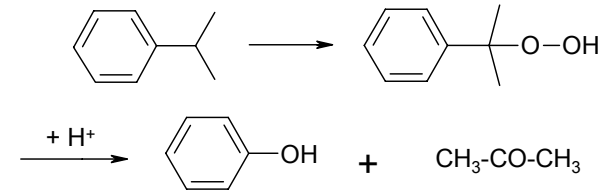
Fettalkohole

Industrie

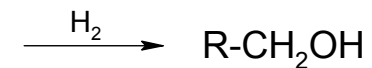
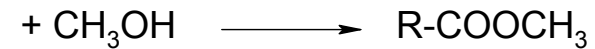
Chloralkalielektrolyse



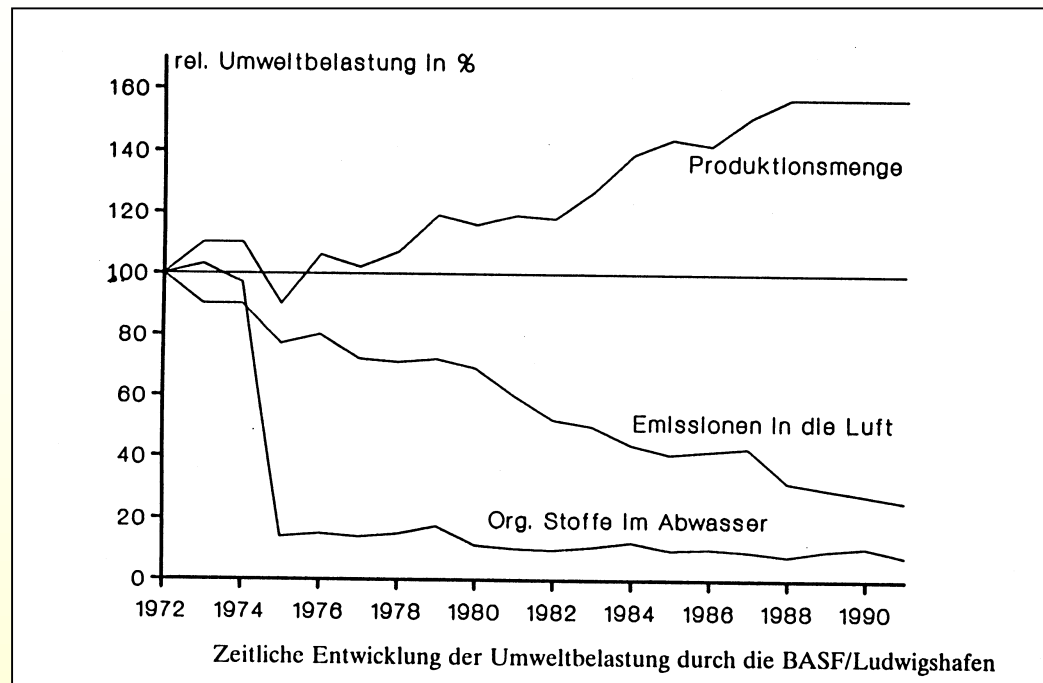
Hock-Verfahren



natürliche Fette



Umweltbelastung durch Emissionen

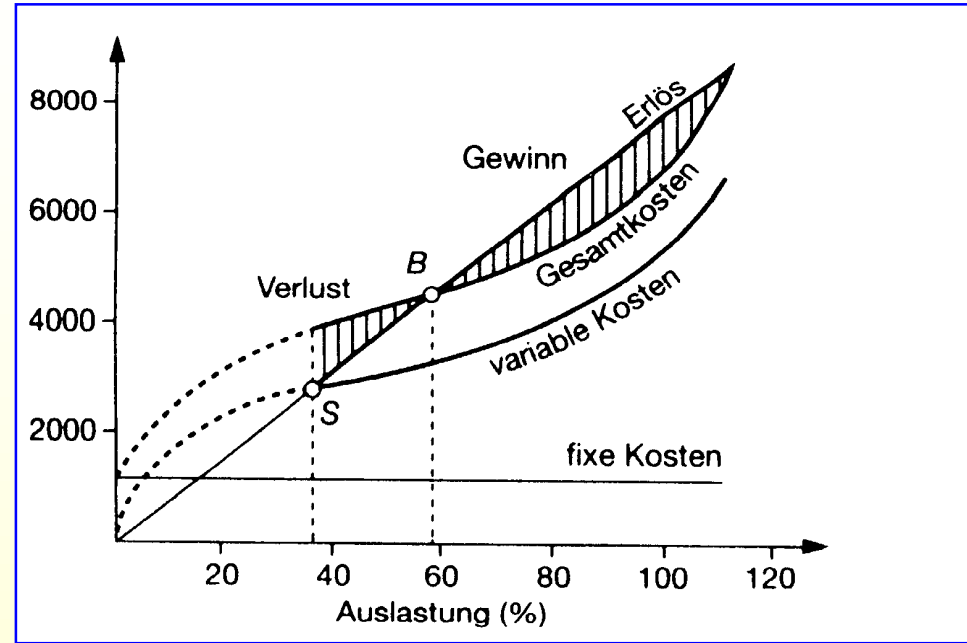
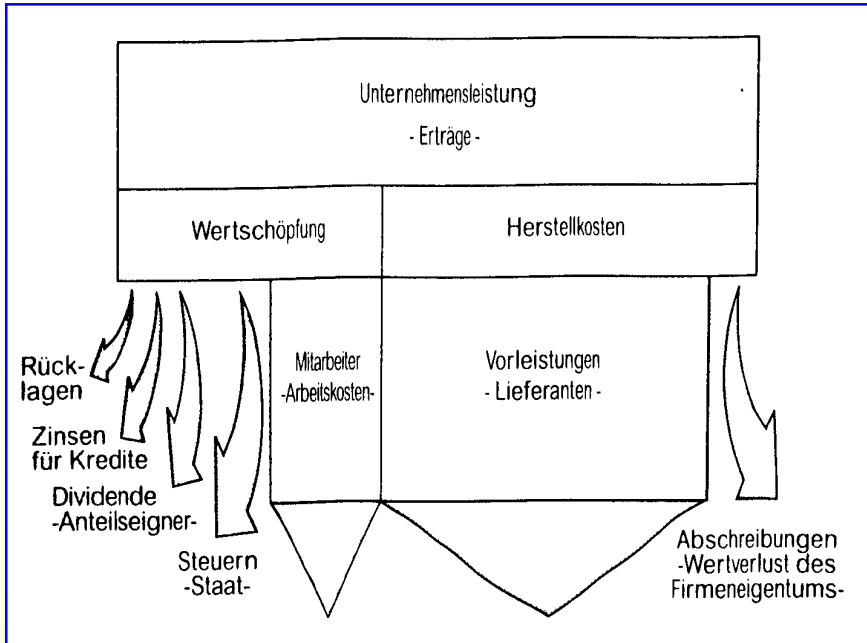


Emissionen von Luftschadstoffen in der Bundesrepublik Deutschland 1992

	SO ₂	NO _x (gerechnet als NO ₂)	CO
Emissionen (Mio. t):			
insgesamt	3,90	2,90	9,14
alte Bundesländer	0,88	2,42	6,58
neue Bundesländer	3,02	0,48	2,56
Verursacher (Anteile in %):			
Industrie insgesamt	13,9	9,5	16,1
(davon chemische Industrie)	(1,0)	(2,1)	(0,8)
Kraft-/Fernheizwerke	74,8	18,1	6,9
Verkehr	2,4	67,3	61,9
Kleinverbraucher	8,9	5,1	15,1

1.2 Wirtschaftliche Grundlagen der chemischen Produktion

Wirtschaftlichkeitsaspekte



Kostenart:

Fixkosten

variable Kosten

Anteile

Anlagenabschreibung

Rohstoff

Abschreibung

15...30 %

Zinsen

Energie

Energie

10...40 %

Steuern

Löhne

Rohstoff

30...90 %

Stammpersonal

Betriebskosten

Gehälter

5...25 %

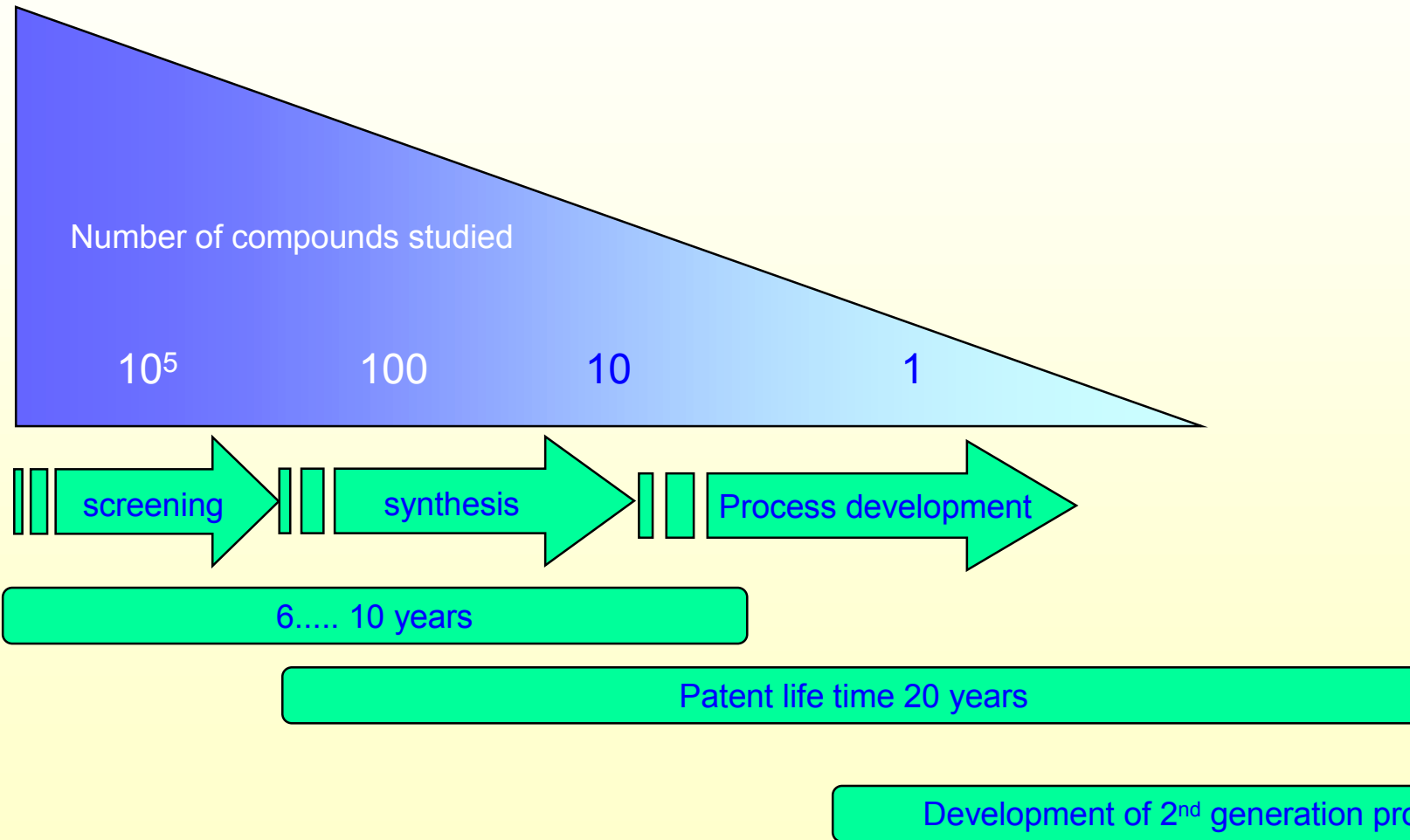
Vertriebskosten

Forschung

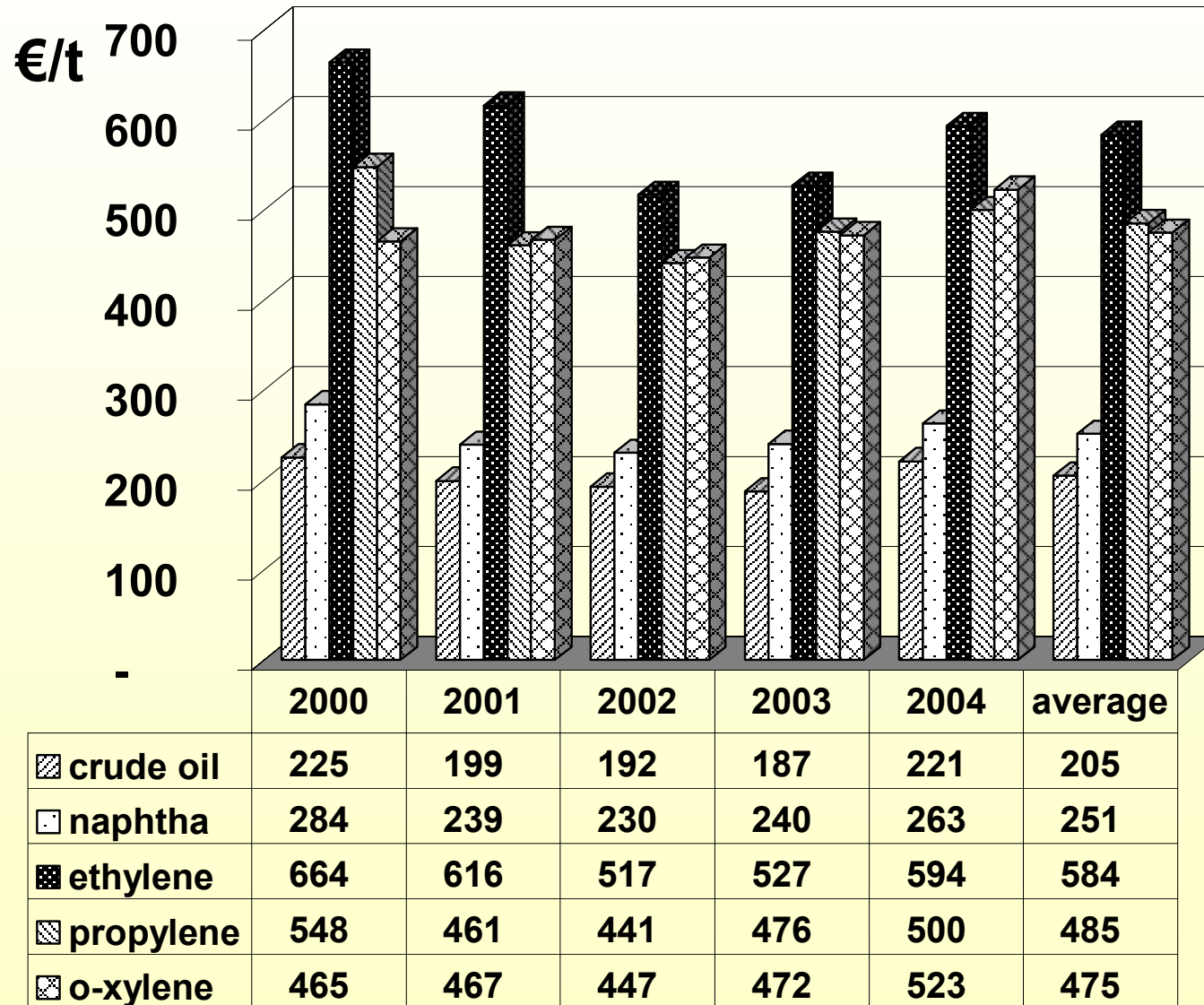
< 10 %

Time is Money

Development of a process for fine chemical production



Selected Chemical Feedstocks



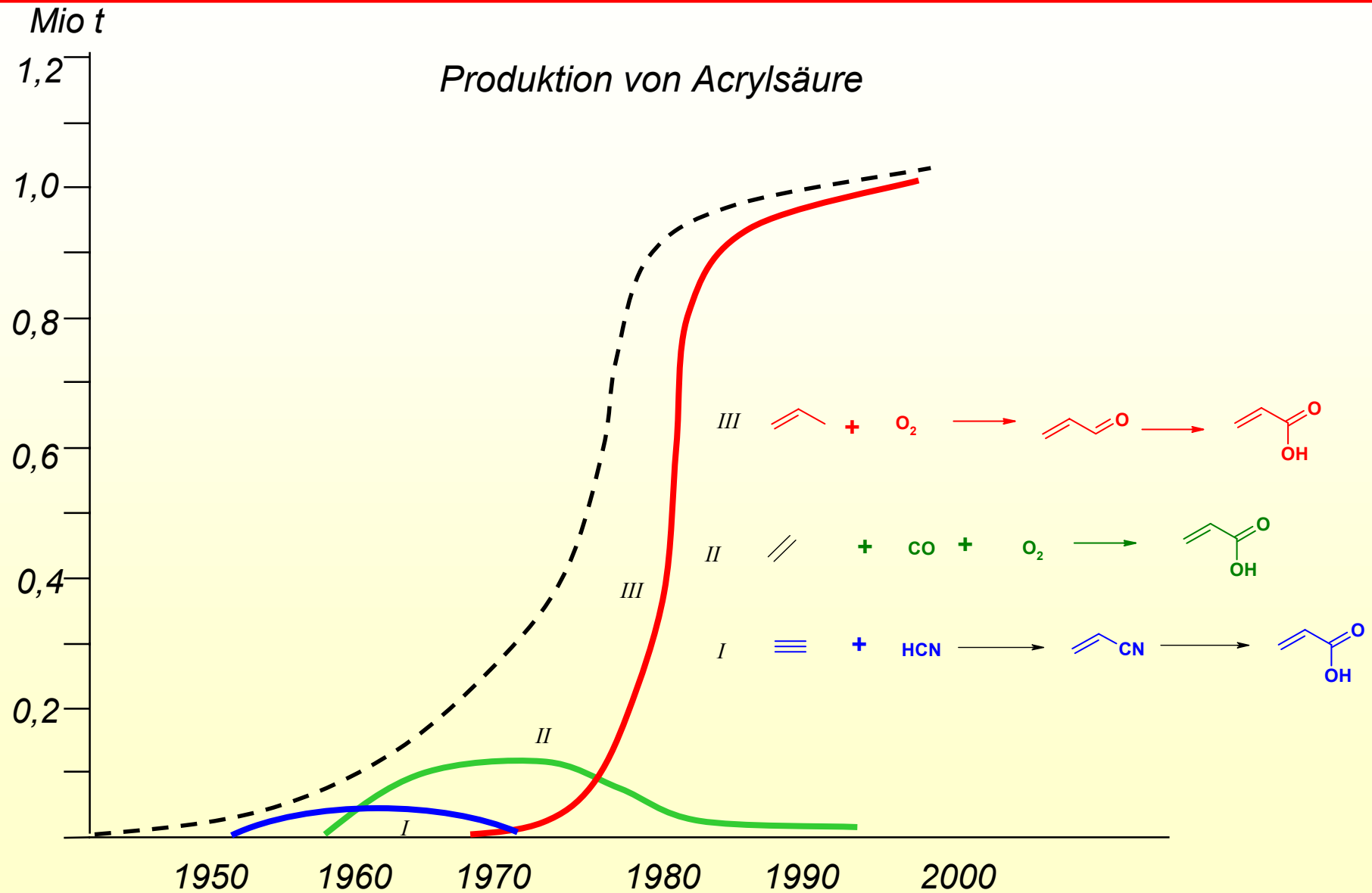
Preise ausgewählter Verbindungen

Rohstoffpreise in Europa

(Spotmarkt, 20.3.1996)

Produkt	US\$ / t
Ethylen	510-520
Propylen (polym.)	520-540
Butadien	280-290
Benzol	250-255
Toluol	235-240
Xylol rein	285-290
p-Xylol	680-700
o-Xylol	350-370
Styrol	655-685
Methanol (Prod. EU)	215-220
MTBE	285-290
Ethylenglycol	590-630
Acetonitril	730-760
Ätznatron	270-300
Natriumcarbonat (krist.)	230-280
LDPE (Film)	750-800
HDPE (Spitzguß)	550-600
PP (Homopol., Spritzguß)	650-700
PS (Transparent)	900-1000
PVC	510-530

Lebenszyklen von Chemischen Verfahren

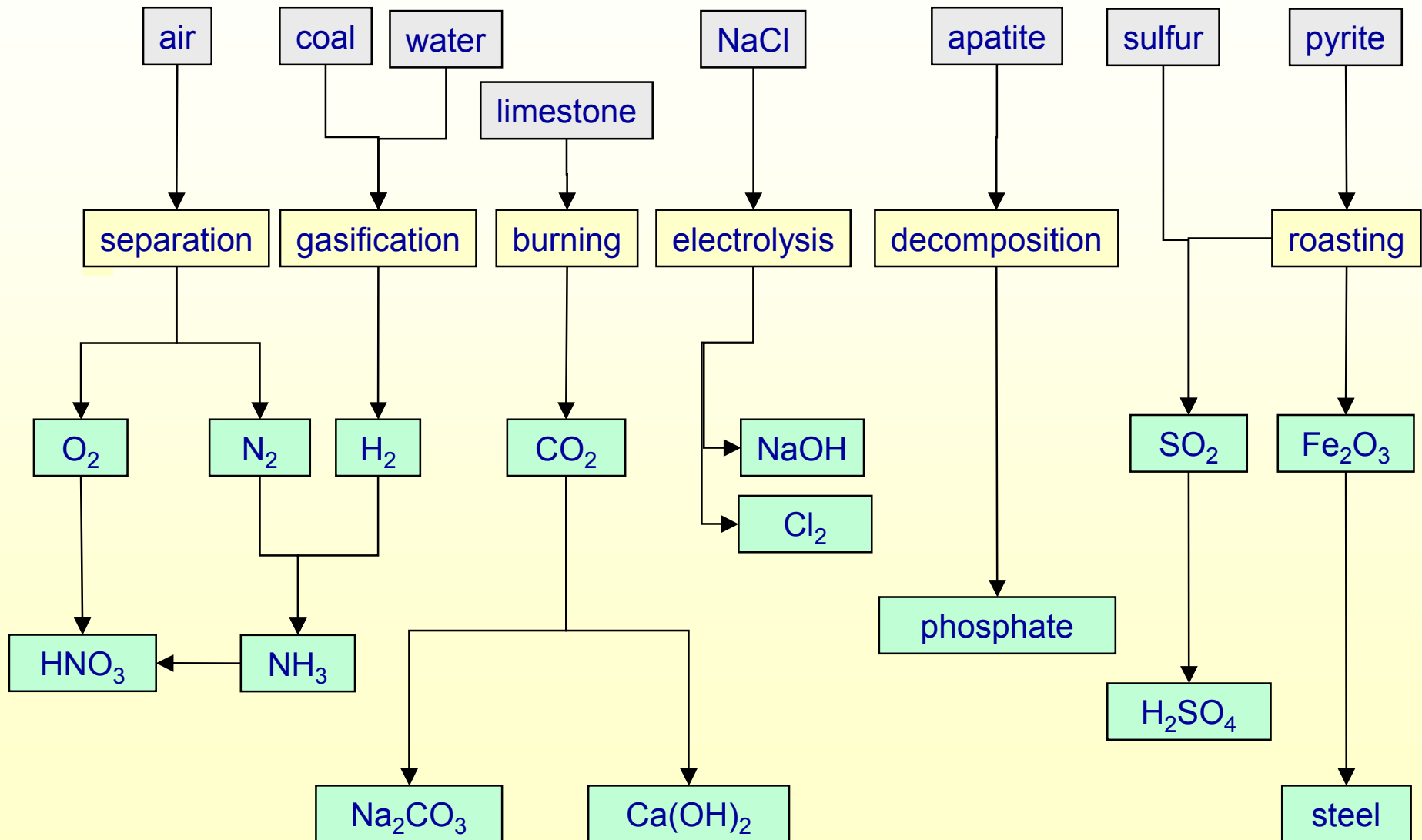


DEGUSSA (Standort Marl)

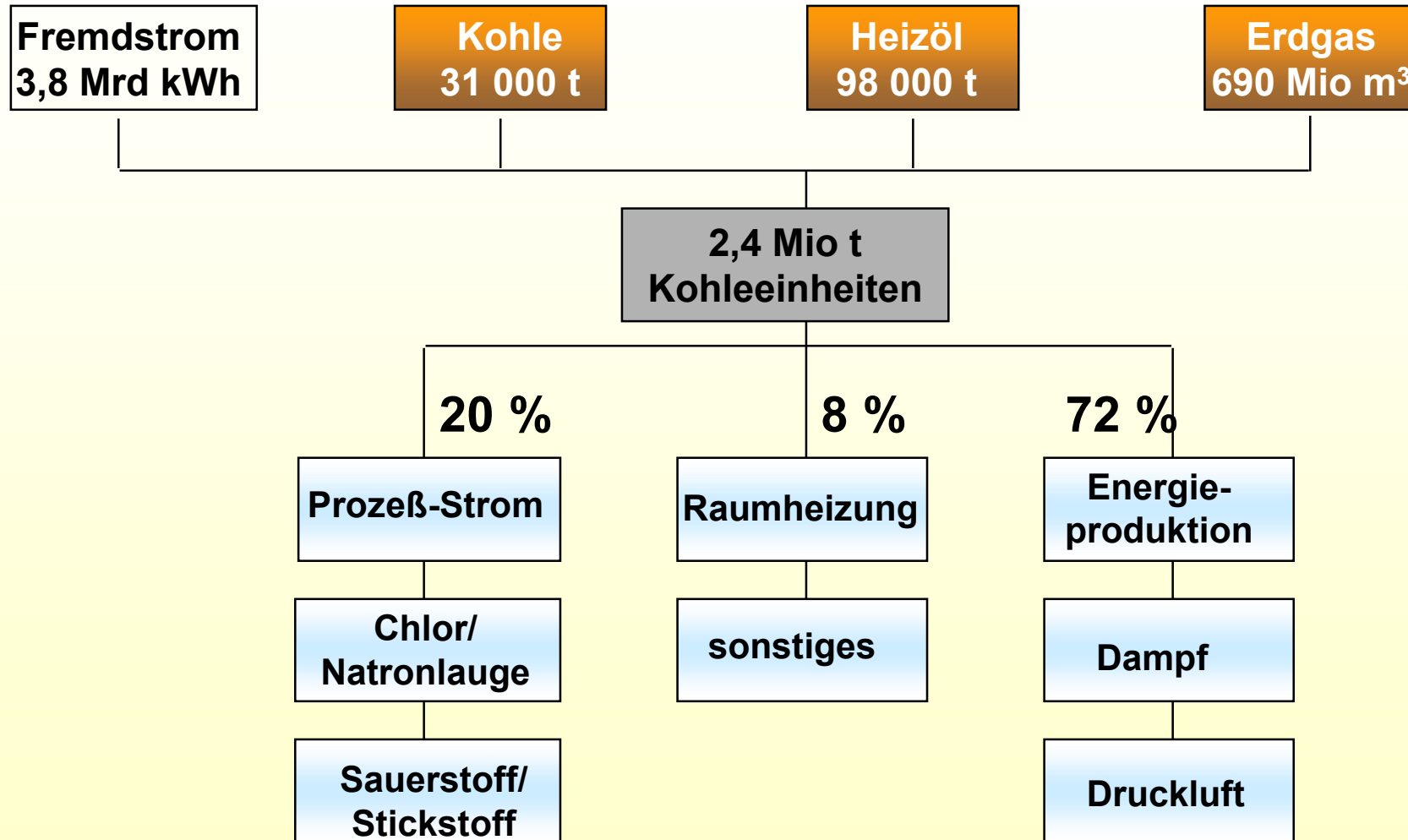


1.3. ASPEKTE DER ENERGIE UND ROHSTOFFVERSORGUNG

Feedstock of Industry Based on Inorganic Technologies



Energieverbrauch der HOECHST AG 1994



Weltenergievorräte (in Mrd t)

	sicher	vermutet	
Erdöl	182	400	
Ölschiefer		2000	Syncrude
Erdgas	146	450	
Kohle	609	7500	<u>Gashydrate</u>
Kernbrennstoff	80	900	

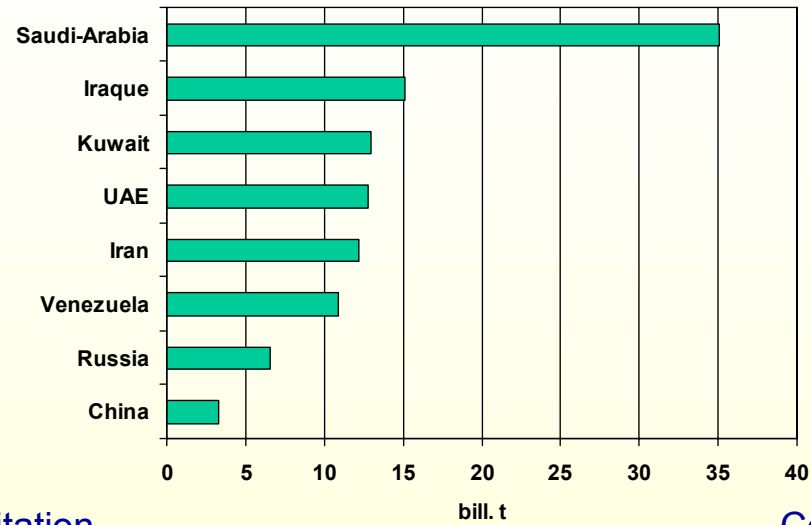
Reichweiten der Weltenergievorräte in Jahren

	sichere Vorräte geteilt durch Verbrauch 1988	vermutete Vorräte geteilt durch Verbrauch 1988	geschätzte Reichweite bei steigendem Verbrauch
Erdöl	40	90	30 - 50
Erdgas	60	190	150
Kohle	170	2000	1000

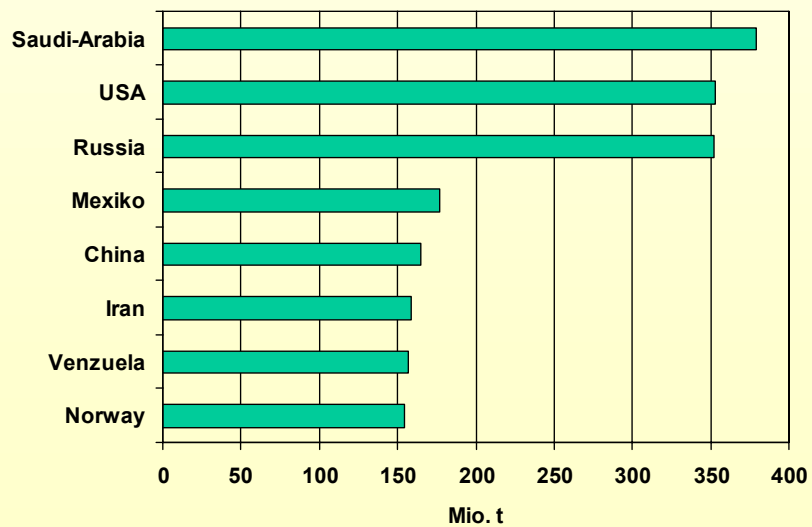
Natural Oil

Resources, Exploitation and consumption

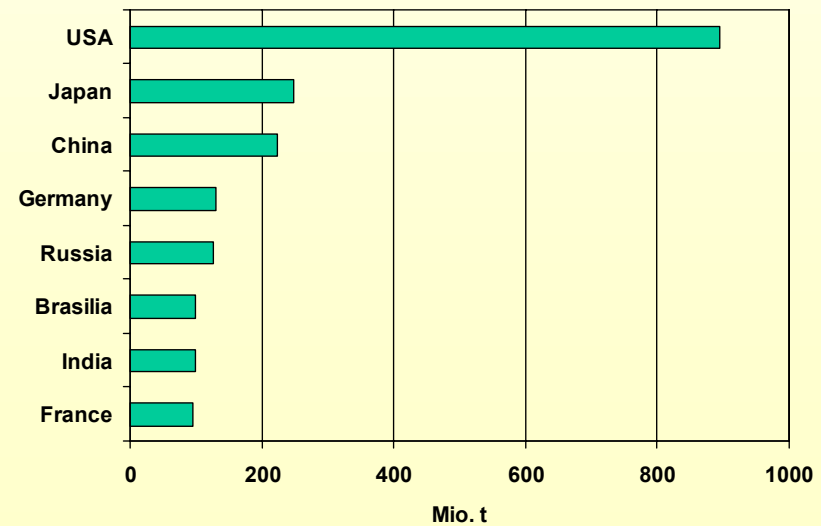
Resources



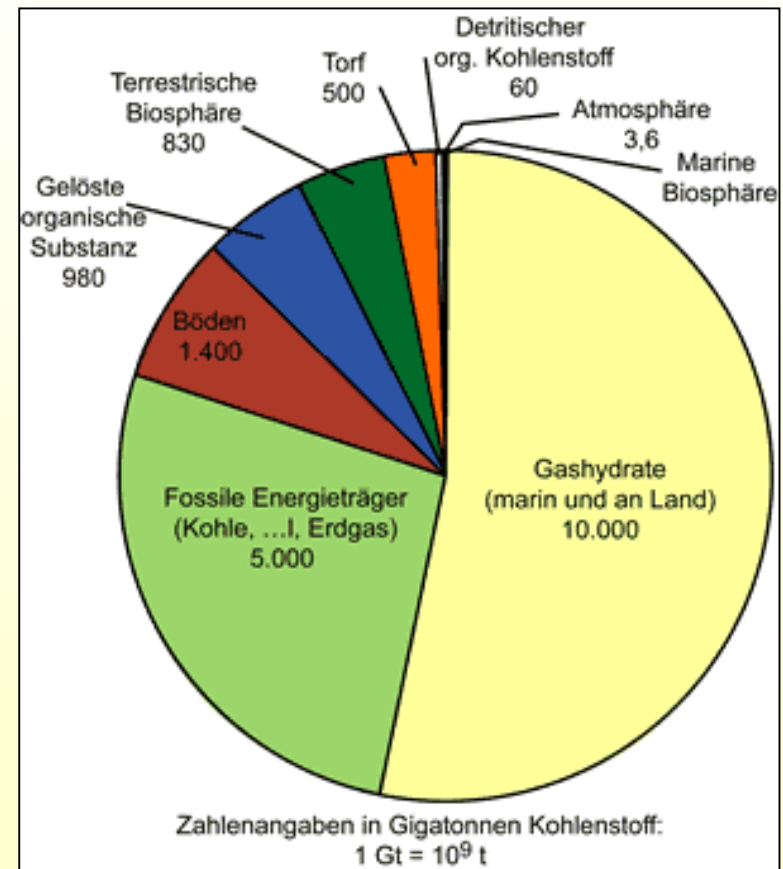
Exploitation



Consumption



Gashydrate

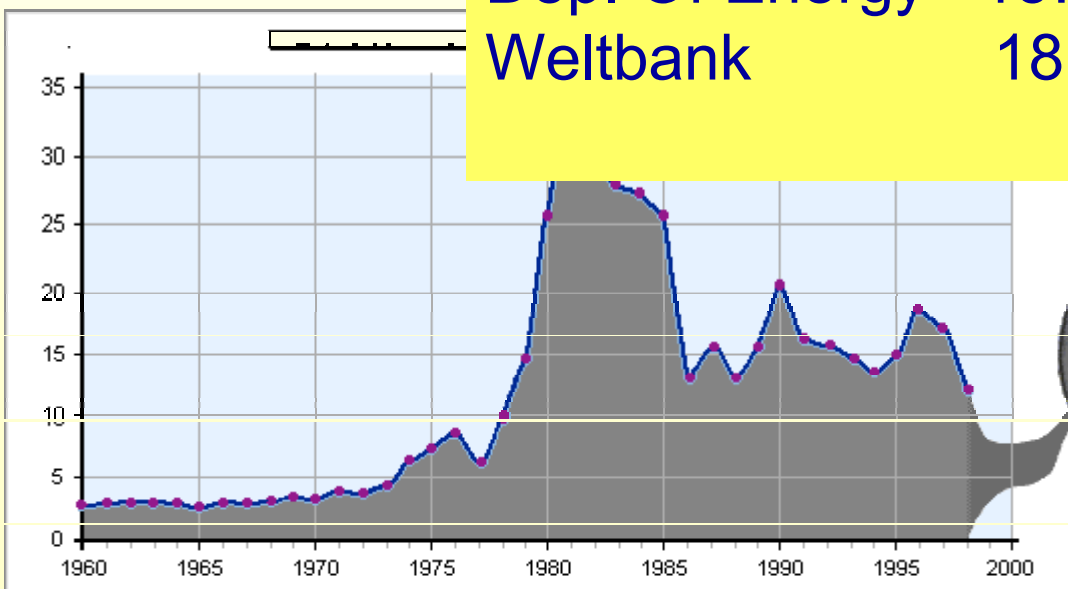


Entwicklung der Rohölpreise

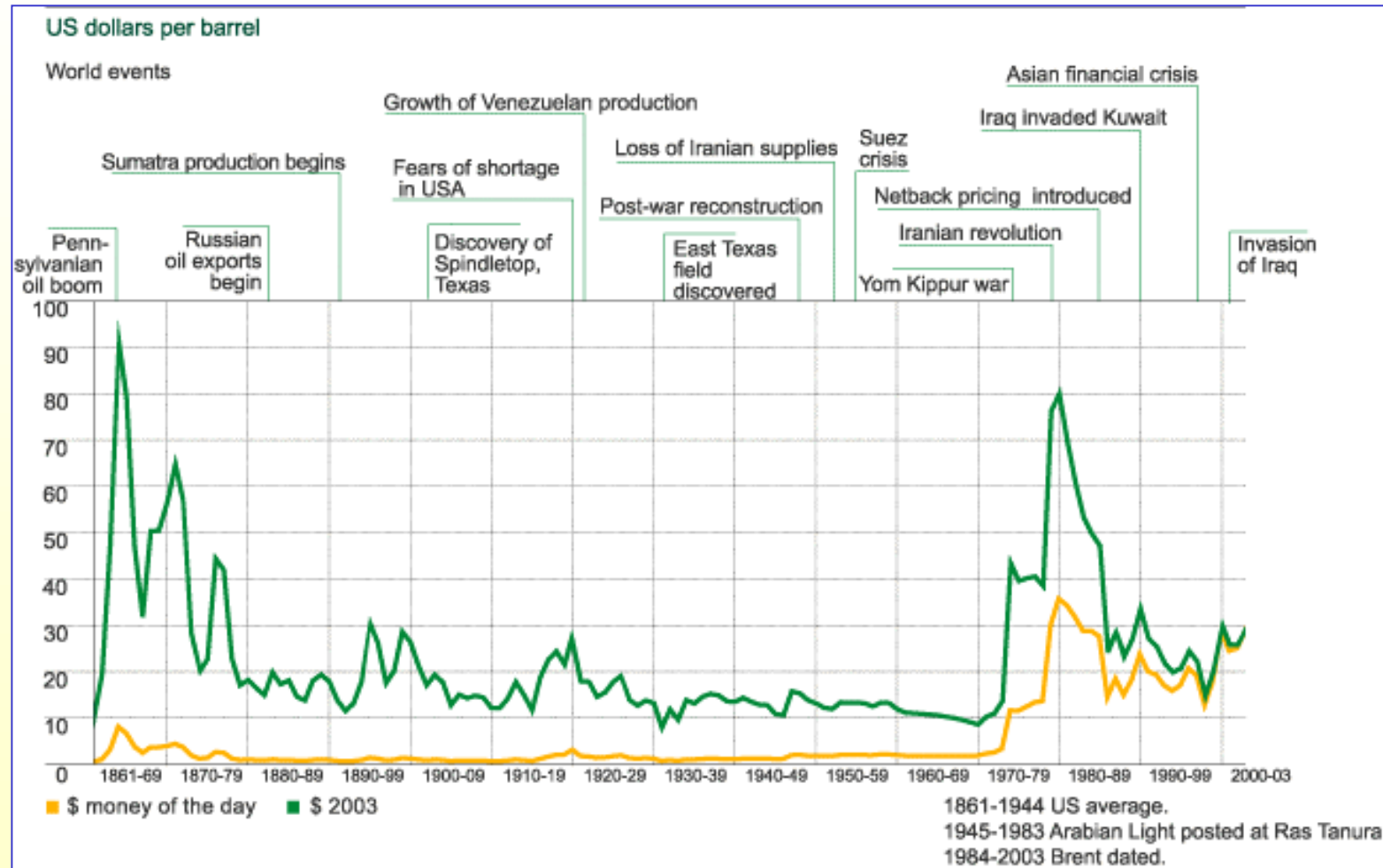
Arabian Light/Dubai

Aktuelle Werte:

Prognosen im Jahr 2000 für 2010:
 Oil&Gas Journal 18...26 \$/bbl
 Dep. Of Energy 15...29 \$/bbl
 Weltbank 18,5 \$/bbl



Oil Price

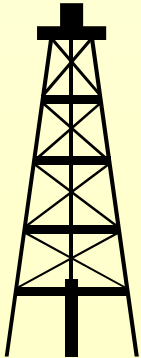
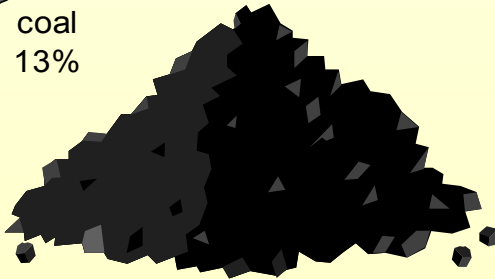
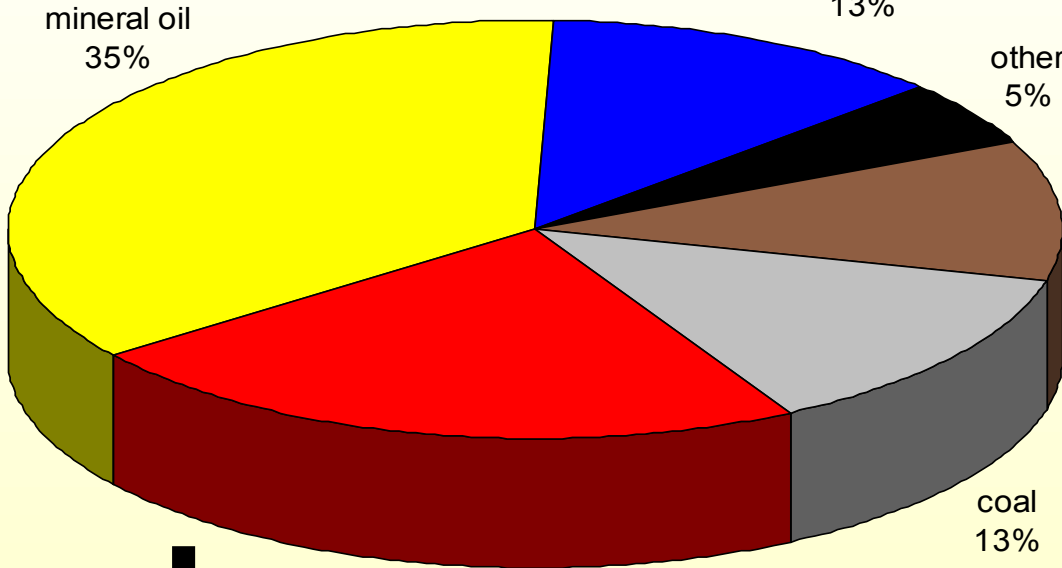
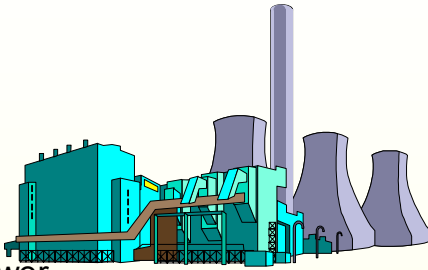
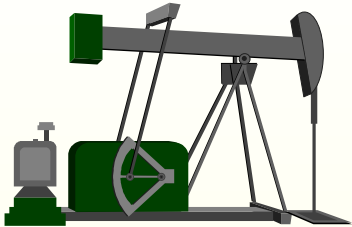


Kraftstoffpreise in Deutschland

Jahr	Normalbenzin Pf/l (ab '88 bleifrei)	Diesel Pf/l	Rohöl- Preise frei dt. Grenze DM/Tonne
1997	161,7	124,6	250
1996	156,6	122	233
1995	150,2	113	186
1994	151,1	114,5	193
1993	134,8	108,6	209
1992	134,3	106,1	226
1991	127,5	107,1	252
1990	113,9	102	279
1989	109,9	95,3	257
1988	82,2	88,6	206
1987	97,4	91,6	251
1986	101,7	99,1	255
1985	135,4	133,2	622
1984	131,8	129,7	622
1983	131,2	127	579
1982	132,3	130,4	616
1981	137,1	127,2	619

Jahr	Normalbenzin Pf/l (ab '88 bleifrei)	Diesel Pf/l	Rohöl- Preise frei dt. Grenze DM/Tonne
1980	113,2	114,2	456
1979	98,7	97,1	278
1978	87,4	86,2	211
1977	84,9	87,9	244
1976	87,4	88,4	244
1975	83,2	86,3	223
1974	83	87	224
1973	69	70	82
1972	61	64	72
1971	59	60	77
1970	56	57	60

Consumption of Primary Energy in Germany in 2006



1996

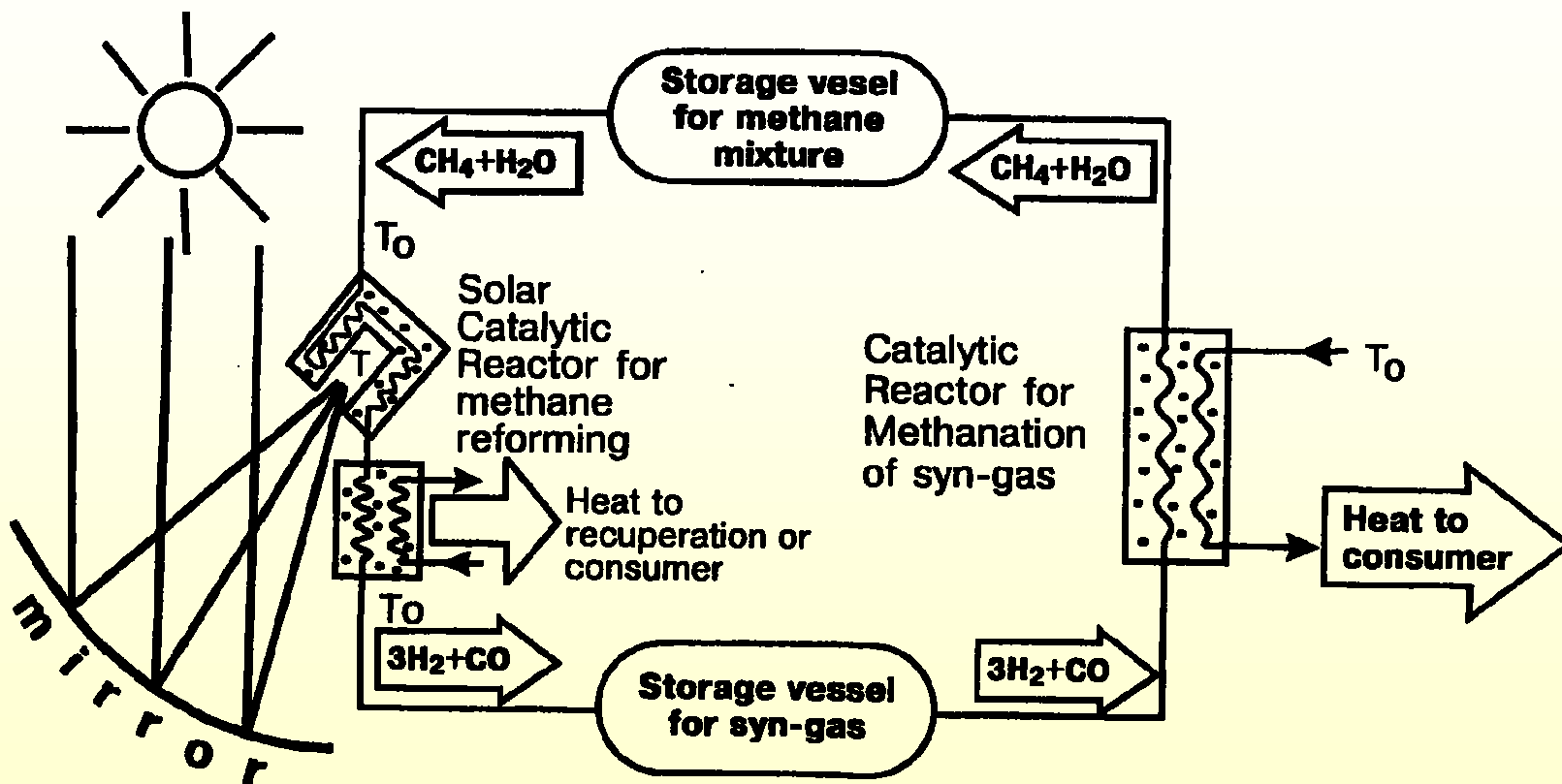
Öl	40%
Braunkohle	12%
Erdgas	22%
Steinkohle	14%
Nuclear power	12%

Trends in Forschung und Entwicklung von Solarzellen

<i>Solarzellentyp</i>	<i>charakteristische Merkmale</i>	<i>Chancen/</i>	<i>Hauptprobleme</i>	<i>Wirkungsgrad</i>	<i>Markteinführung</i>
a-Siliciumzelle	Schicht aus amorphem Silicium auf Träger	hohe Sonneneinstrahlung erforderlich	sinkender Wirkungsgrad durch chem. Abbau	13 % (L) 10 % (S) 6-7 % (1a)	1997
CdTe-Zelle	Schicht aus Cadmiumtellurid	keine Cd-Akzeptanz	Probleme bei ind. Herstellung	15 % (L) 8 % (S)	1998
CIS-Zelle	Schicht aus Kupfer-Indium-Selenid	hohes Zukunftspotential	Qualitätssicherung und Ausbeute	17 % (L)	> 2000
monokristalline Siliciumzelle	aus Einkristall gesägt	Absenkung der Preise um 15 % (Serie)	hoher Basispreis für monokristallines Si	18 % (L) 13 % (S)	eingeführt
GaAs-Zellen	komplizierter Aufbau	nur für Spezialanwendungen bezahlbar		17- 24 % (L)	

Solar Catalytic Technology

K. I. Zamarajev, Topics in Catalysis, 3 (1996)

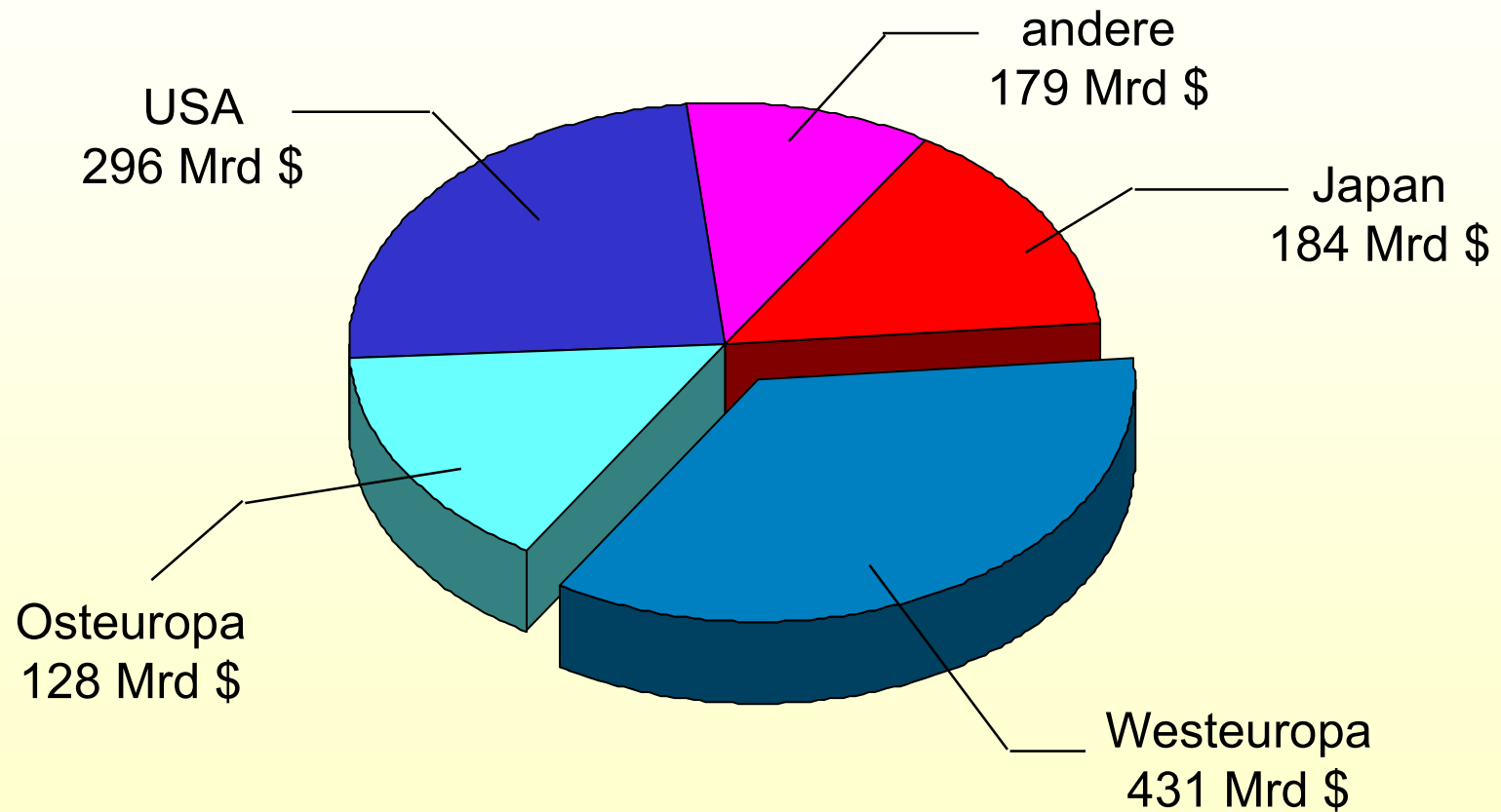


Einzelrohr-
Versuchs-
Anlage

ANLAGE MIT
DREI
ADIABATEN
MMETHANISIERUNGSREAKTOREN

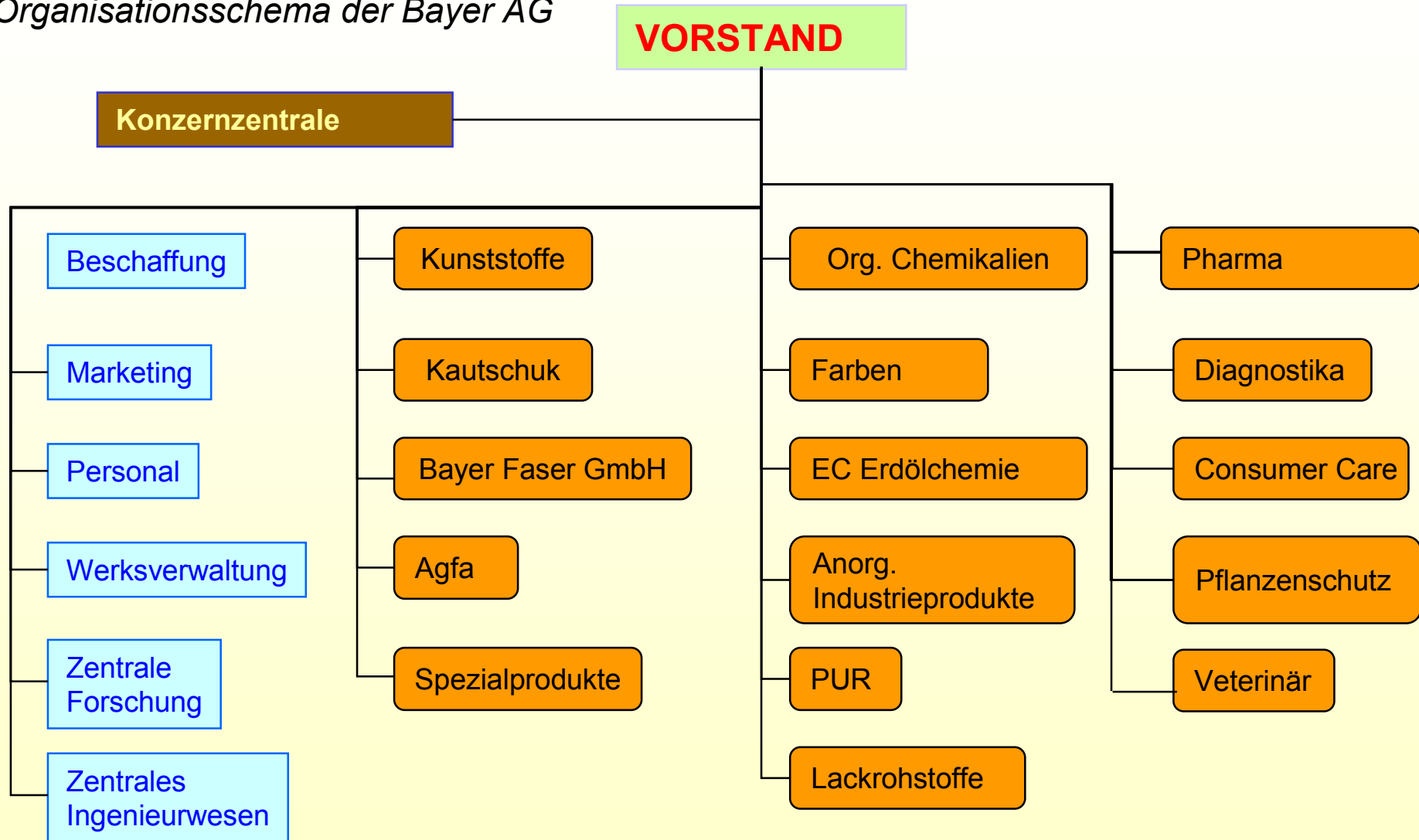
1.4 CHEMISCHE INDUSTRIE

Umsätze der Chemischen Industrie 1992

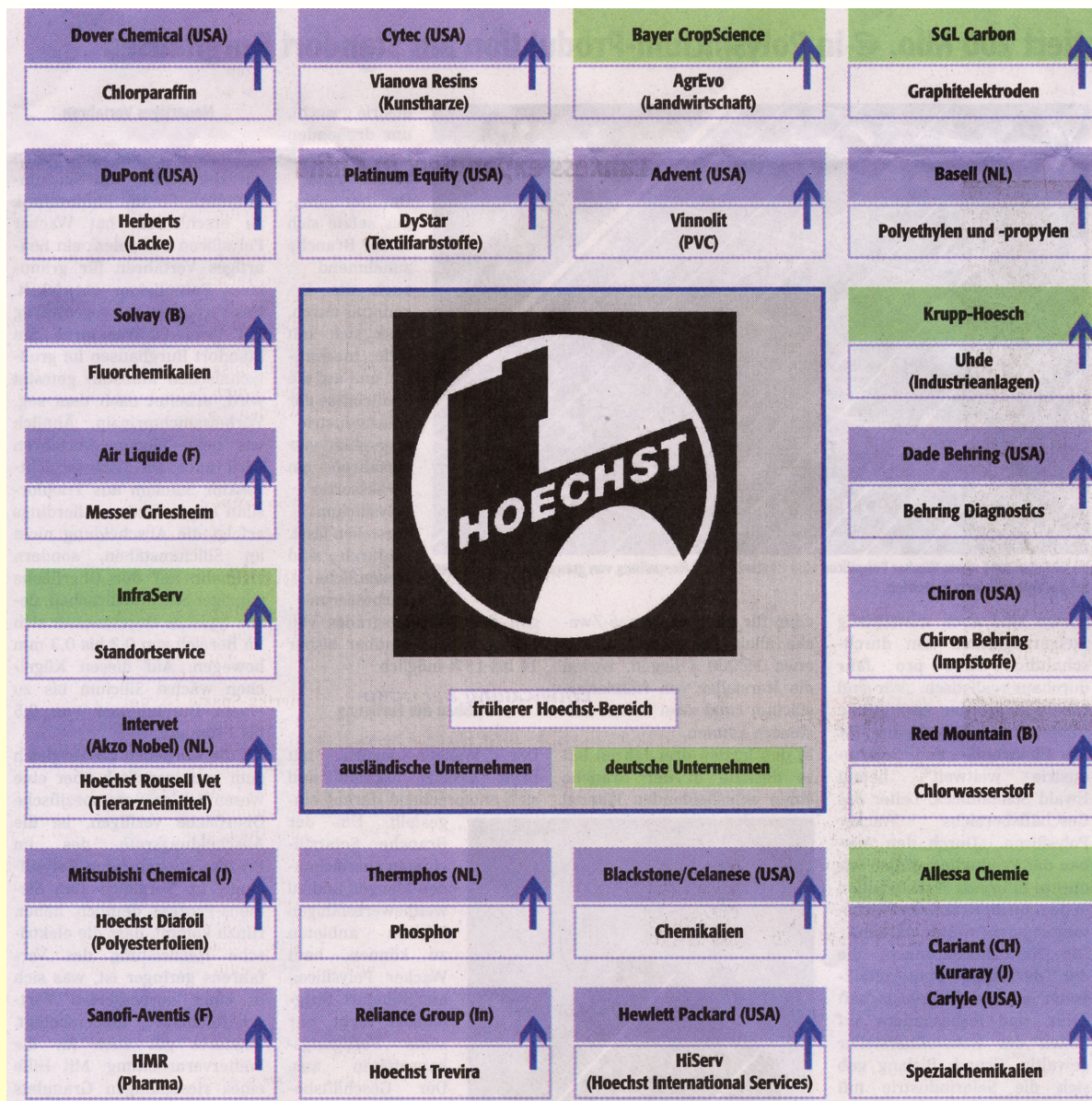


Struktur eines Chemischen Grossbetriebes

Organisationsschema der Bayer AG



Auflösung der Hoechst AG



Die Größten Deutschen Unternehmen

Rang 96	Rang 95	Name	Branche	Umsatz 1996
1	1	Daimler Benz AG, Stuttgart	Auto, Luftfahrt, Dienst	106339
2	3	Volkswagen AG, Wolfsburg	Automobilindustrie	100123
3	2	Siemens AG, München	Elektronik u. Elektrote	94180
4	5	Mercedes-Benz AG, Stuttgart (zu 1)	Automobil	77624
5	4	Veba AG, Düsseldorf	Energie	74541
6	8	RWE AG, Essen	Energie	65436
7	7	Deutsche Telekom AG, Bonn	Telekommunikation	63075
8	6	Metro AG, Köln	Handel	62024
9	11	Rewe-Gruppe, Köln	Handel	56350
10	13	BMW AG, München	Automobil	52265
11	9	Hoechst AG, Frankfurt/Main	Chemie	50927
13	12	BASF AG, Ludwigshafen	Chemie	48776
14	14	Bayer AG, Leverkusen	Chemie	48608
30	32	RWE Dea AG für Mineralöl und Chemie, Ham	Mineralöl/ Petrochem	24266
31	35	Deutsche Shell AG, Hamburg	Mineralöl	24149
40	40	Aral AG, Bochum (zu 43)	Mineralöl	19896
41	45	Esso AG, Hamburg	Mineralöl	19600
43	50	Veba Oel AG, Gelsenkirchen (zu 5)	Mineralöl	18577
44	44	DEA Mineralöl AG, Hamburg (zu 30)	Mineralöl	18359
47	55	Henkel KGaA, Düsseldorf	Chemie	16301
56	57	Degussa AG, Frankfurt/Main	Chemie	13792
68	66	Hüls AG, Marl (zu 5)	Chemie	10543
179	182	Wacker-Chemie GmbH, München	Chemie	4096
197	193	Solvay Deutschland GmbH, Hannover	Chemie/ Pharmaindu	3720
198	202	Dynamit Nobel AG, Troisdorf (zu 49)	Chemie	3707

Die Größten Chemiekonzerne 1998

Rang			Umsatz in	davon	Änderung	Anteil am
1998	1997		Mio \$	Chemikalien	97 -98	Umsatz
			1998	1998	in %	%
1	1	BASF (Germany)	30,724.0	27,740.0	-1.4	90.3
2	2	DuPont (U.S.)	27,756.4	26,202.0	23.0	94.4
3	3	Bayer (Germany)	31,189.4	17,878.0	-5.4	57.3
4	4	Dow Chemical	18,447.9	17,710.0	-7.1	96.0
5	6	Shell (U.K./Netherlands)	138,274.0	12,272.0	-13.9	8.9
6	7	ICI (U.K.)	15,383.5	12,155.0	-21.5	79.0
7	5	Hoechst (Germany)	26,685.0	11,987.9	-9.1	44.9
8	8	Exxon (U.S.)	103,052.0	10,504.0	-13.9	10.2
9	11	Rhône-Poulenc (France)	14,713.1	9,763.5	19.0	66.4
10	10	Elf Aquitaine (France)	36,174.3	9,743.5	-1.4	26.9
11	31	BP Amoco (U.K.)	83,732.0	9,691.0	89.5	11.6
12	23	DSM (Netherlands)	7,066.6	6,918.9	14.9	97.9
13	12	Sumitomo Chemicals (Japan)	7,086.2	6,872.1	-9.3	97.0
14	18	General Electric (U.S.)	100,500.0	6,633.0	-0.9	6.6
15	14	Clariant (Switzerland)	6,576.8	6,576.8	-6.4	100.0
16	16	Hüls (Germany)	6,310.7	6,310.7	-5.1	100.0
17	13	Dainippon Ink & Chem (Japan)	7,516.7	6,219.5	-0.4	82.7
18	22	Henkel (Germany)	12,124.8	6,207.3	1.9	51.2
19	9	Akzo Nobel (Netherlands)	13,866.5	5,933.9	5.9	42.8
20	15	Norsk Hydro (Norway)	12,918.1	5,862.3	-9.0	45.4
21	30	Ciba Speciality (Switzerland)	5,809.8	5,809.8	7.7	100.0
22	27	Novartis (Switzerland)	21,866.5	5,779.0	0.6	26.4
23	19	Union Carbide (U.S.)	5,659.0	5,659.0	-13.0	100.0
24	21	Toray Industries (Japan)	7,647.4	5,466.2	-6.8	71.5
25	29	Air Liquid (France)	6,768.7	5,452.7	53.0	80.6

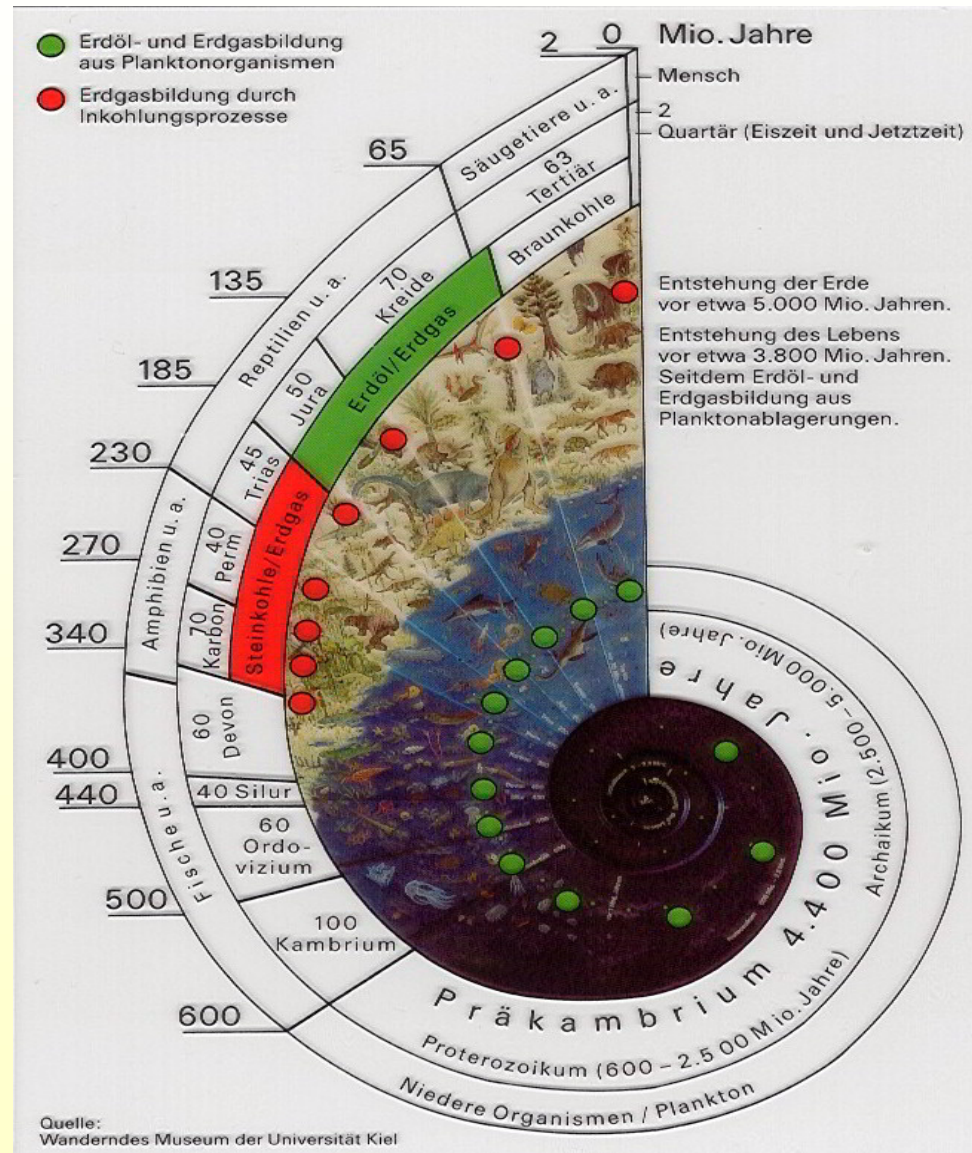
2. Industrielle organische Chemie

2.1. Rohstoffaufarbeitung

2.1.1. Erdöl

2.1.1.1. Vorkommen und Förderung

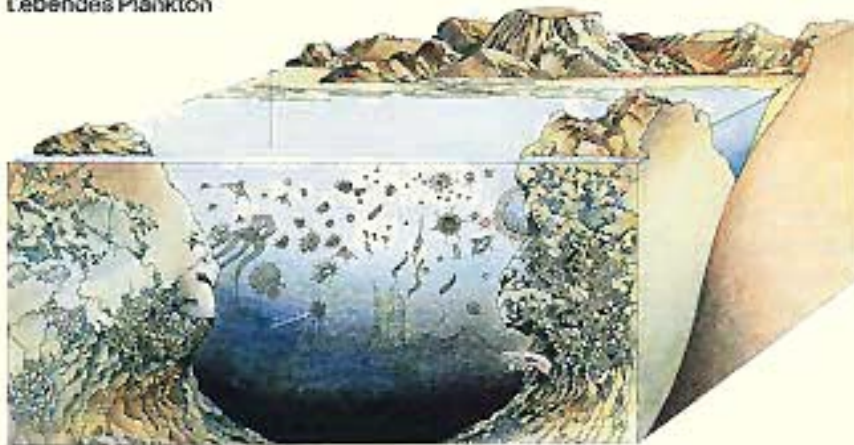
Erdzeitalter und Bildung von Erdöl und Erdgas



Bildung von Erdöl

Muttergesteinsbildung für Erdöl

Lebendes Plankton

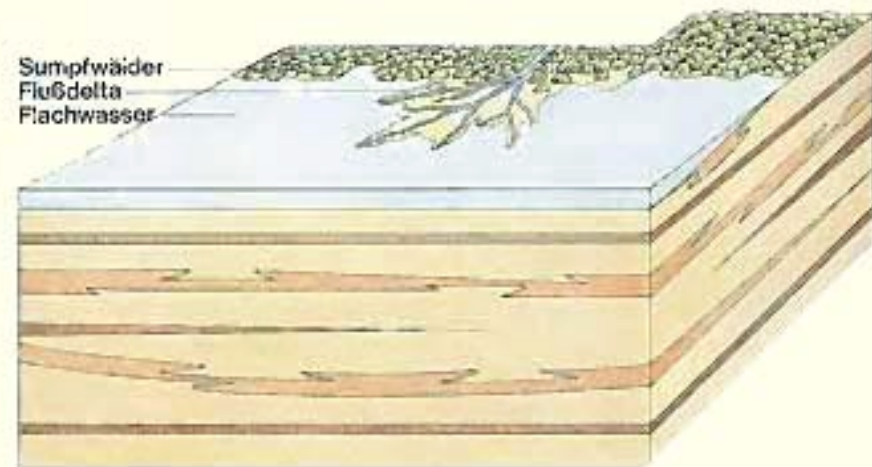


Sauerstoffreiches
Oberflächenwasser

Sauerstoffarmes
Tiefenwasser

Faulschlamm

Muttergesteinsbildung für Erdgas



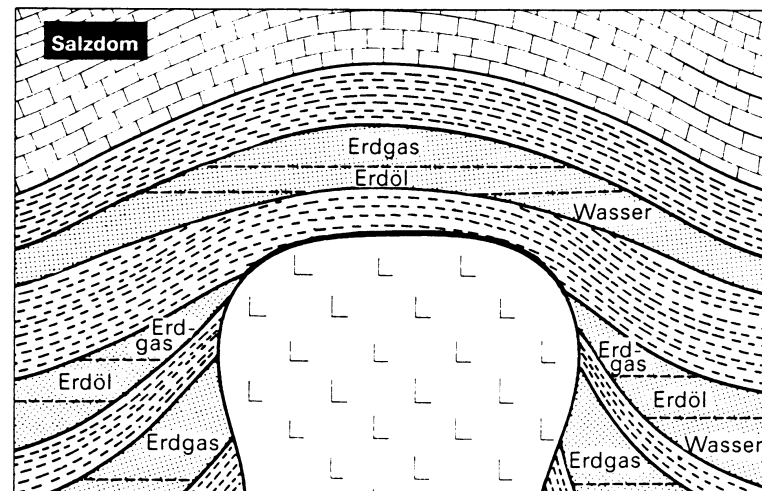
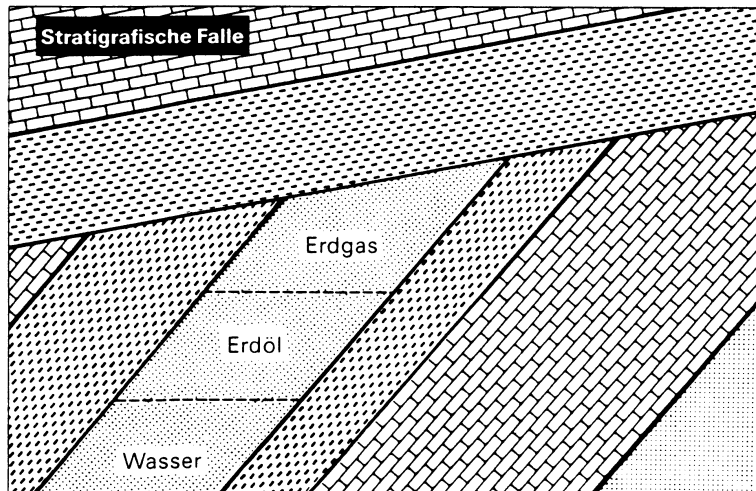
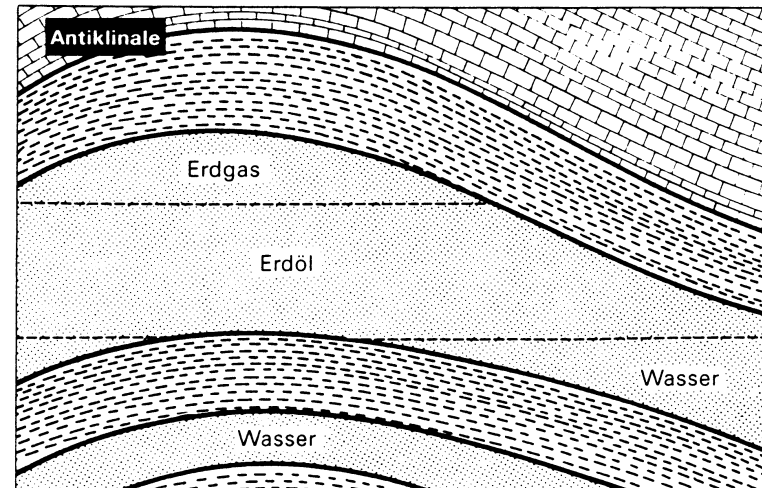
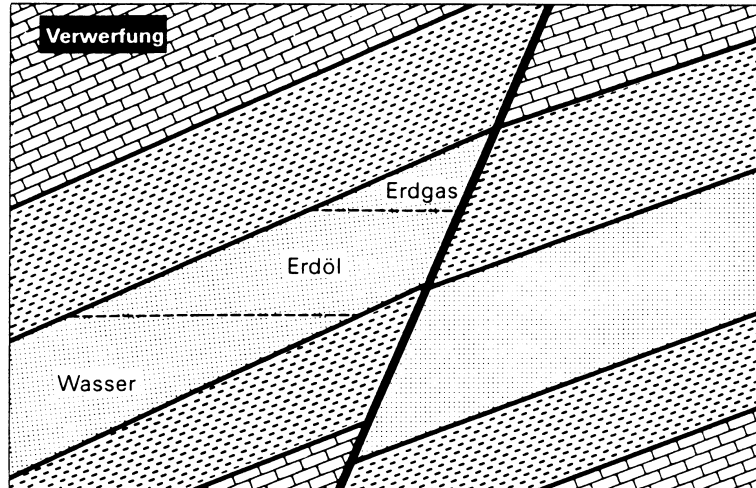
Sumpfwaider
Flußdelta
Flachwasser

Ton

Sand

Torflage

Lagerstättentypen



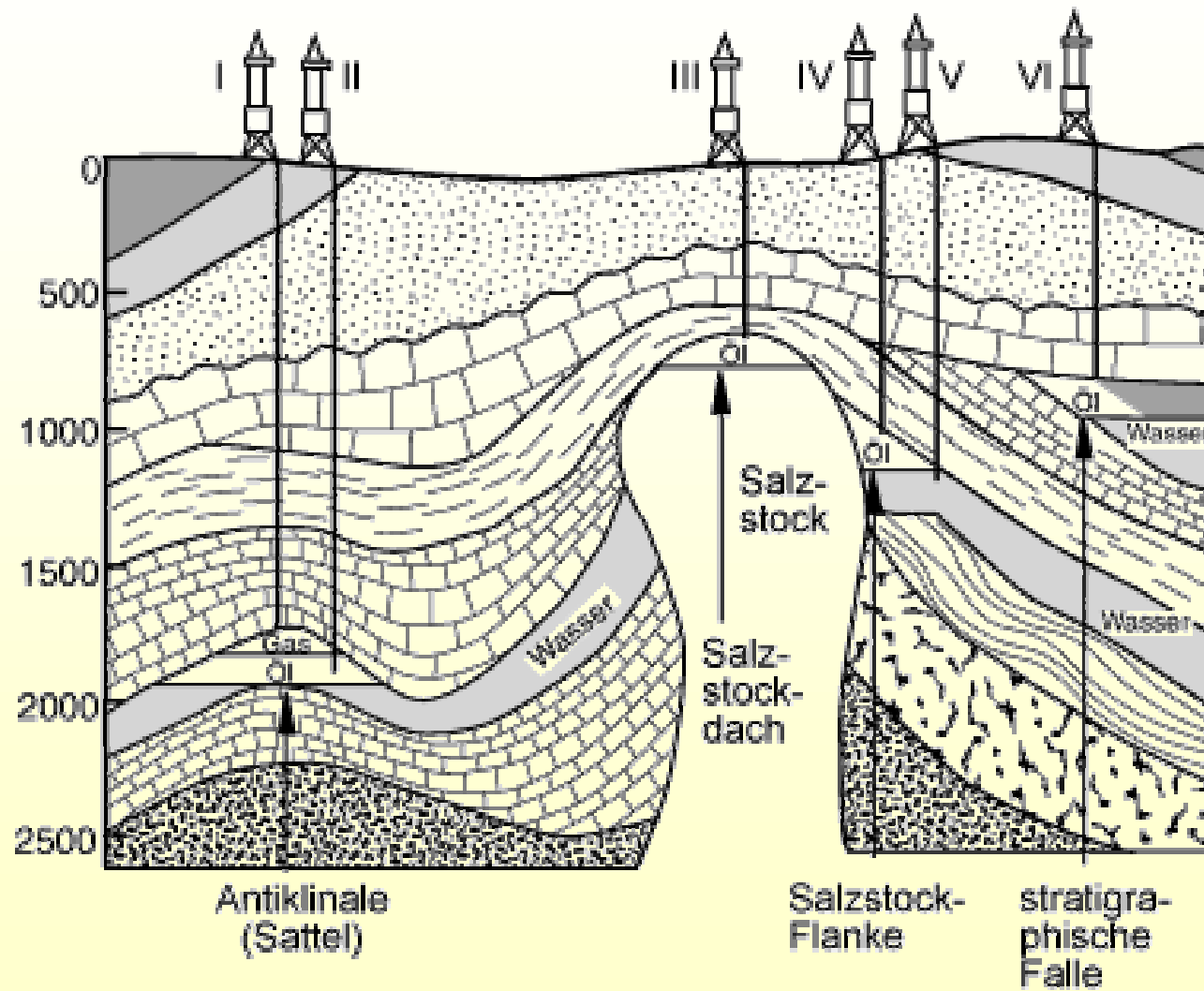
 Durchlässiges Gestein:
Speichergestein
(z. B. Sandstein)

 Undurchlässiges Gestein:
Deckschichten
(z. B. Tonschiefer)

 Andere Deckschichten:
Speichergestein
(z. B. Kalkgestein)

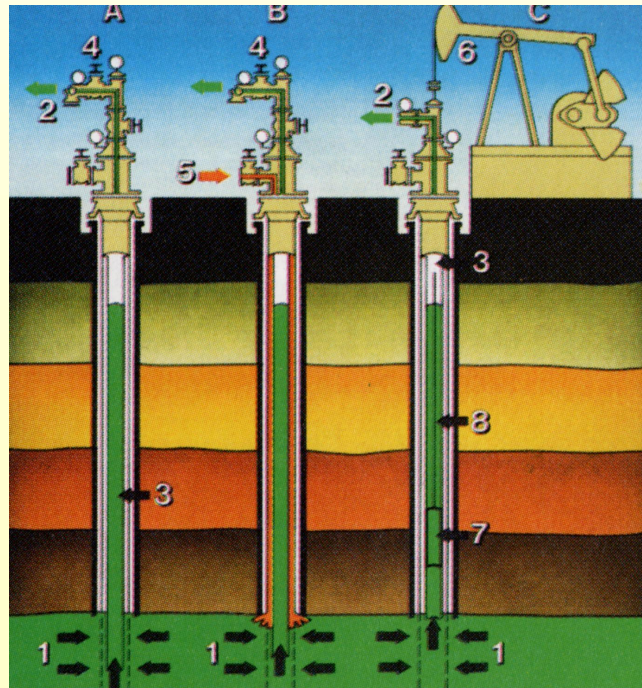
 Salzstock-
lagerstätte

Lagerstättentypen



Fördertechniken

1863

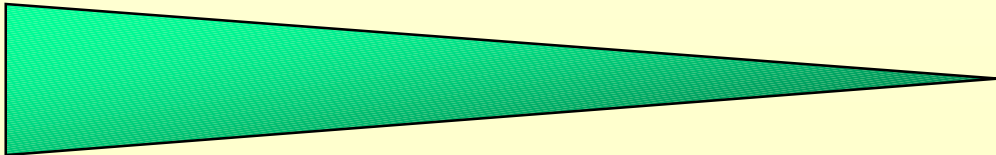


- A Eruptive Förderung
- B Gasliftverfahren
- C Tiefpumpen-Förderung
- 1 Erdölführende Schicht (Lagerstätte)
- 2 Erdöl-Erdgas-Gemisch
- 3 Steigleitung
- 4 Eruptionskreuz
- 5 Erdgasrückführung
- 6 Tiefpumpenantrieb („Pferdekopf“)
- 7 Tiefpumpe
- 8 Pumpgestänge

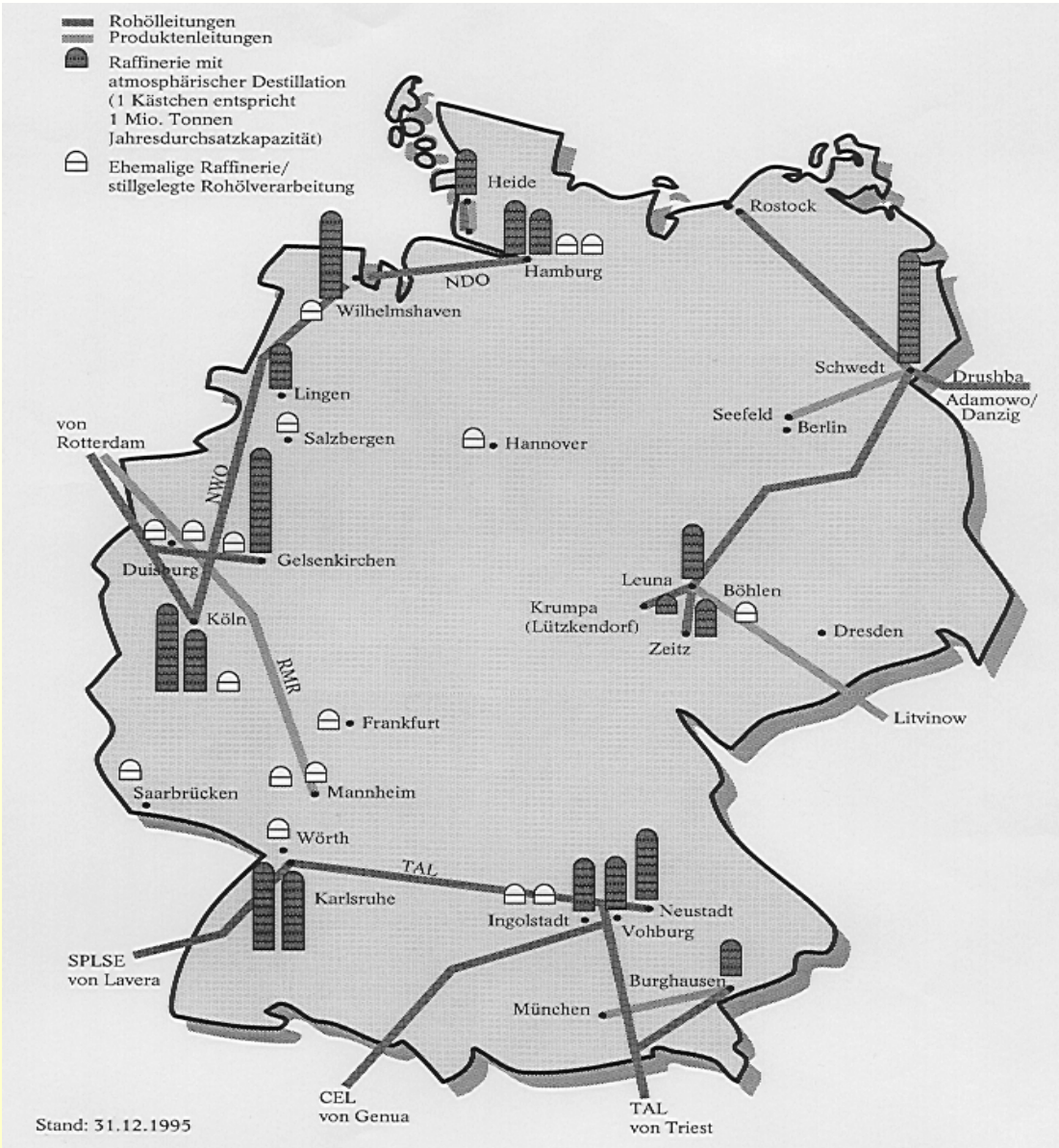


2.1.1.2 AUFARBEITUNG

Typical Composition of Natural Oil in Dependence on the Location

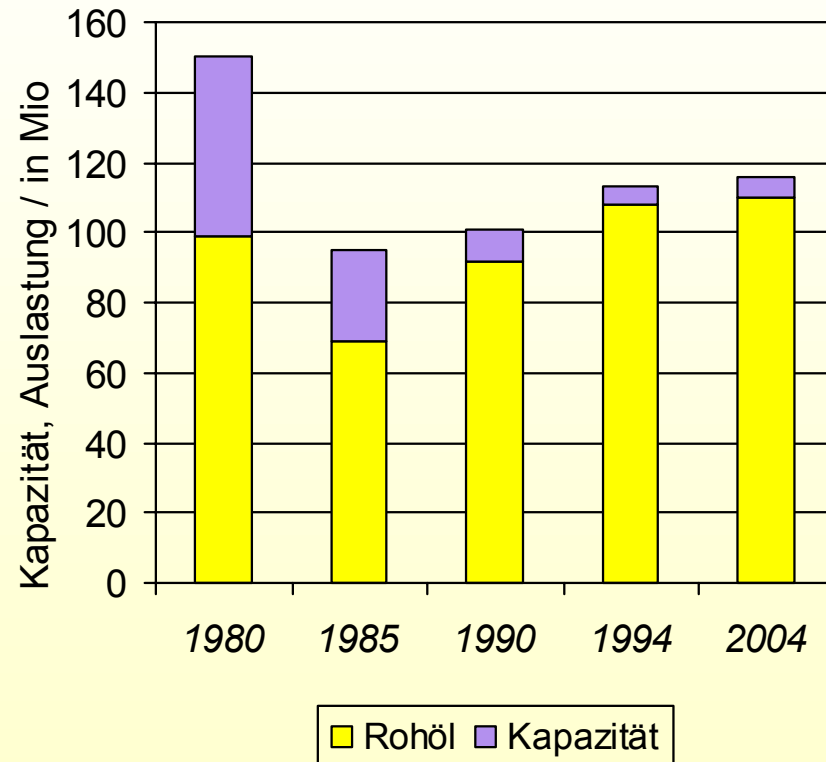
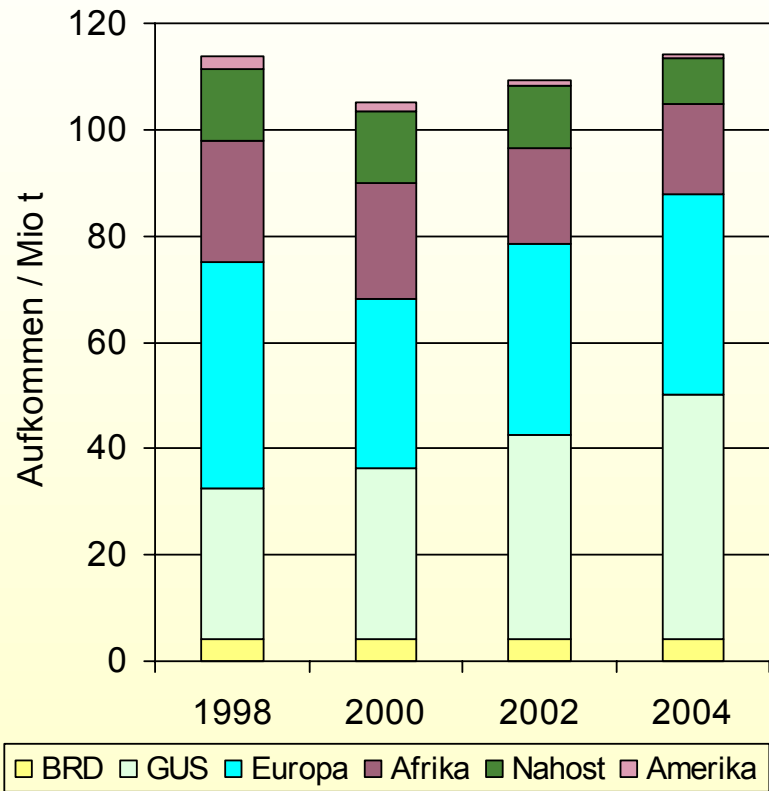
Source	Lybia	U.K.	Middle East Agha Jari	Middle East Arabian Heavy	USA Pennsylv.	Mexico
density g/ml	0.817	0.840	0.855	0.887	0.80	0.970
gasoline	22 %	19 %	20 %	15 %	50 %	3 %
diesel	39 %	37 %	30 %	26 %	30 %	17 %
residue	38 %	41 %	48 %	57 %	20 %	80 %
S-content	0.21 %	0.30 %	1.40 %	3.00 %	0.08 %	5.18 %
price						

Raffineriestandorte in Deutschland



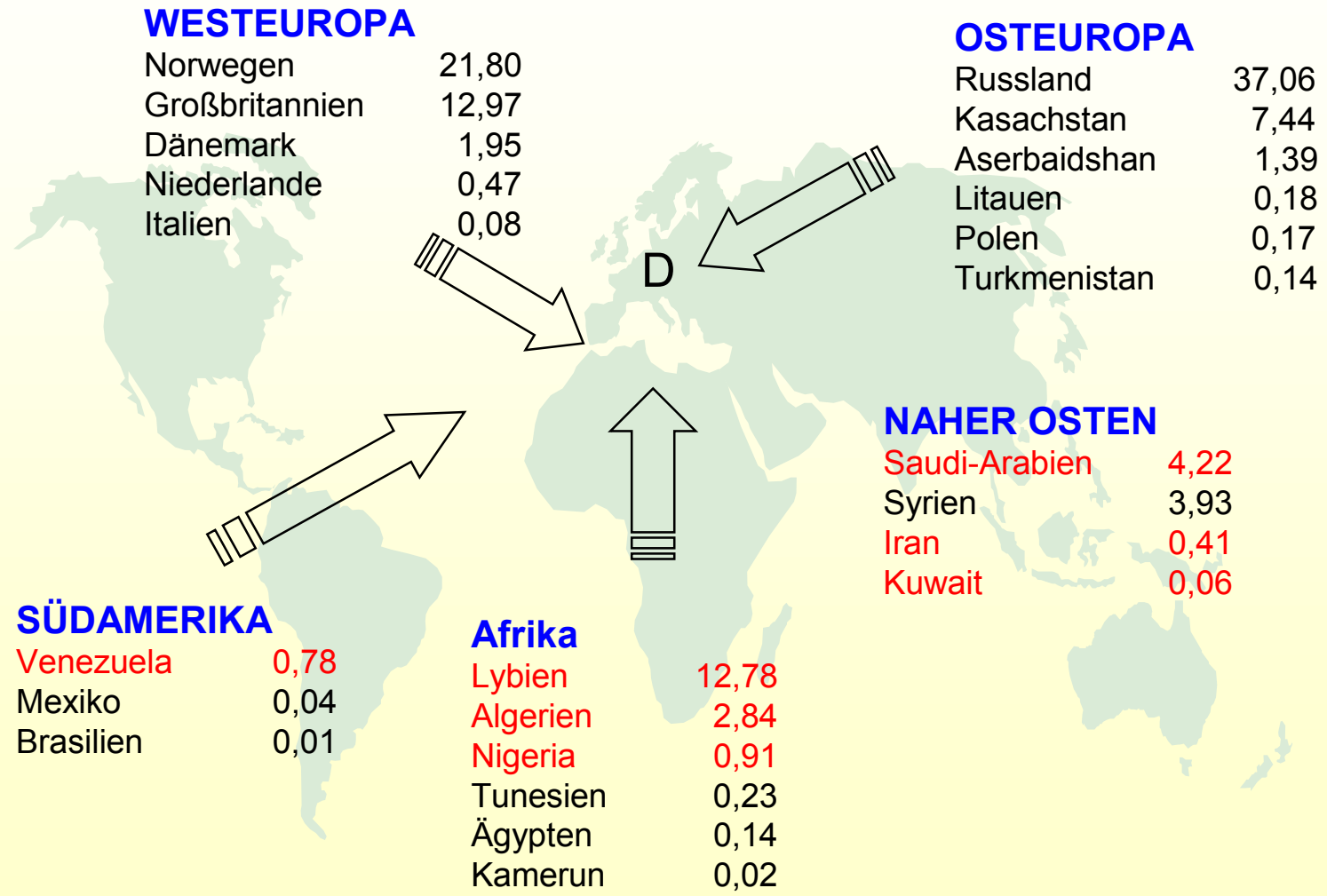
„Mineralöl und Raffinerien“
 Hrsg. Mineralölwirtschaftsverband,
 Hamburg, 1996, S.14

Mineralölaufkommen und Raffineriekapazität



Daten des Mineralölverbandes, 2006
www.mwv.de

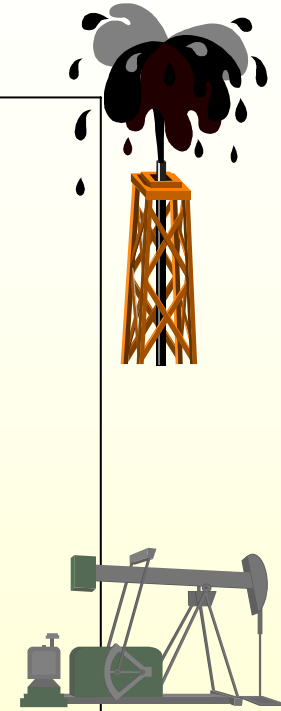
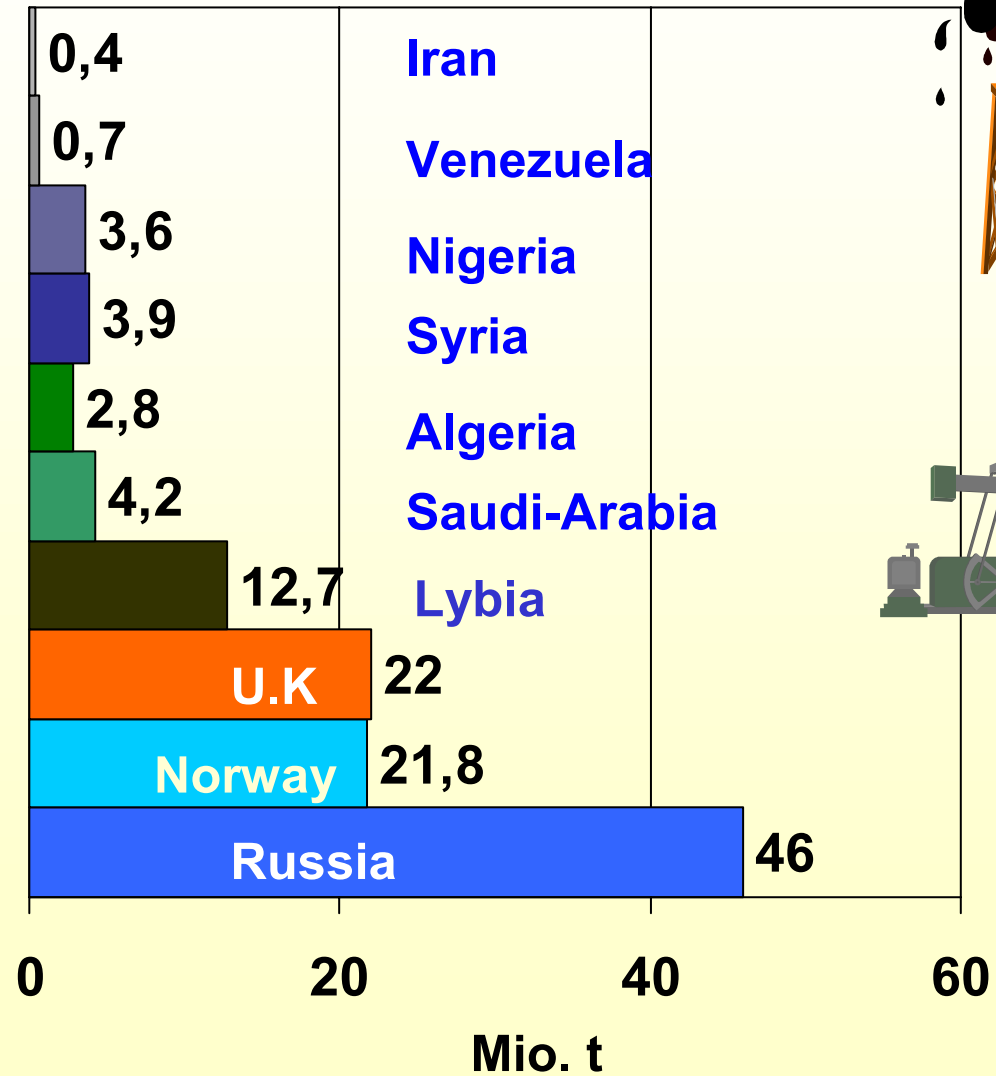
Rohölimport in Mio t



OPEC Mitgliedsstaaten

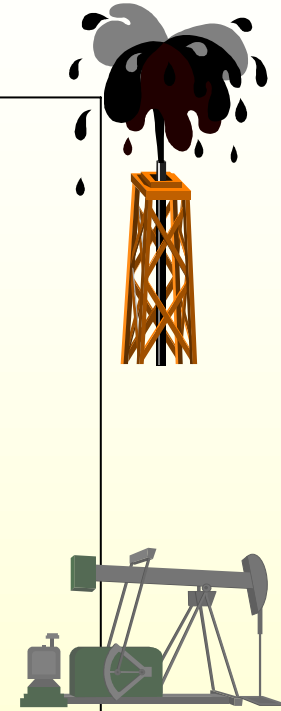
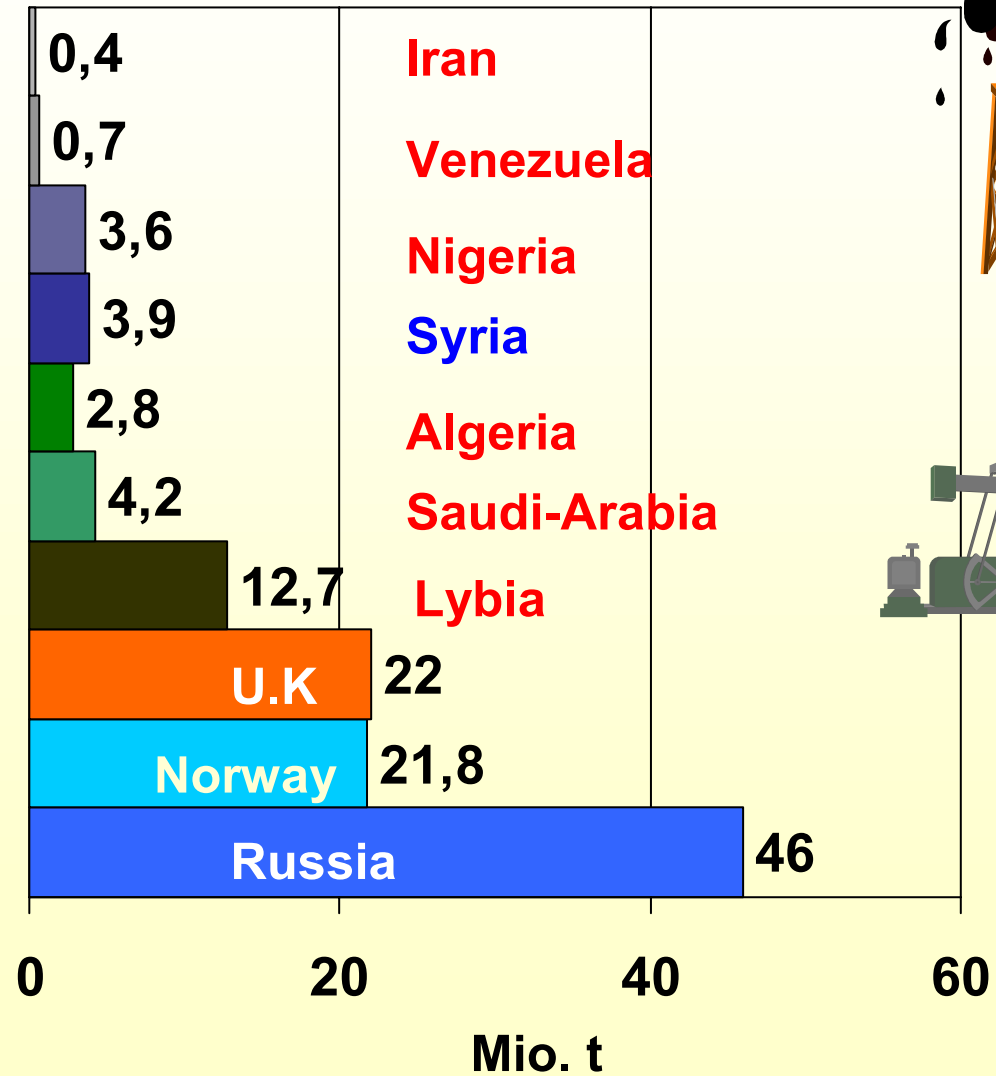
Oil Supplier of Germany in 2004

sum: 110 Mio. t



Oil Supplier of Germany in 2004

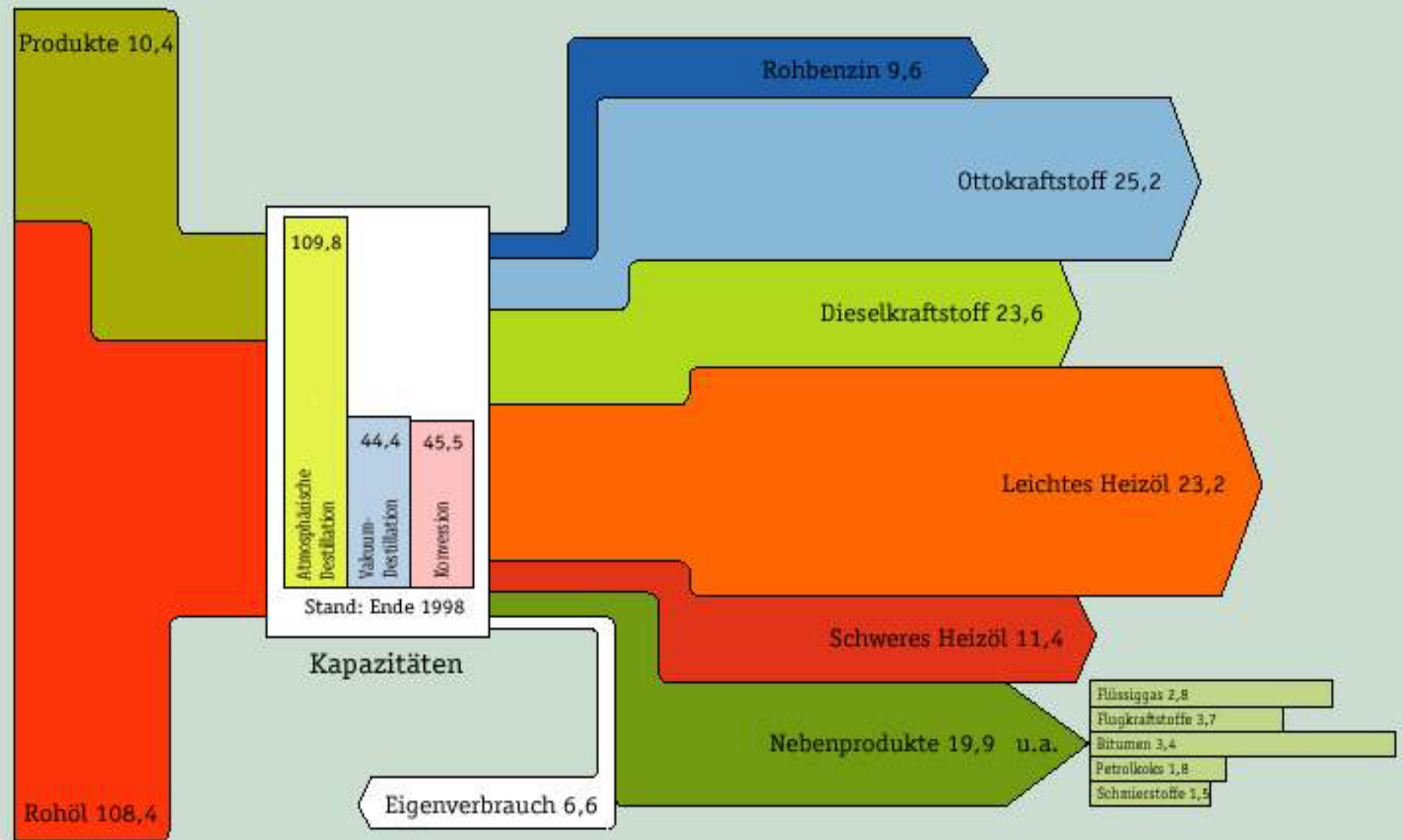
sum: 110 Mio. t



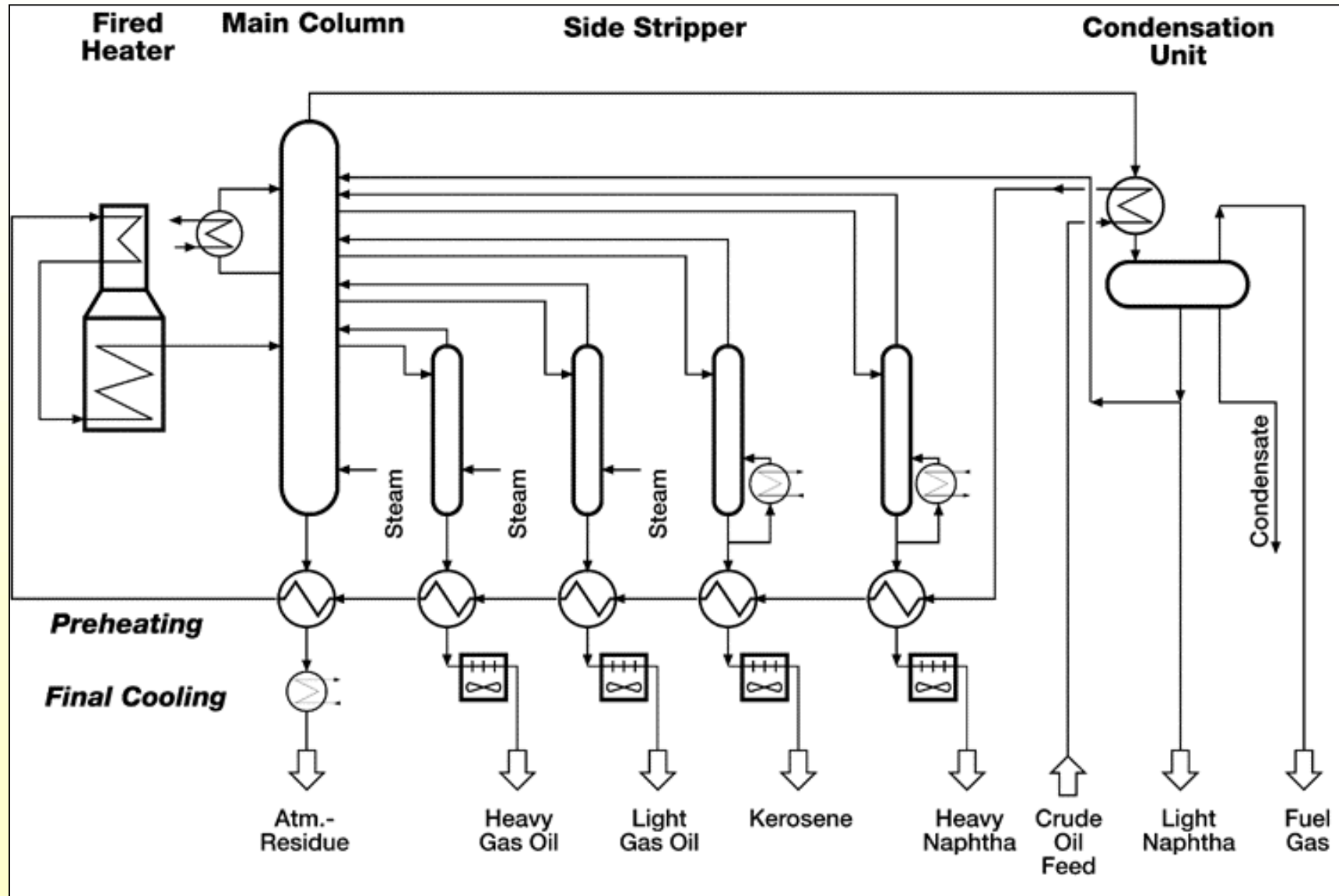
Raffineriebilanz

Raffinerie-Bilanz 1998 (in Millionen Tonnen)

Abb. 1



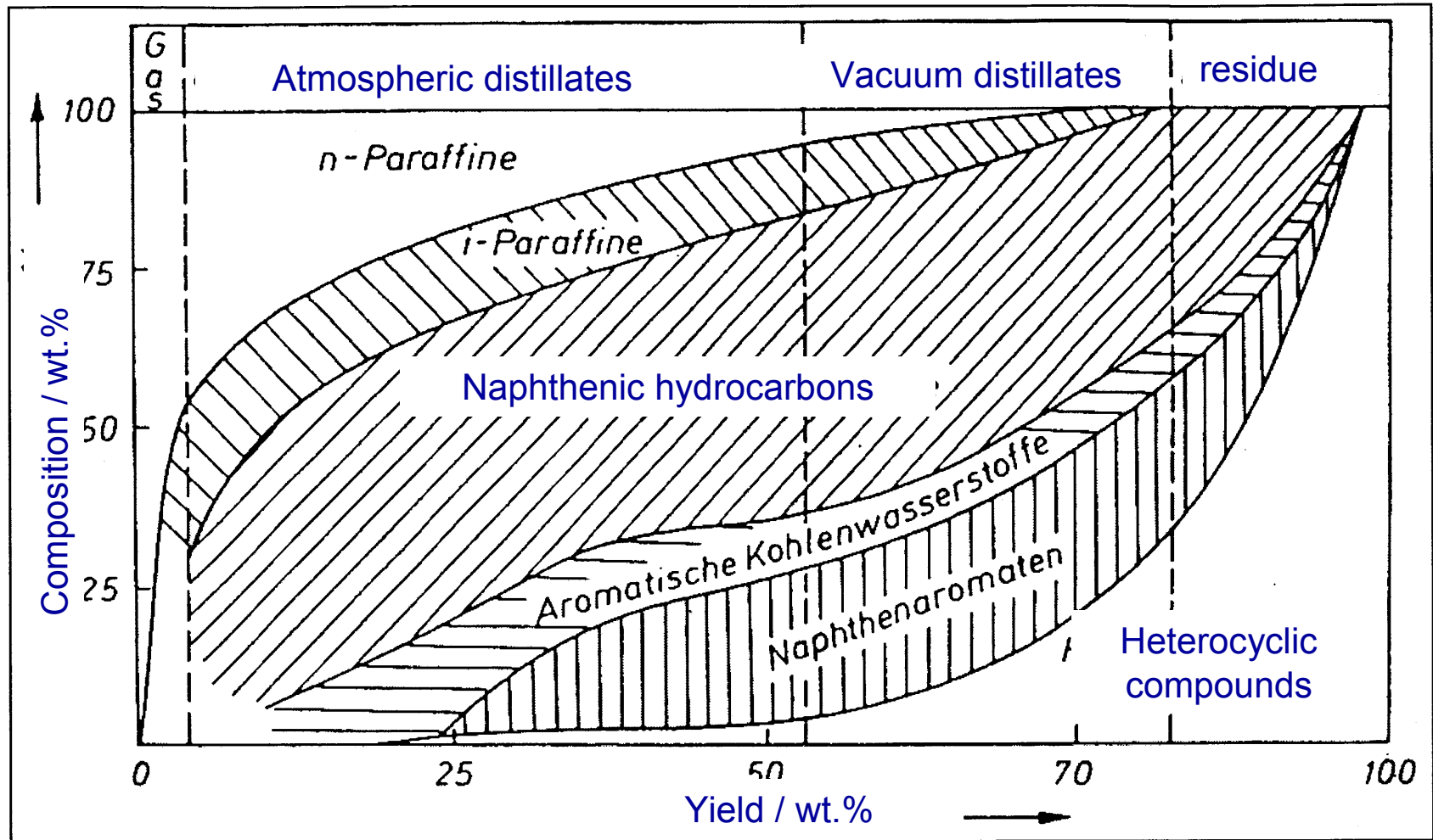
Crude Oil Distillation



Fractional Distillation of Crude Oil

	Fraction	Boiling range / °C	Carbon numbers	application
Atmospheric Distillation	Gas	< 20		heating gas
	Light gasoline	20 - 80	C ₃ - C ₅	gasoline pyrolysis
	Heavy gasoline	80 - 175	C ₇ - C ₁₀	gasoline aromatics
	Kerosine	175 - 260	C ₁₀ - C ₁₄	aviation turbine fuel
	Diesel	220 - 320	C ₁₂ - C ₁₈	diesel fuel fuel oil gasoline
	Gas oil (light)	250 - 350	C ₁₄ - C ₂₂	domestic oil gasoline
Vacuum distillation	Long residue	> 350	> C ₂₂	domestic oil CO, H ₂
	Gas oil (heavy)	350 - 400		domestic oil lubricants
	Spindle oil	400 - 500		lubricants paraffins
	vacuum residue	> 500		heating oil tar, bitumen

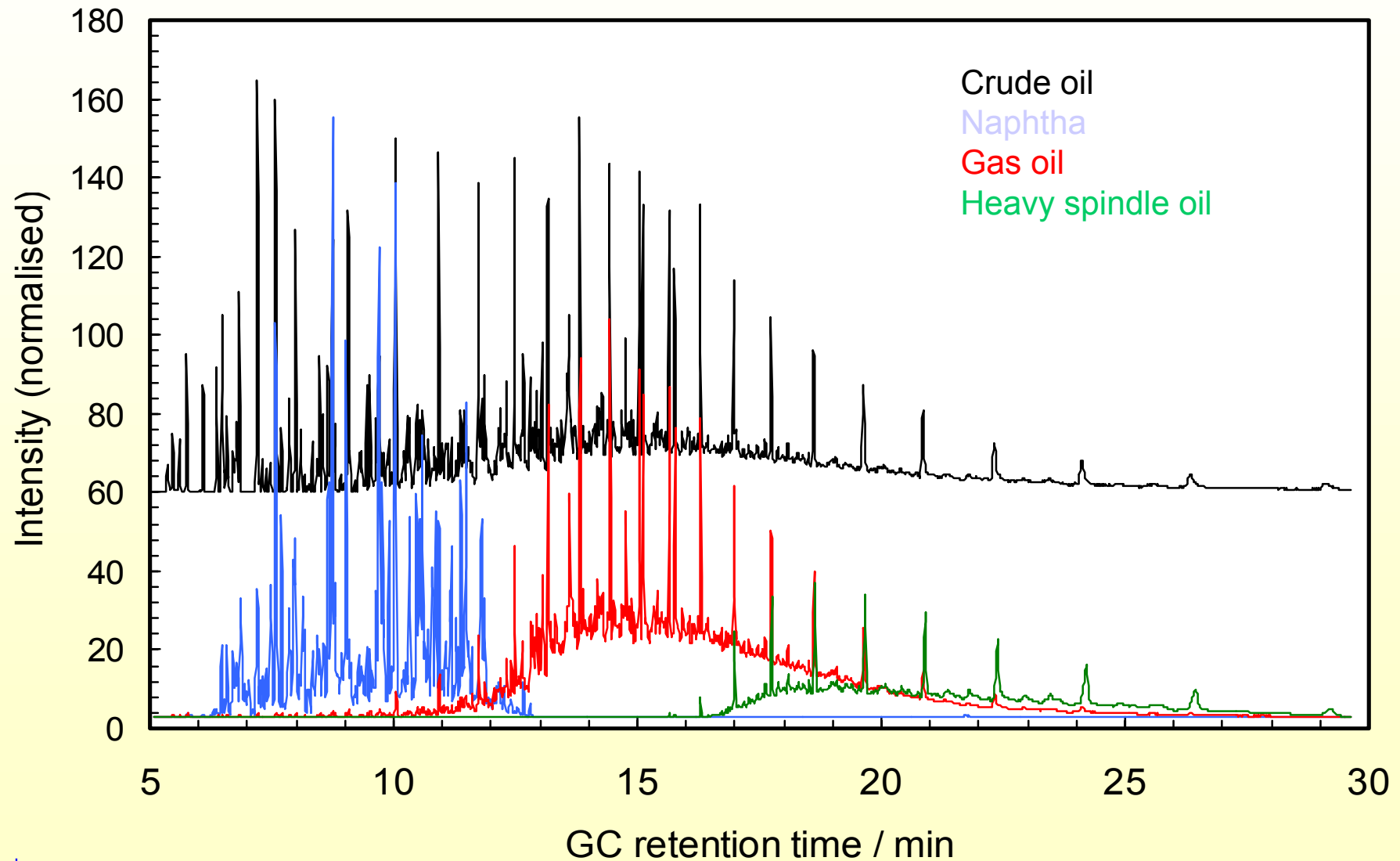
Composition of Natural Oil



Distribution of structural types of a typical natural oil in dependence on the boiling range

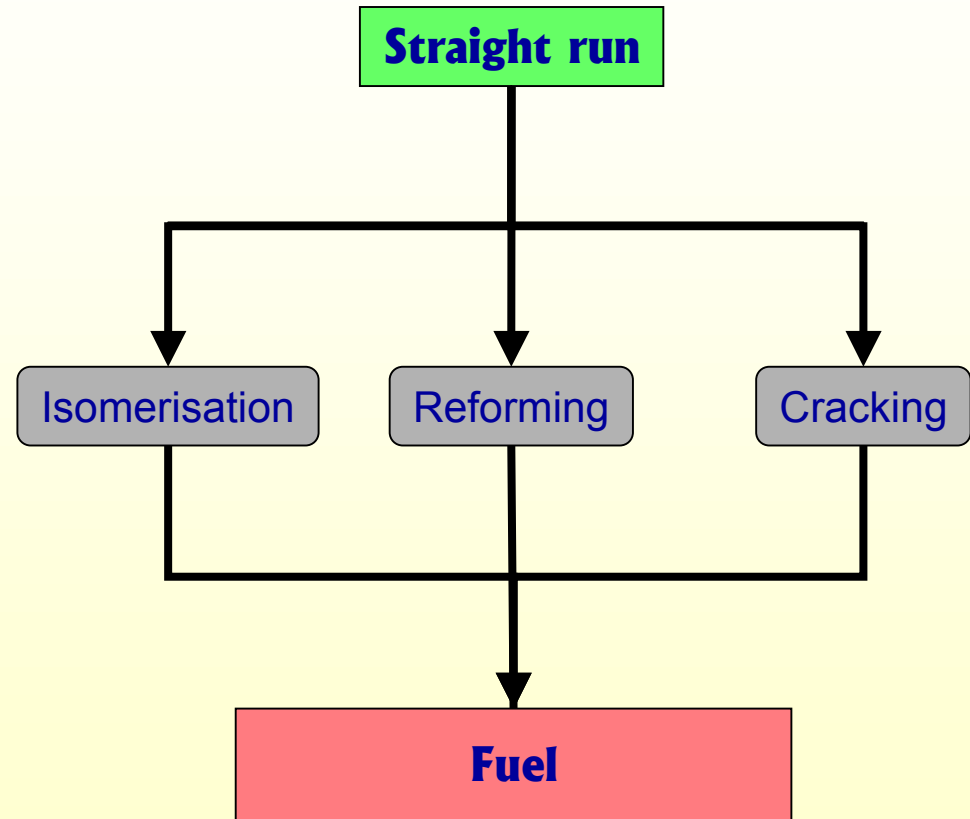
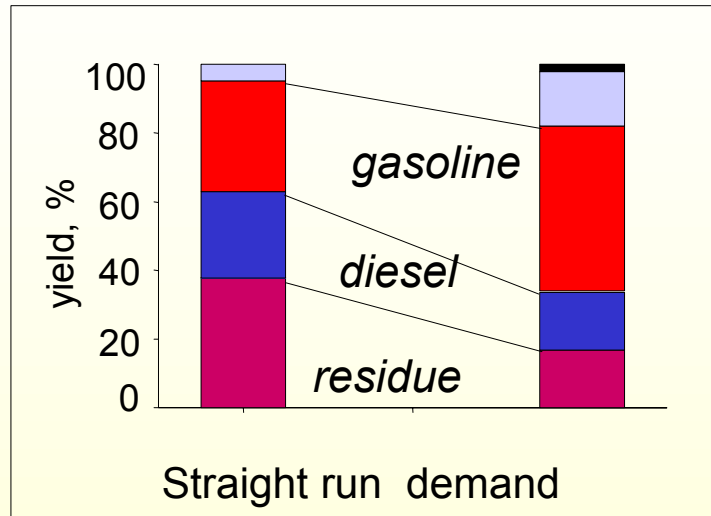
Analysis of Oil Fractions of Natural Oil from North Sea

Comparison of crude oil, Naphtha and Spindle oil



2.1.1.3 Catalytic Reforming



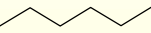
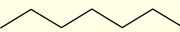







Crude Oil and Fuel



Octan number (ROZ)	
Straight run	demand
50...70	> 95

Anti-knocking Properties of Fuel Components

$$\text{RON} = \frac{\text{2,2,4 -trimethylpentane (Vol.\%)}}{n\text{-heptane (Vol.\%)}}$$

Hydrocarbon	b.p. / K	RON	
Propane	231	111	
Butane	273	94	
Hexane	342	25	
Heptane	371	0	
Methylcyclopentane		91	
Benzene	353	100	
Cyclohexane	354	83	
1,1-dimethylcyclopentane		92	
1,3-dimethylcyclopentane		91	
Methylcyclohexane	373	75	
<i>Cubane</i>			

Composition of Transportation Fuel (accord. DIN)

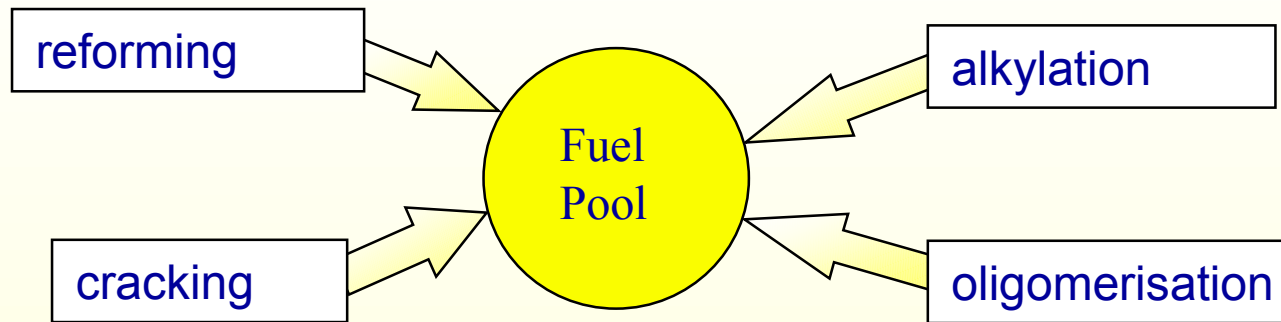
Property		Normal	Super	California	Super Plus	Diesel	City Diesel
RON/Cetan		91	95		98	51	51
Lead	g/L	0	0	0	0		
Olefine	Vol.%	21	18	3,5...4	18		
Aromatics	Vol.%	42	42		42	11*	5*
Benzene	Vol.%	1	1	0,38...0,6	1		
Sulfur	mg/kg	150	150	18...20	50	350	10
			from 2005: 50				
Methanol	Vol.%	0	0		0		
MTBE	Vol.%	0	5...10		15		
∑ oxygen	wt.-%	2,7	2,7	2,0...2,2	2,7		

* incl. polyaromatics

Boiling range: 10...20 Vol.% up to 70 °C
> 95 Vol.% up to 200 °C

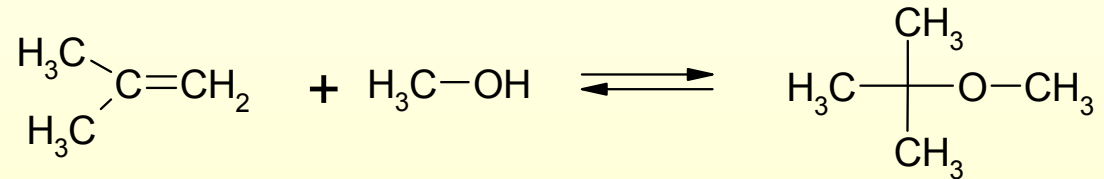
Components of Gasoline

1. Hydrocarbons: aromatics, naphthene, *n-* / *i-* paraffin

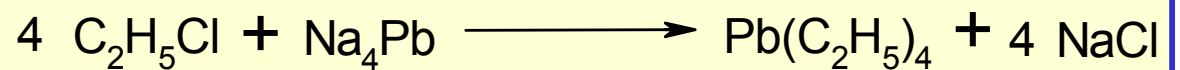


2. Antiknocking agents:

MTBE



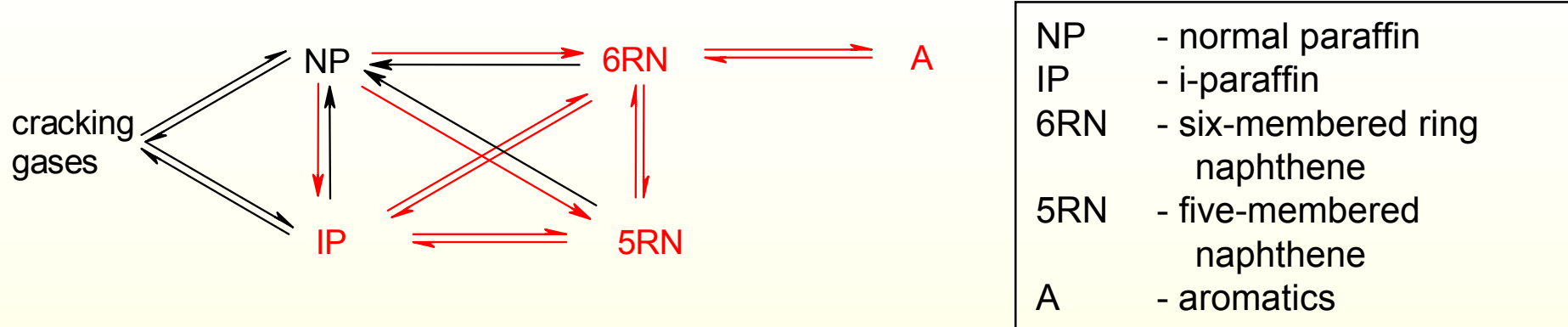
Tetraethyllead,



3. Additives: dyes, Ethyl bromide

Alternative fuels: Ethanol, methanol, rape oil methyl ether

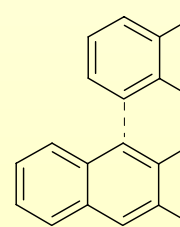
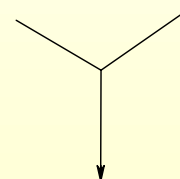
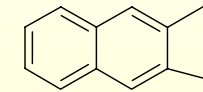
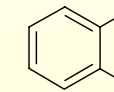
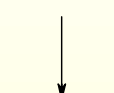
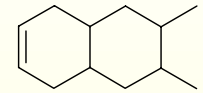
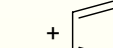
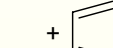
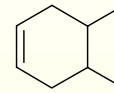
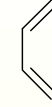
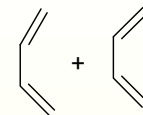
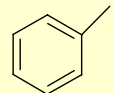
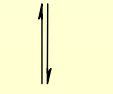
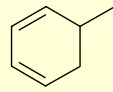
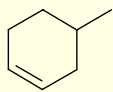
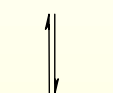
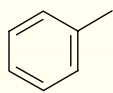
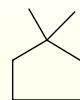
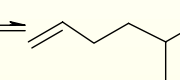
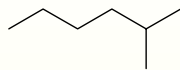
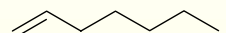
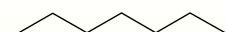
Enthalpy of Reforming Reactions



Reaction	Enthalpy of Reaction / kJ/mol			
	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
NP ↔ IP	- 9,6	- 9,6	- 8,0	- 8,4
6RN ↔ 5RN	15,9	18,9	29,8	36,9
6RN + H ₂ ↔ IP	- 54,1	- 44,8	- 38,1	- 32,7
5RN + H ₂ ↔ IP	- 70,0	- 63,7	- 67,9	- 69,6
6RN + H ₂ ↔ NP	- 44,4	- 35,2	- 30,6	- 24,3
5RN + H ₂ ↔ NP	- 60,3	- 54,5	- 60,3	- 61,3
6RN ↔ A + 3 H ₂	219,1	215,8	209,1	213,7
5RN ↔ A + 3 H ₂	203,2	196,9	179,3	176,8

Chemistry of Reforming

metallic centres

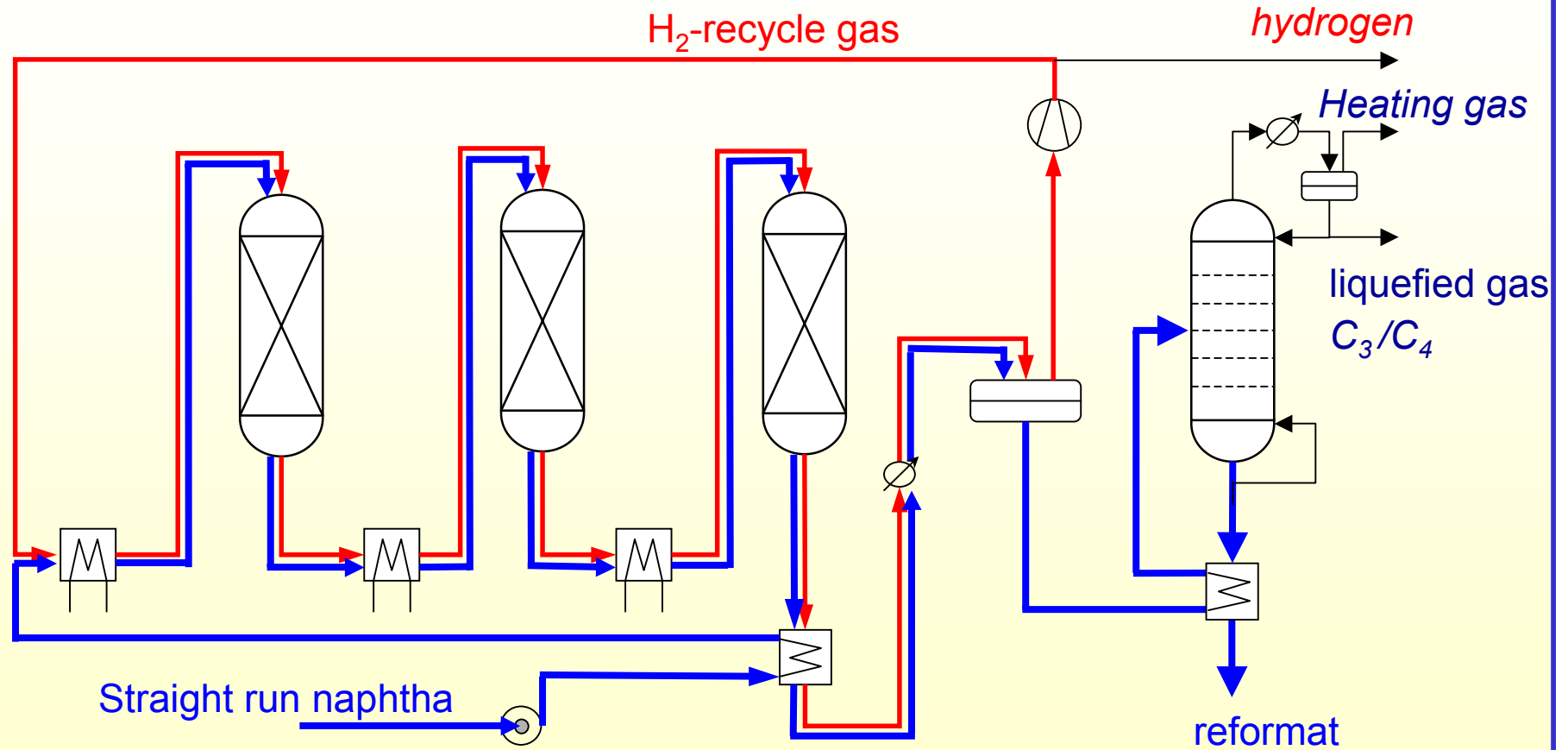


acidic centre

p_{H₂} > 2 MPa



Catalytic Reforming Unit

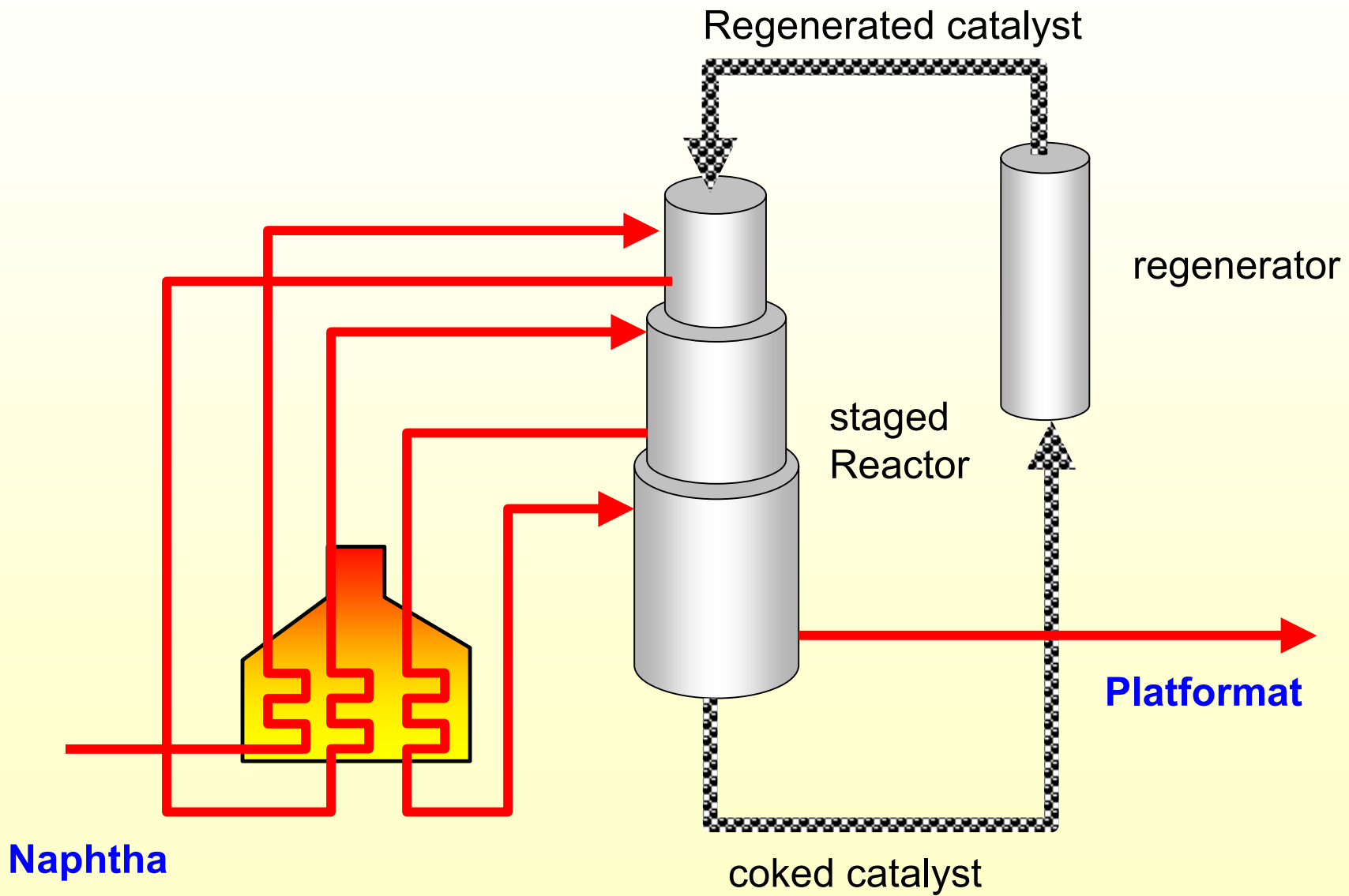


Catalytic reactor with intermediate heater

gas separator

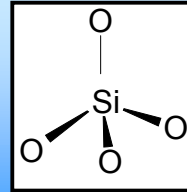
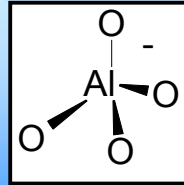
stabilisation column

PLATFORMING Process of UOP

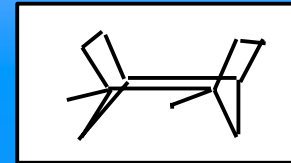
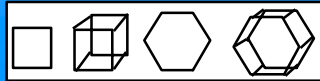


Structure of Zeolites

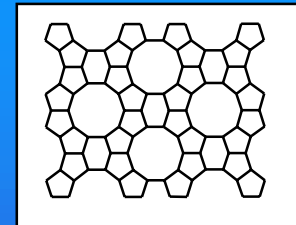
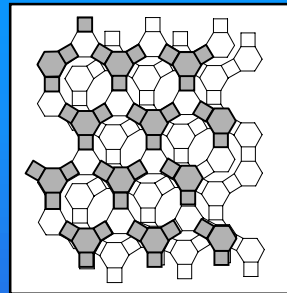
primary structure



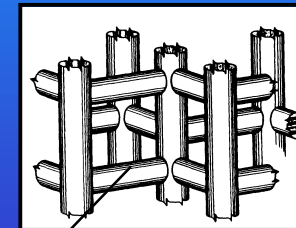
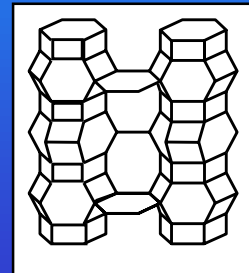
secondary structure



tertiary structure



3 D structure



0,36 x 0,52 nm

0,51 x 0,54 nm

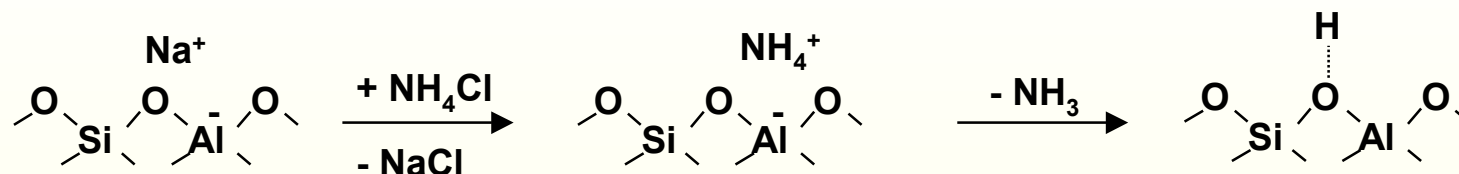
0,53 x 0,56 nm

erionite

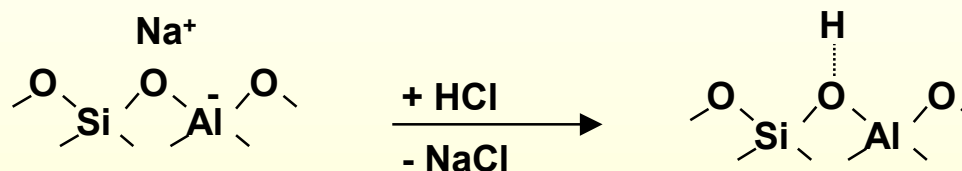
ZSM-5

Formation of Acid Sites

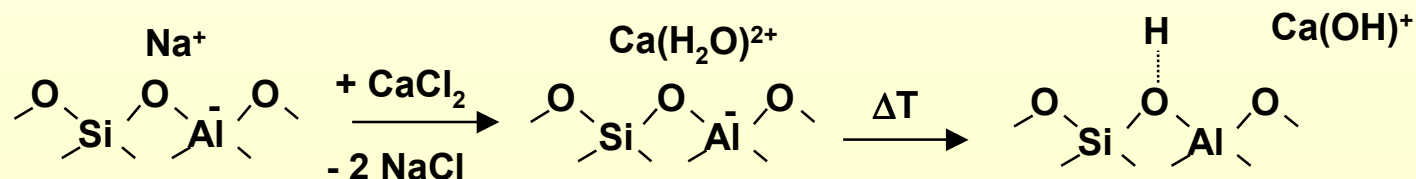
1. Thermal decomposition of ammonium ions:



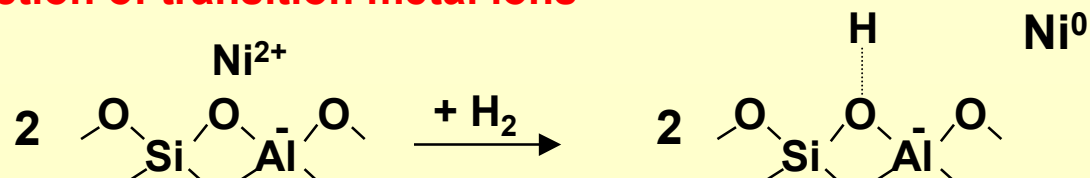
2. Ion exchange with mineral acids:



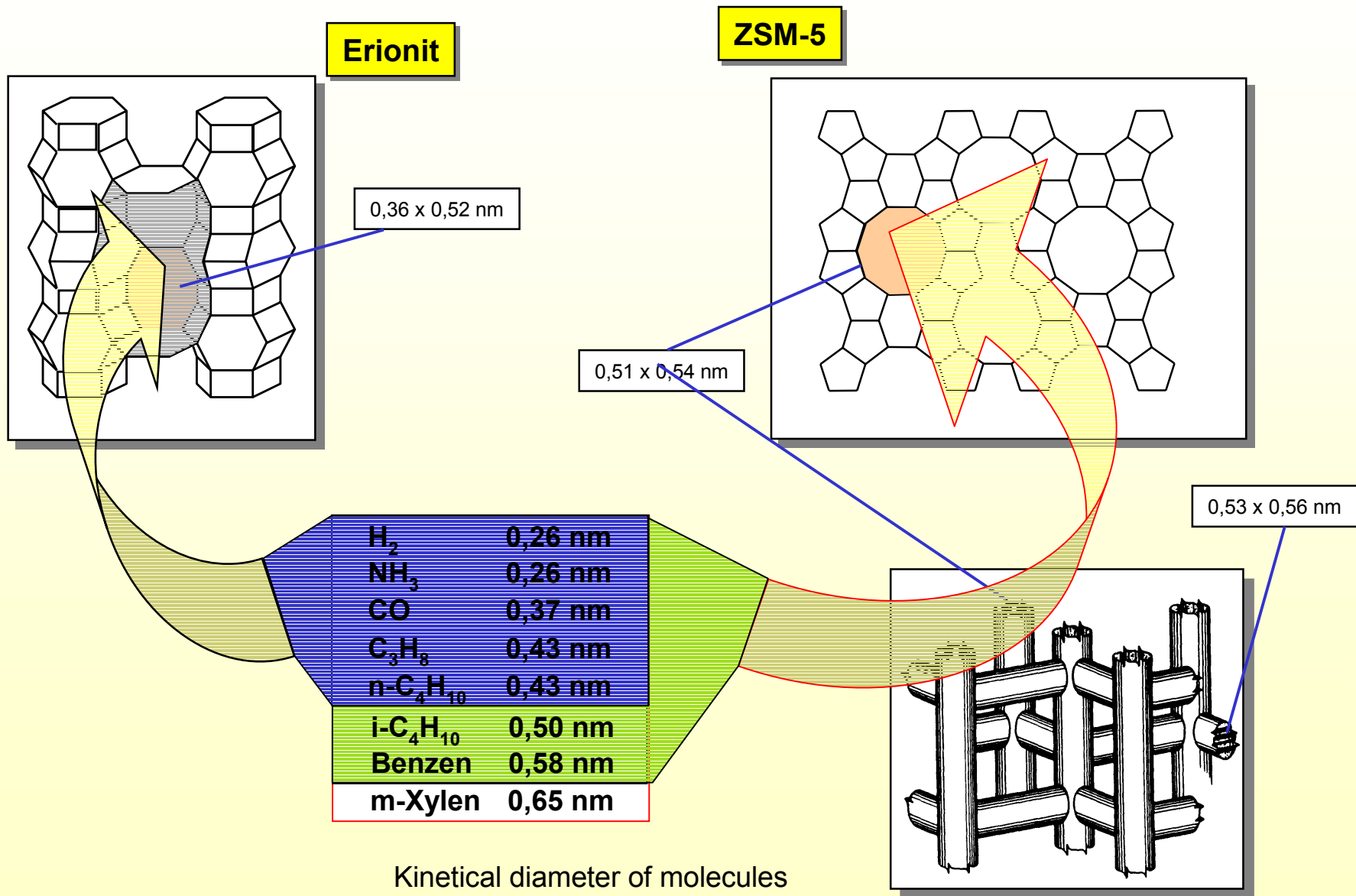
3. Ion exchange with polyvalent ions:



4. Reduction of transition metal ions

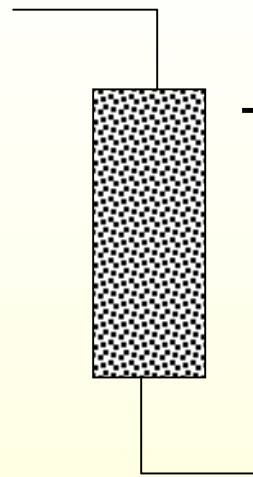


Reactant Selectivity




Formselektives Reformieren

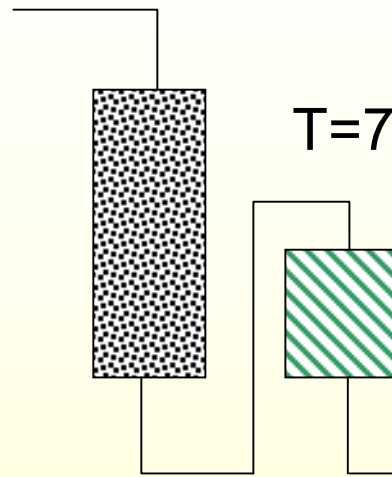
Reforming




T=778 K

 Pt/Al₂O₃

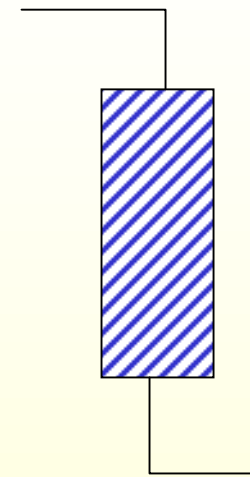
Selectoforming




T=725 K

 Ni/H-Erionit

formselektives Reformieren



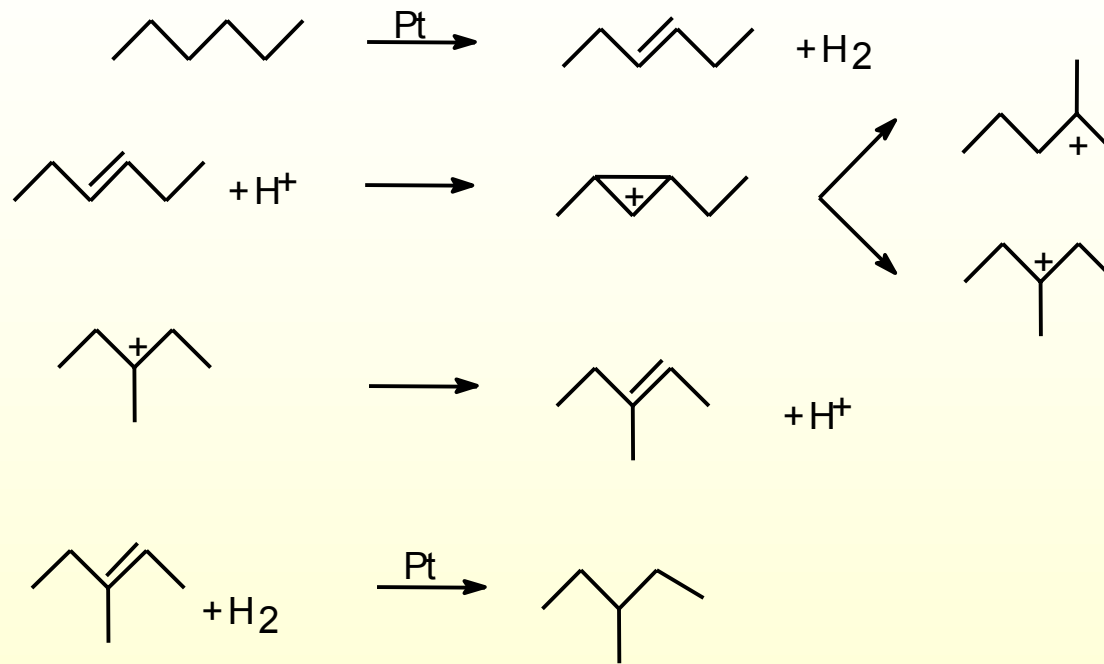
T=753 K

 Pt/Al₂O₃ + Pt/H-Erionit

RON	89,6	89,9	97,2
Paraffine (Gew.-%)	39,2	35,1	44,4
Naphthene (Gew.-%)	6,3	12,8	12,9
Aromaten (Gew.-%)	54,5	52,2	42,4

2.1.1.4. Isomerisation

Light Gasoline Isomerisation



Paraffin	Octan number	Olefin	Octan number
<i>n</i> -hexane	25	<i>n</i> -hexen	76
2-methylpentan	73	2-methyl-pent-2-ene	96

2.1.1.5 Cracking of Oil Fractions

Hydrotreatment

Hydrocracking

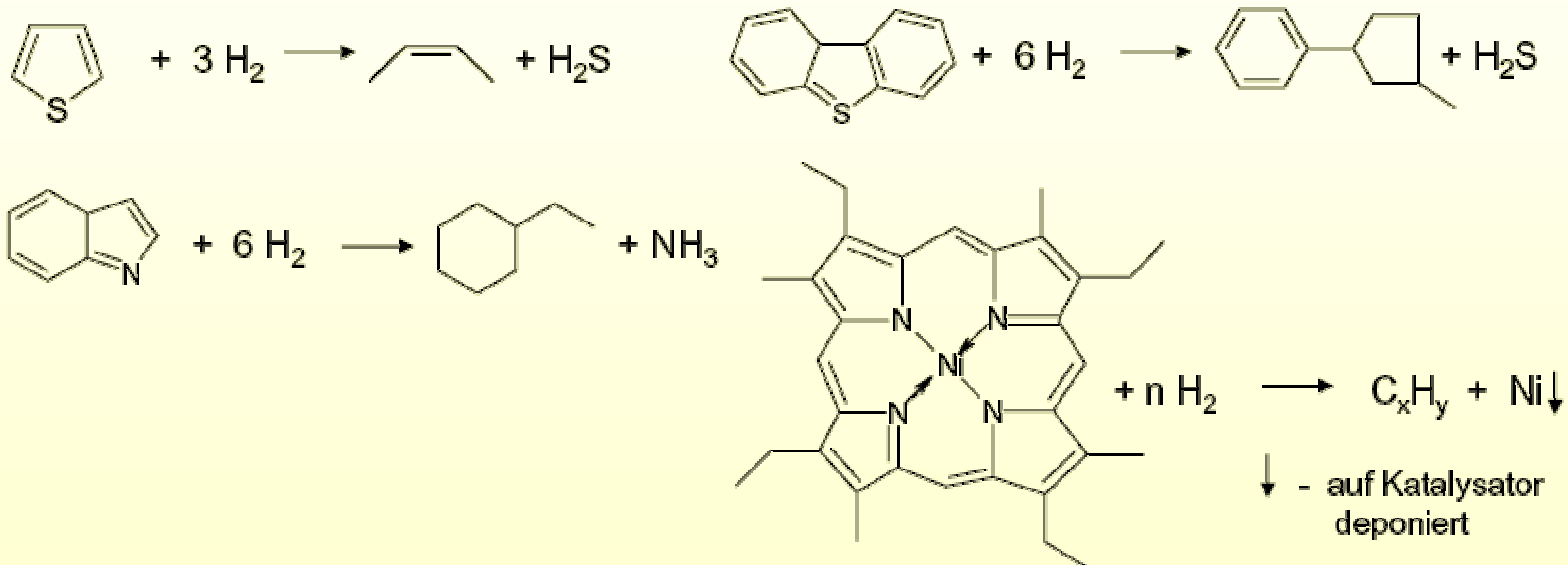
Acidic Cracking

Thermal Cracking

Hydrosulfidation

- **Zweck: Entfernung von Heteroatomen** (S, N, (O), Metalle)
zur Vermeidung von Katalysatorvergiftung
Umweltproblemen
Korrosionsproblemen

- **Typische Reaktionen:**



**Schwefel leichter zu entfernen als Stickstoff, Metalle
bei Metallen - irreversible Katalysatorvergiftung durch Deposition**

Alle Reaktionen (z. T. stark) exotherm - *aber*
Gesamtprozess wegen geringer Konzentrationen thermoneutral !

Varianten

□ Katalysatoren

Grundfunktionen: Hydrierung, Hydrogenolyse (in Gegenwart von Schwefel)

Co-Mo/Al₂O₃, Ni-Mo/Al₂O₃, Ni-W / Al₂O₃
(unter Reaktionsbedingungen - Sulfide)

□ Varianten

- Benzine: nur Entschwefelung, keine Aromatenhydrierung
Gasphase
→ ca. 350 °C, 15-40 bar
- Gasöle: Entschwefelung, Denitrifizierung und Aromatenhydrierung
Flüssigphase
→ ca. 350 °C, 40-100 bar, längere Verweilzeiten
- Rückstände: Entschwefelung, Denitrifizierung und Aromatenhydrierung
möglichst auch leichtes Cracken
Flüssigphase
→ bis 500 °C, bis 200 bar

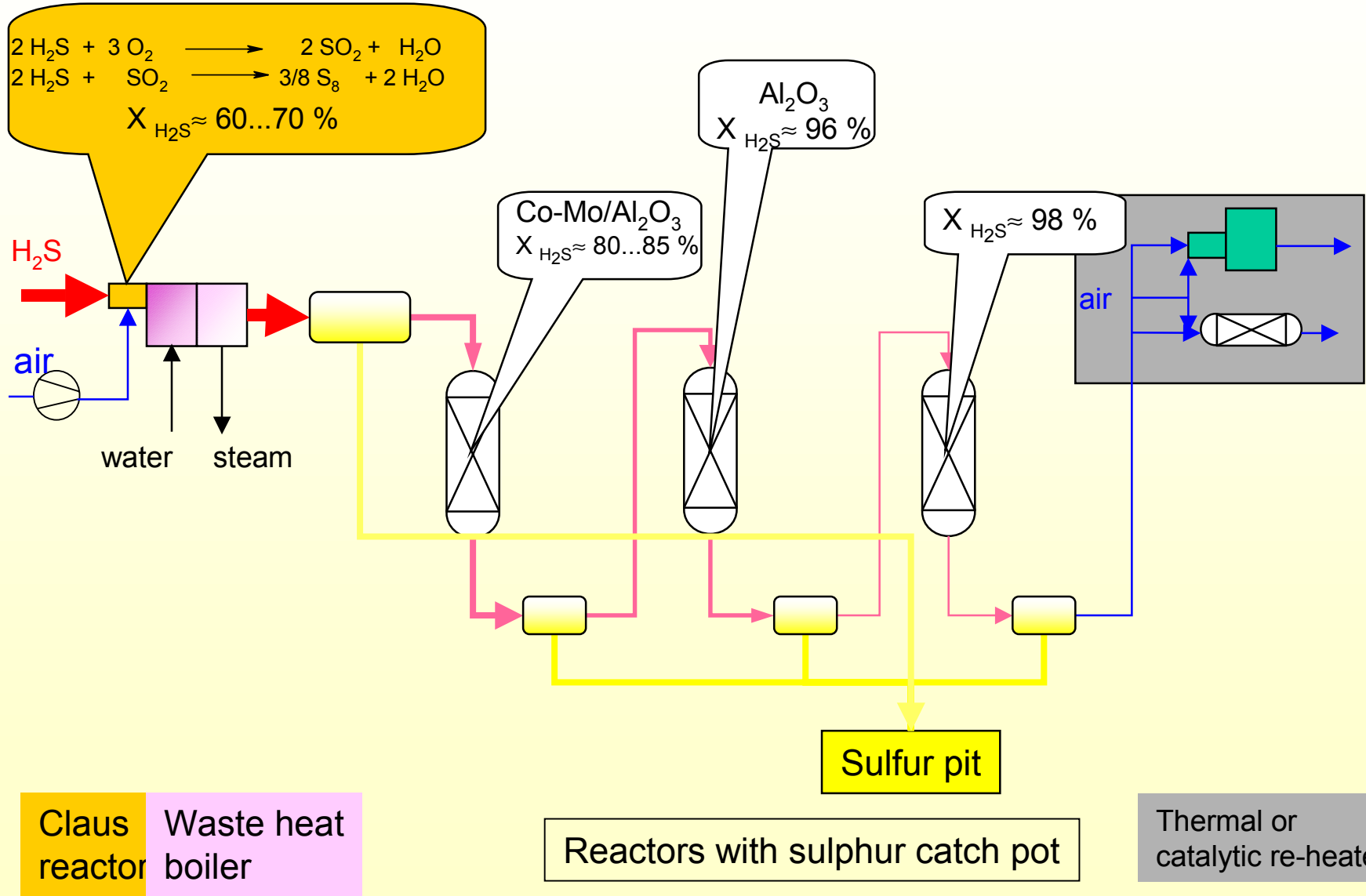
□ Abtrennung und Verwendung des H₂S

Abtrennung durch Gaswäsche mit schwach basischen Lösungsmitteln

B.: Monoethanolamin HO-CH₂-CH₂-NH₂

Oxidation des konzentrierten H₂S zu Schwefel (Claus-Prozess)

Sulphur Recovery Process



2.1.1.5 Cracking of Oil Fractions

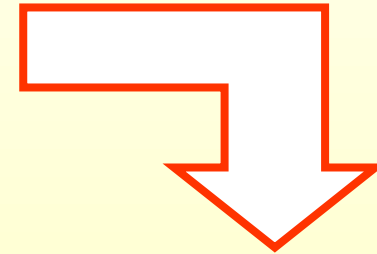
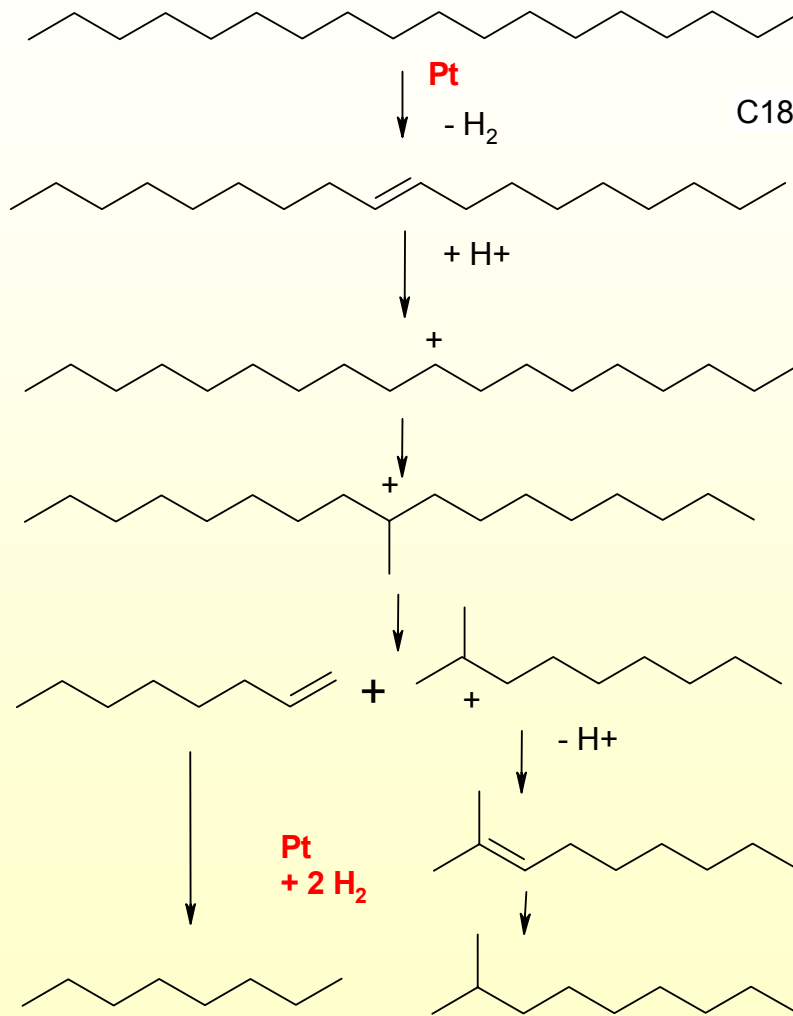
Hydrotreatment

Hydrocracking

Acidic Cracking

Thermal Cracking

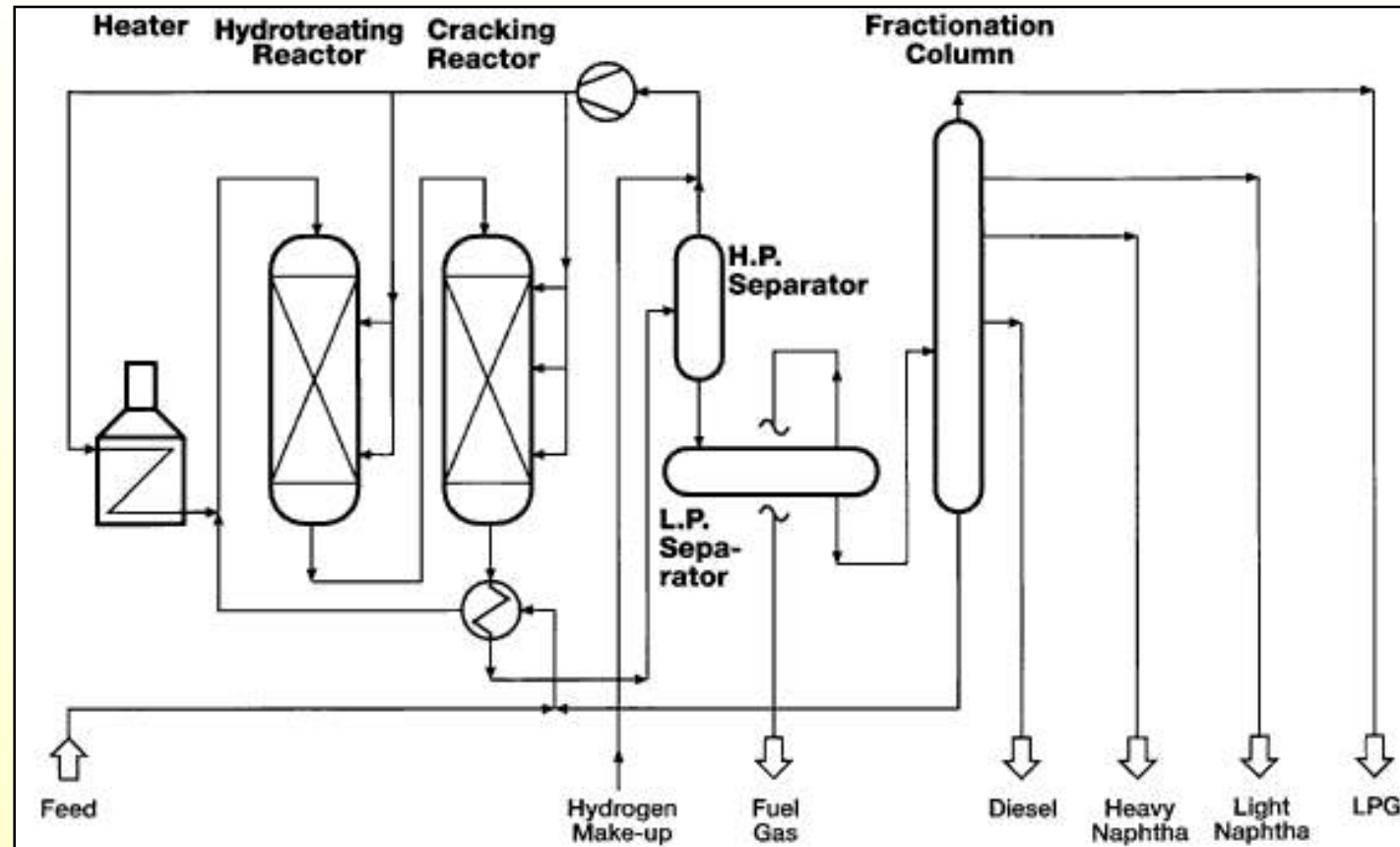
Chemistry of Hydrocracking



Bifunctional Catalyst

- Dehydrogenation/hydrogenation
- acidity

Flow Chart of Hydrocracking Unit (LURGI)



capacity:

more than 2 Mio. t/a

reaction conditions:

T = 370-430 °C; p = 160-180 bar (in dependence on feed and catalyst activity)

consumption of H₂:

2.9 – 3.9 wt. % of feed (depends on nature of feed)

HYDROCRACKER

RUHR OEL GMBH, Werk Scholven



2.1.1.5 Cracking of Oil Fractions

Hydrotreatment

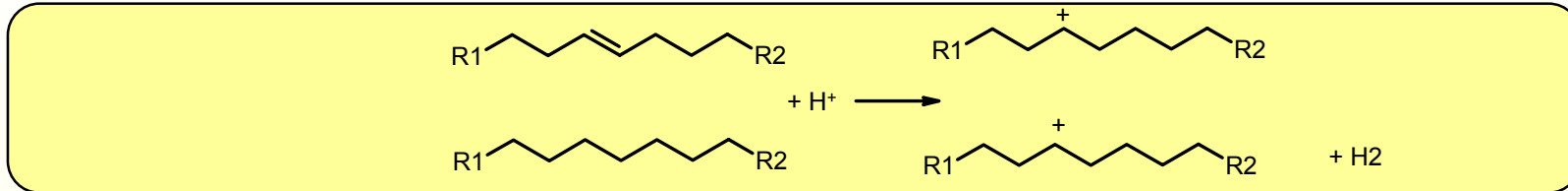
Hydrocracking

Acidic Cracking

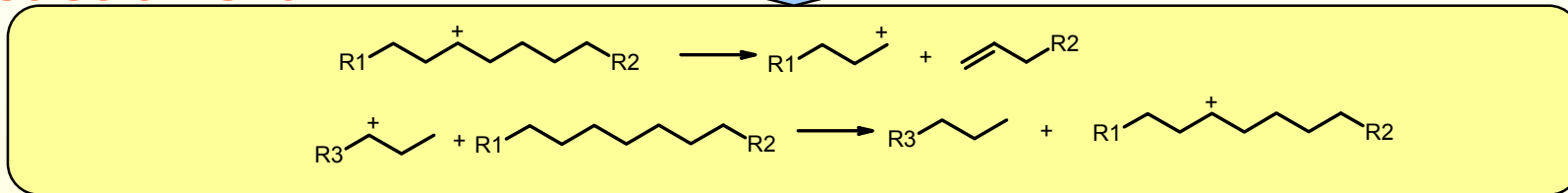
Thermal Cracking

Catalytic Cracking

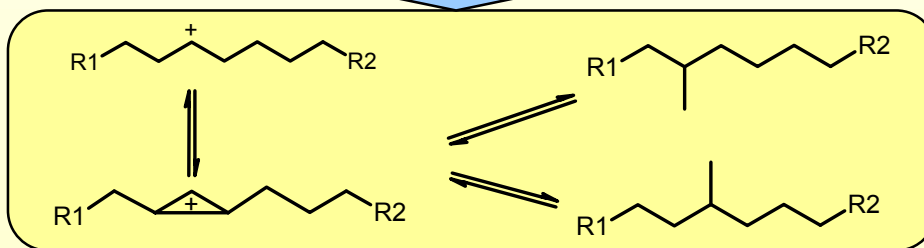
Start



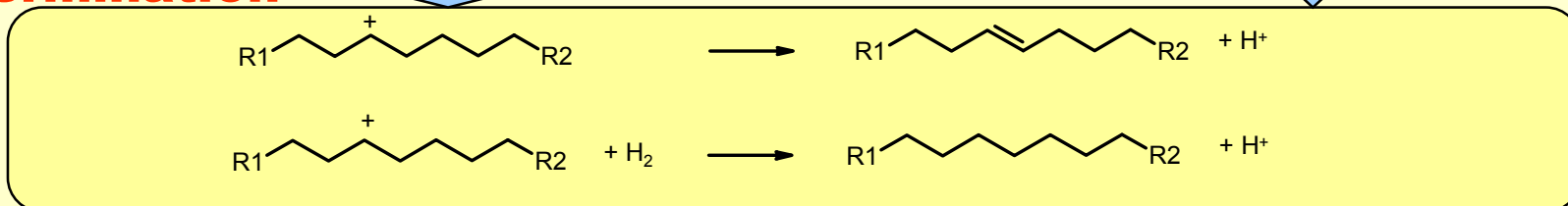
Reaction chain



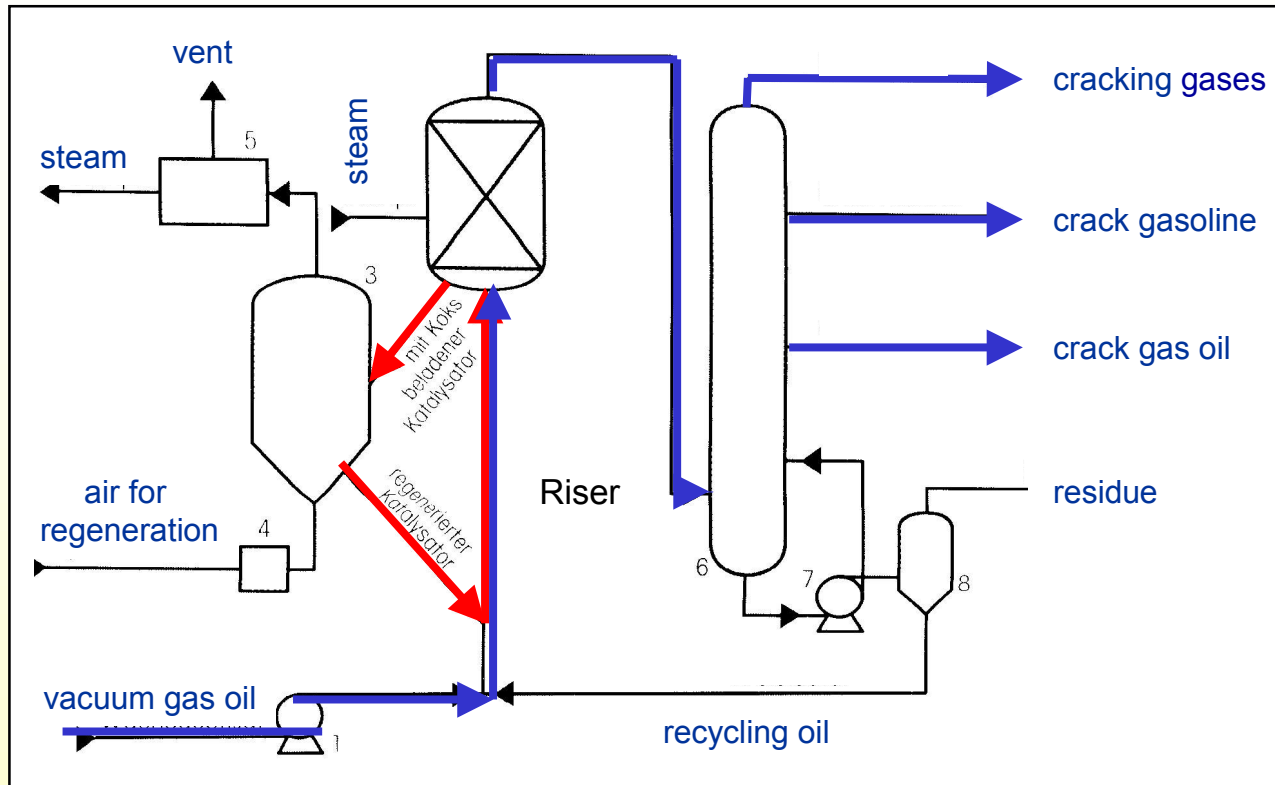
Isomerisation



Termination



Fluid Catalytic Cracking (FCC)



— catalyst cycle
— hydrocarbon path

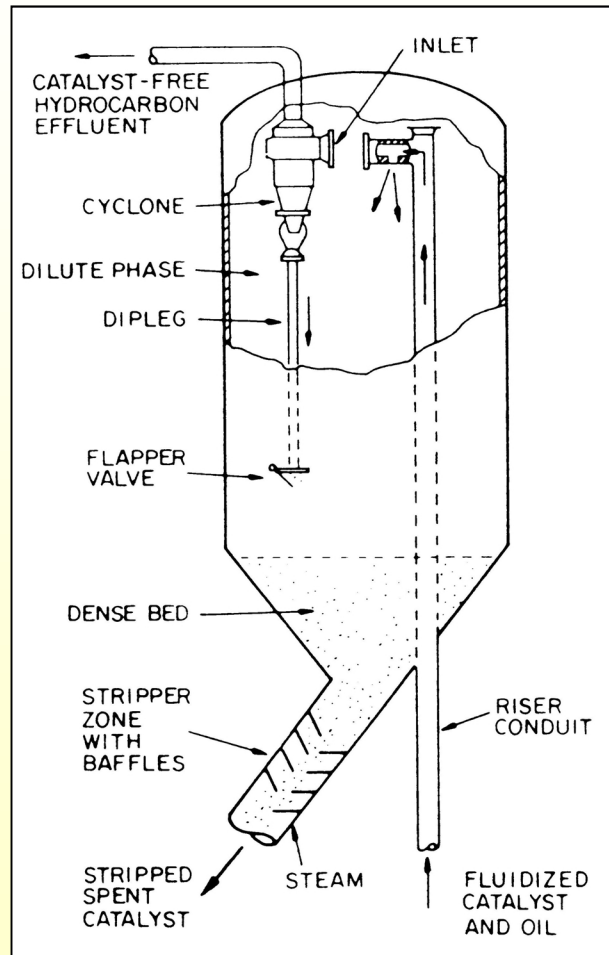
$T_{\text{vacuum gas oil}} = 300 - 450 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_{\text{catalyst}} = 650 - 750 \text{ } ^\circ\text{C}$

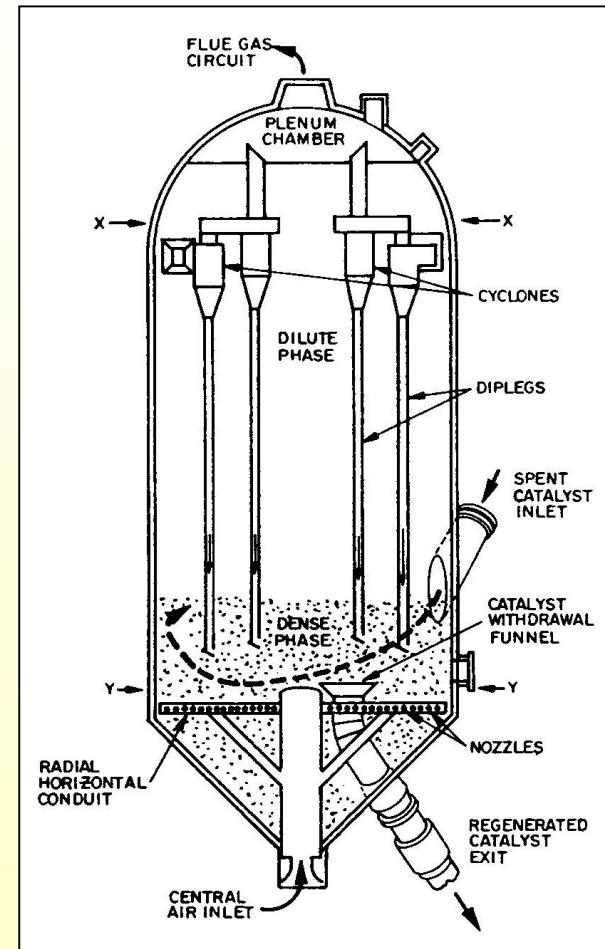
$\tau = 0.01 \dots 5 \text{ s}$

particle size: $\approx 70 \text{ } \mu\text{m}$

FCC Reactor and Regenerator

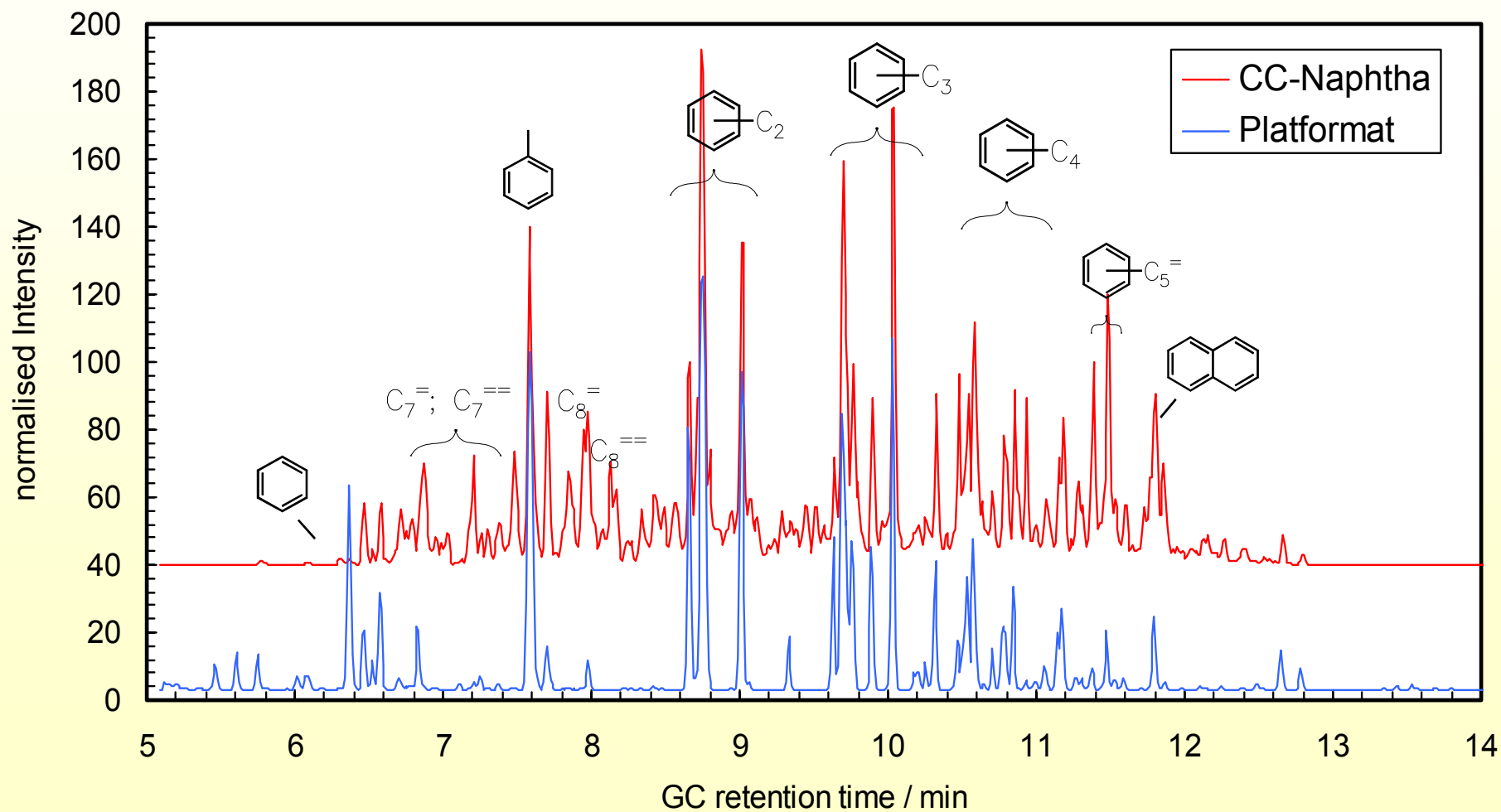


Reactor



Regenerator

Analysis of Reaction Products Platformat vs. Catalytic Cracking



2.1.1.5 Cracking of Oil Fractions

Hydrotreatment

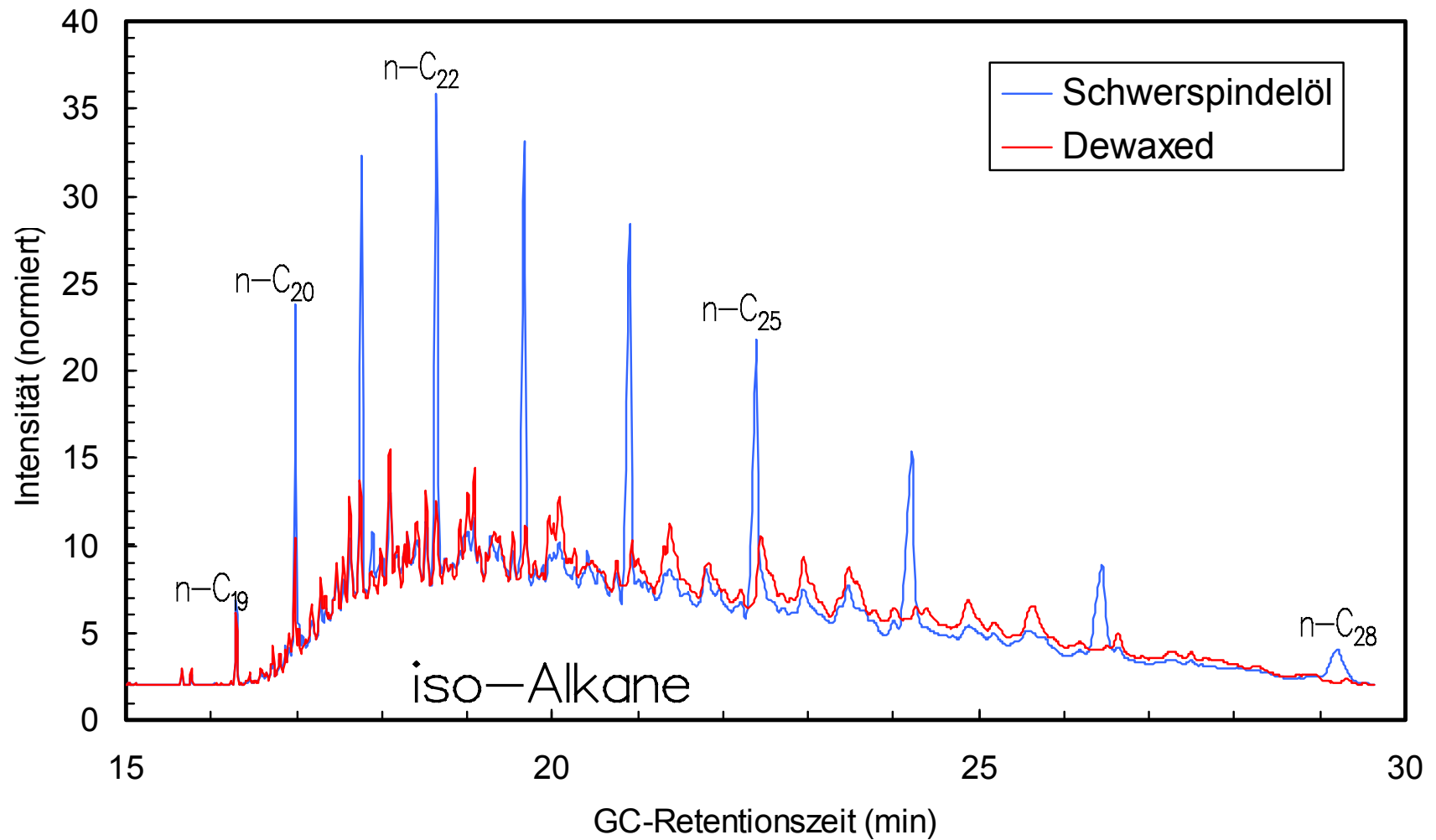
Hydrocracking

Acidic Cracking

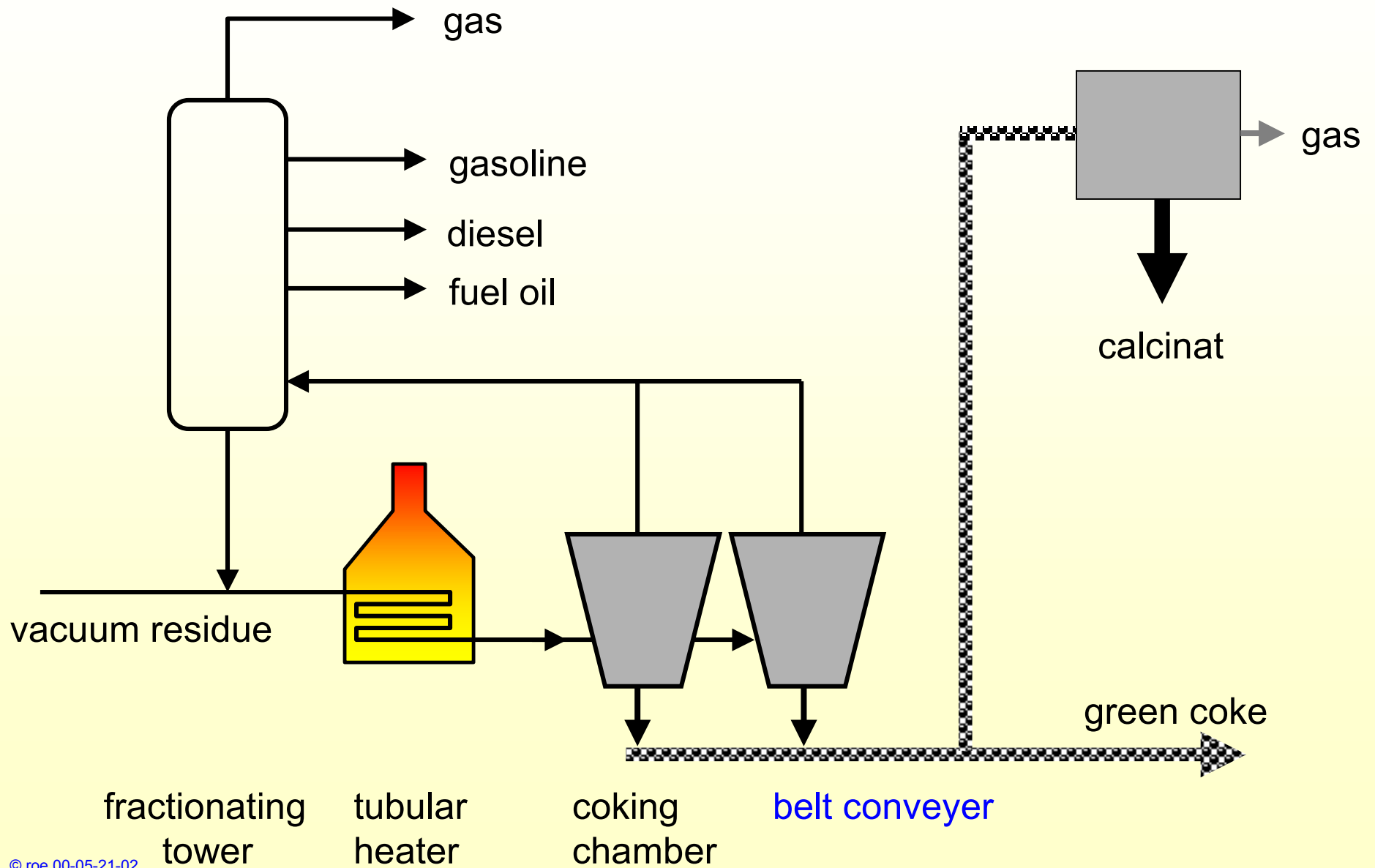
Thermal Cracking

Produkte aus dem Nordseeöl

Vergleich Schwerspindelöl - Dewaxed

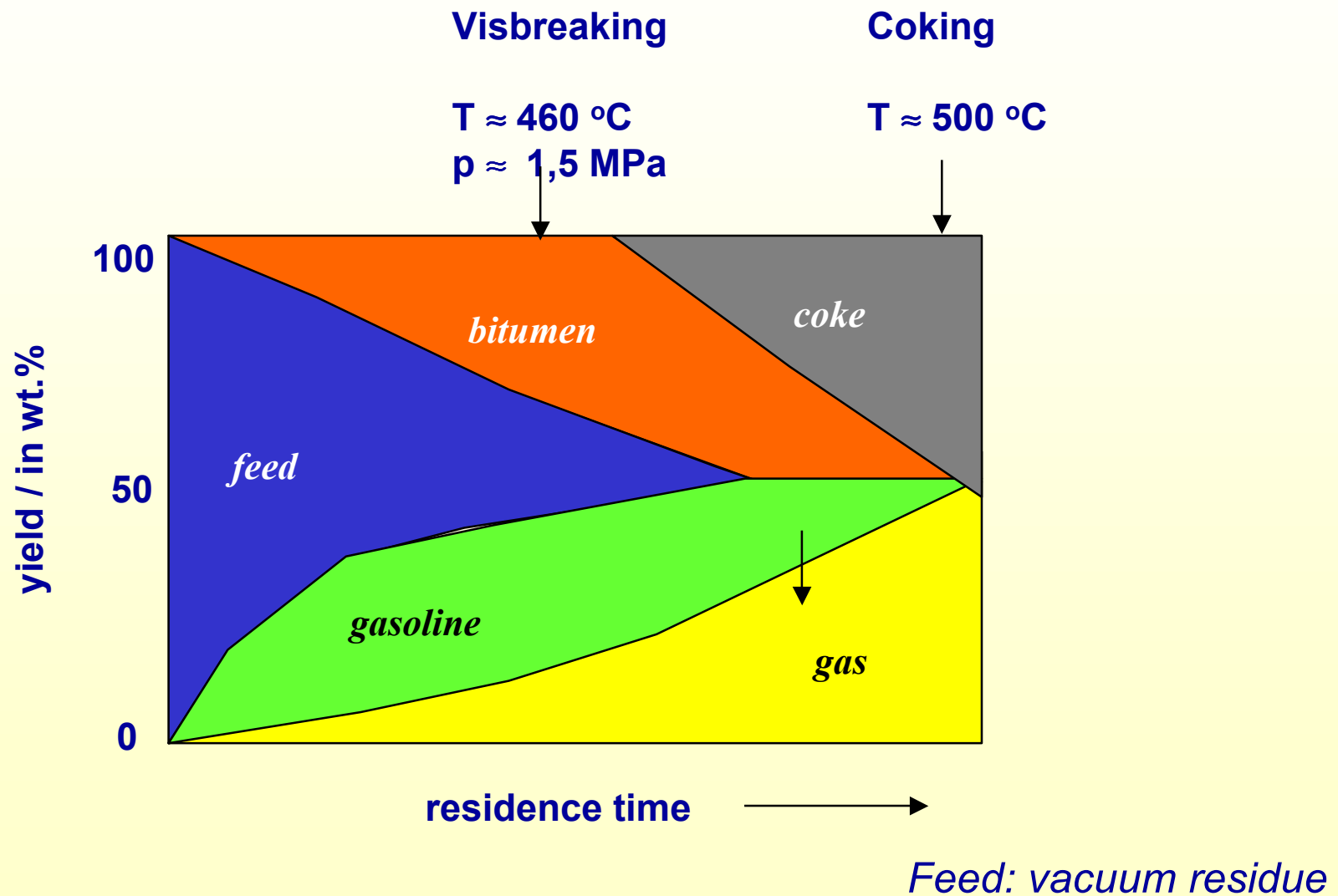


Delayed Coking



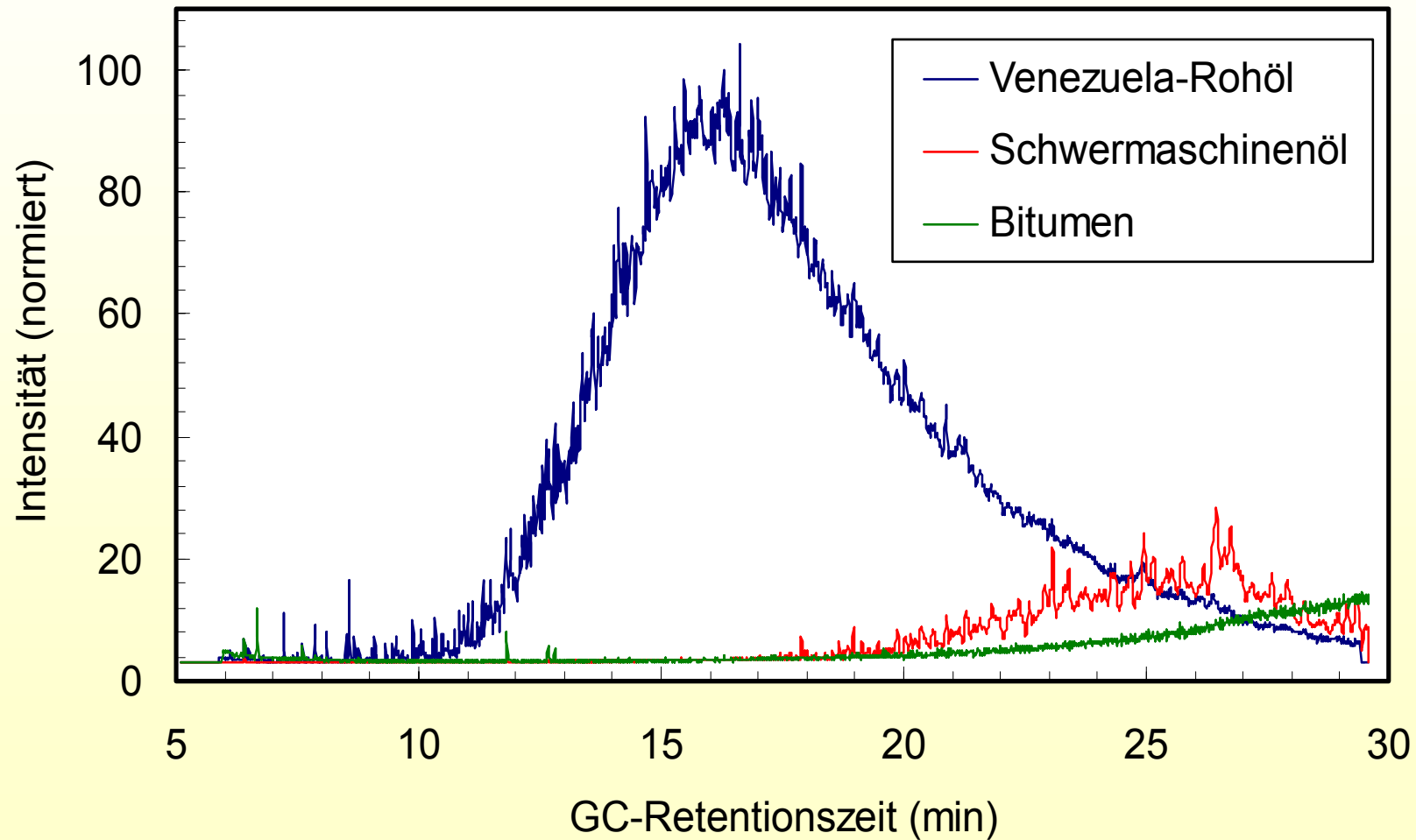
Thermal Cracking

Product Distribution in Dependence on the Residence Time



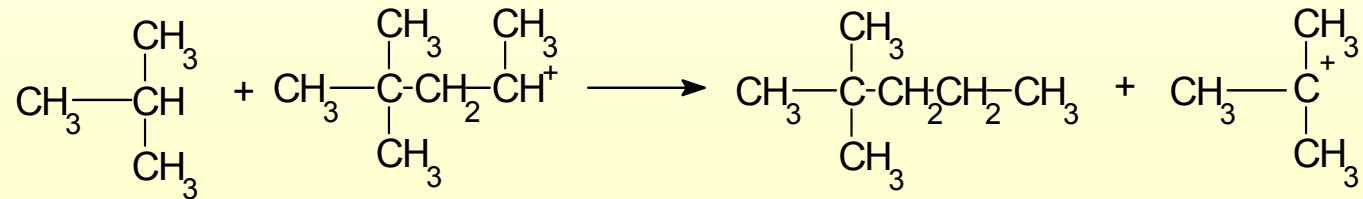
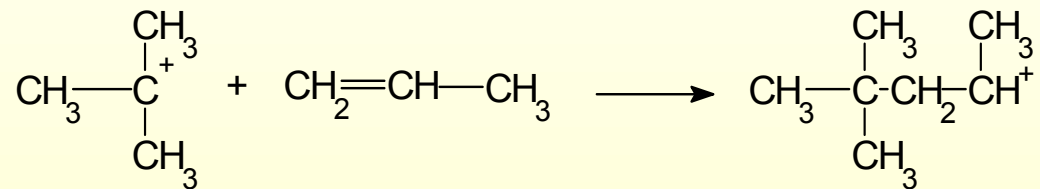
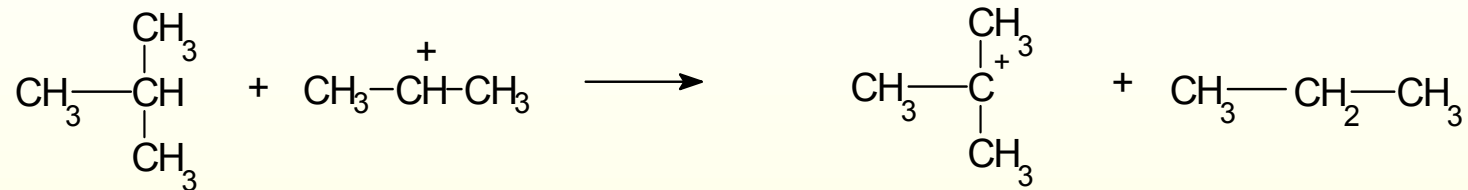
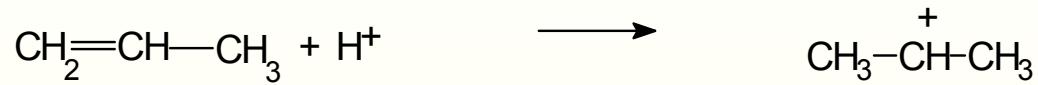
Produkte aus dem Venezuela Erdöl

Vergleich Rohöl, Schwerkmaschinenöl und Bitumen



2.1.1.6 Verarbeitung von Raffineriegasen

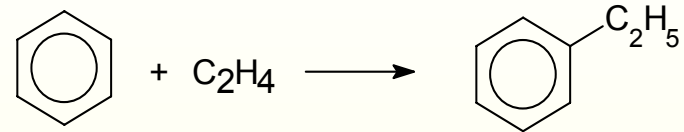
Alkylierung von Raffineriegasen



Katalysator: HF, H₂SO₄; T = 0 °C; p = 0,1 MPa

Alkylation of Aromatics

reaction

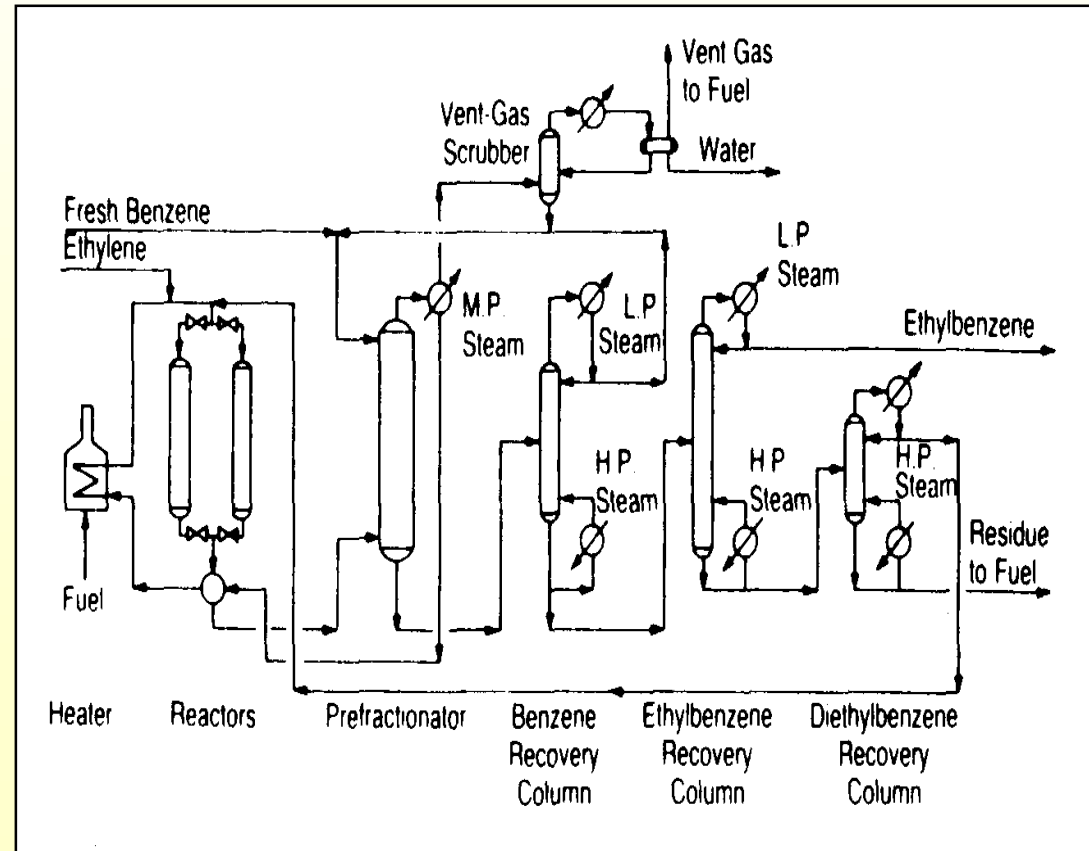


**Classical process
(bubble column)**

catalyst: $AlCl_3$
temperature: $80^\circ C$
B/C₂= : 3...4
pressure: 1 at

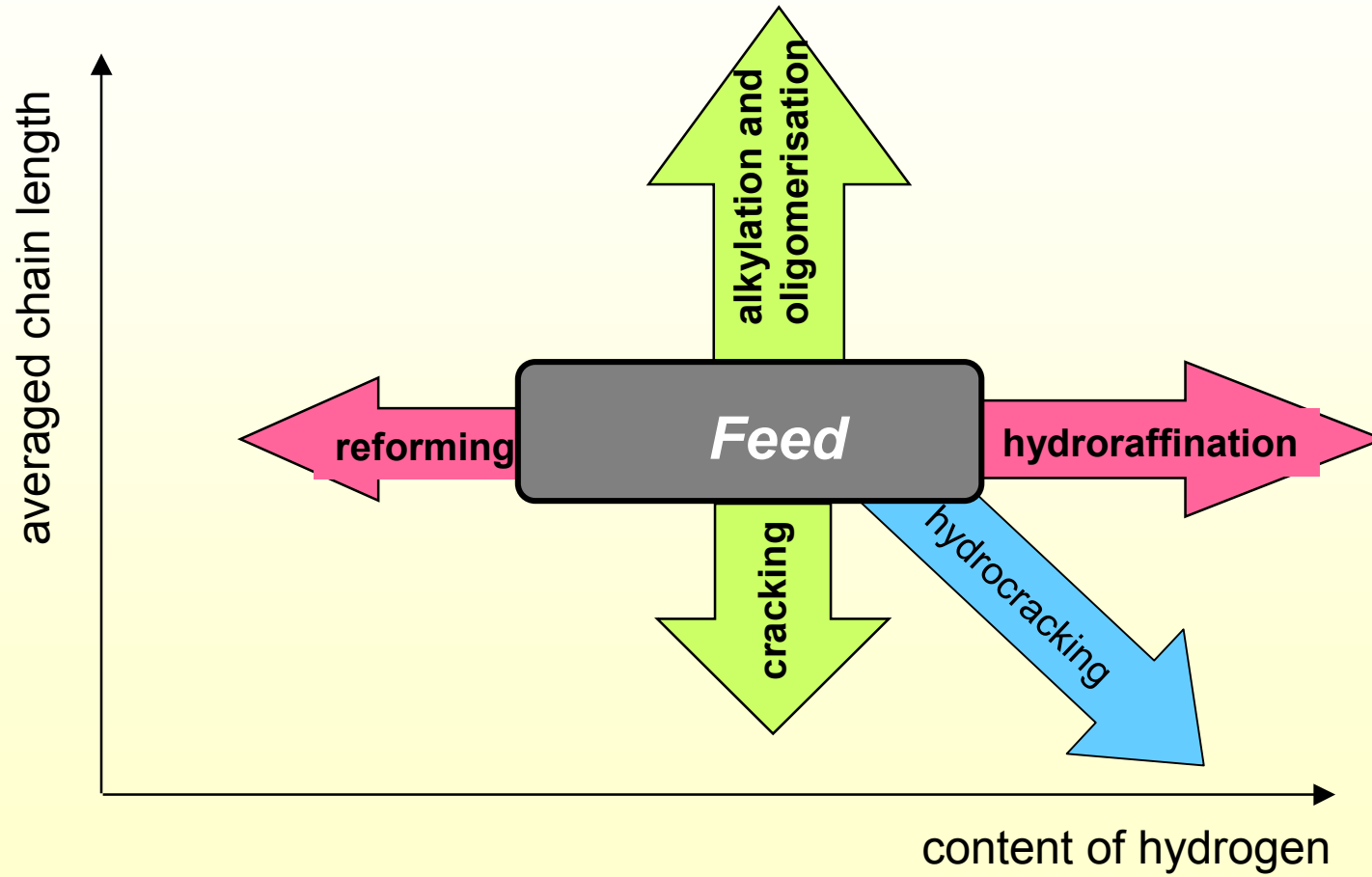
MOBIL-BADGER

catalyst: H-ZSM-5
temperature: $370^\circ C$
pressure: 14-27 at
cycle: 40 - 60 day
WHSV: 300 kg/kg*h
selectivity to EB 99.6 %

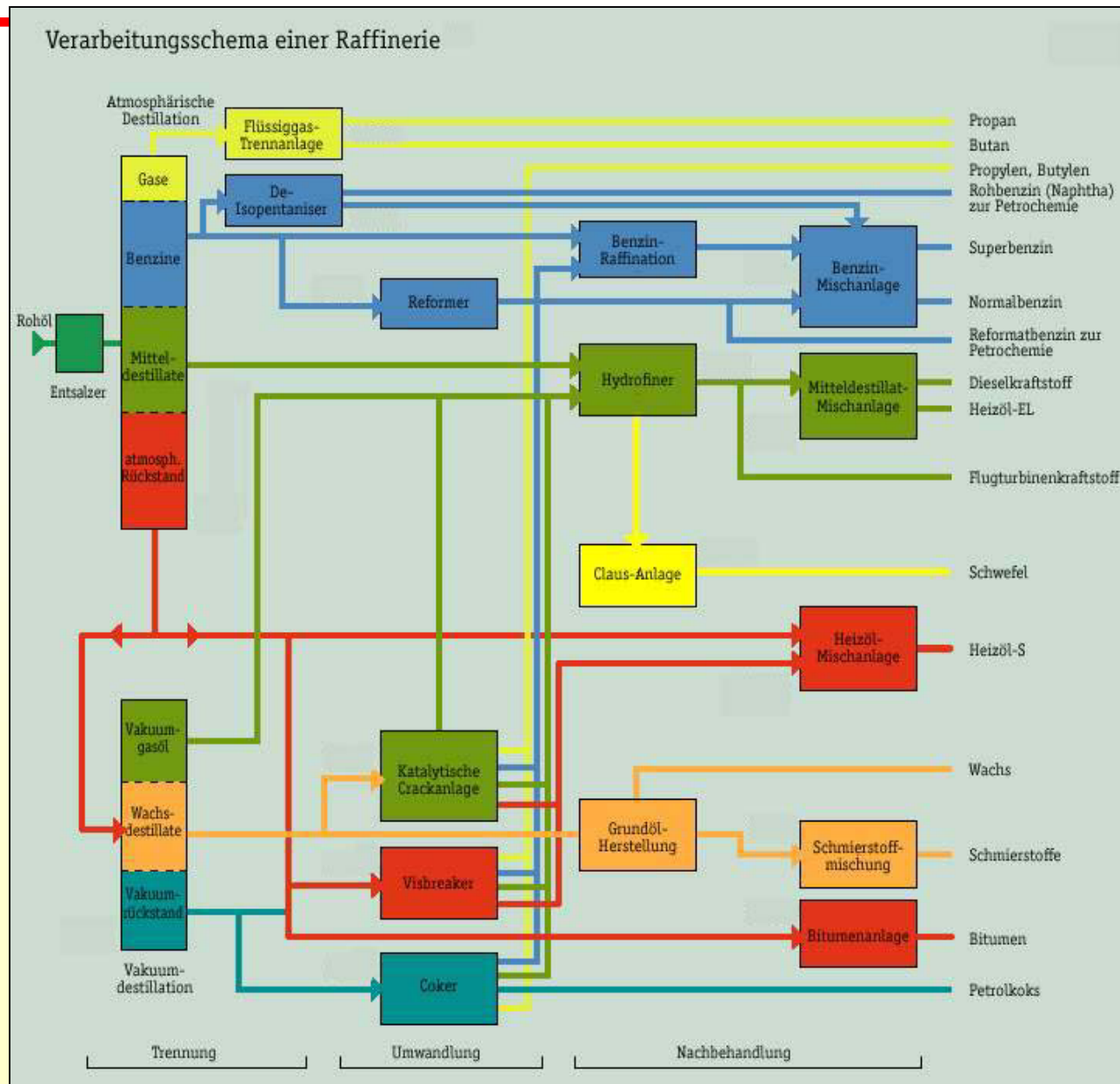


Zusammenfassung

Processes for Natural Oil Conversion



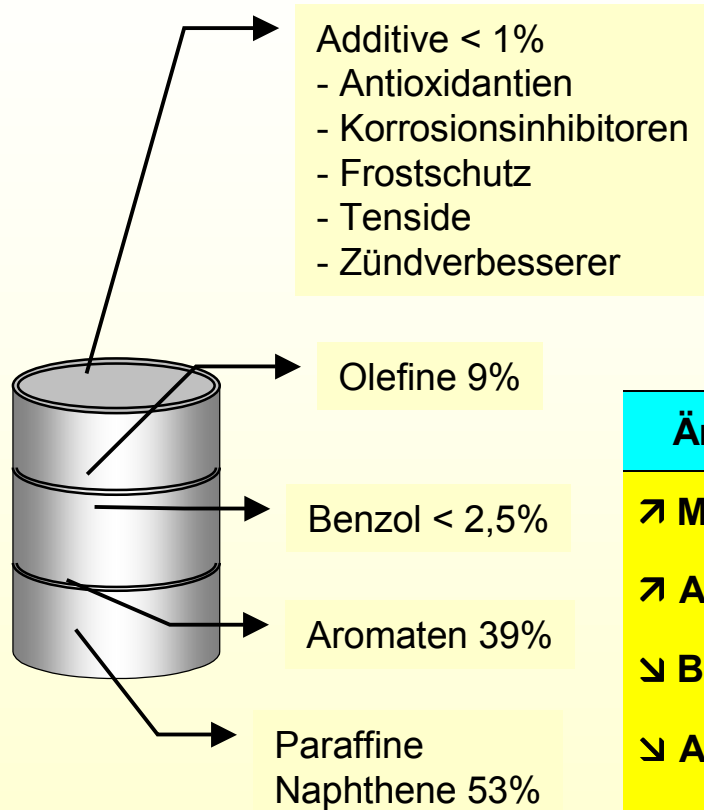
Schema einer Raffinerie



Overview over Different Processes for Conversion of Natural Oil

Process	Typical reactions	catalyst	T (°C)	P (bar)
Thermal cracking	gas oil \longrightarrow paraffins + olefins	--	450 – 600	20 - 40
catalytic cracking	gas oil \longrightarrow <i>i</i> -paraffins + olefins	a) amorphous alumosilicate b) zeolite	450 - 500	1 – 3
hydrocracking	gas oil + H ₂ \longrightarrow paraffins	a) Al ₂ O ₃ / SiO ₂ + Ni, W, Mo b) zeolites + Pd, Ni	320 – 420	100 – 200
reforming	Naphtha \longrightarrow aromatics + <i>i</i> -paraffins	a) Pt / Al ₂ O ₃ b) Pt / Re / Al ₂ O ₃	450 – 500	20 – 50
hydrogenation	S \longrightarrow H ₂ S olefin \longrightarrow paraffin	a) Co / Mo b) Ni, Pd	300 – 500	10 – 150
isomerisation	<i>n</i> -paraffin \longrightarrow <i>i</i> -paraffin	a) AlCl ₃ / Al ₂ O ₃ b) Pt / zeolite	25 – 500	10 - 30
alkylation	<i>i</i> -butane + olefin \longrightarrow <i>i</i> -paraffin	a) H ₂ SO ₄ b) HF	(-10) – 50	1 – 15
polymerisation (oligomerisation)	olefine \longrightarrow olefin-dimer	a) H ₃ PO ₄ b) Ni / AlR ₃	200 – 240	20 - 60

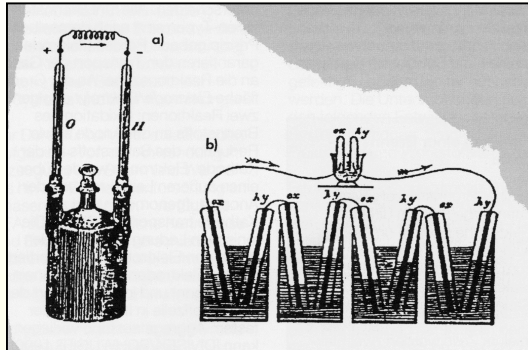
Wechselspiel Zusammensetzung - Abgas



Änderung	CO	NO _x	KW	Benzol	Aldehyde
↗ MTBE	↓↓	↑	↓	↓	↑
↗ Alkohol	↓↓	↑	↓	↓	↑↑
↘ Benzol				↓↓	
↘ Aromaten	↓	↑	↓	↓↓	↑↑
↘ Olefine		↓	↑		
↘ Schwefel	↓	↓	↓		?
Dampfdruck			↓		

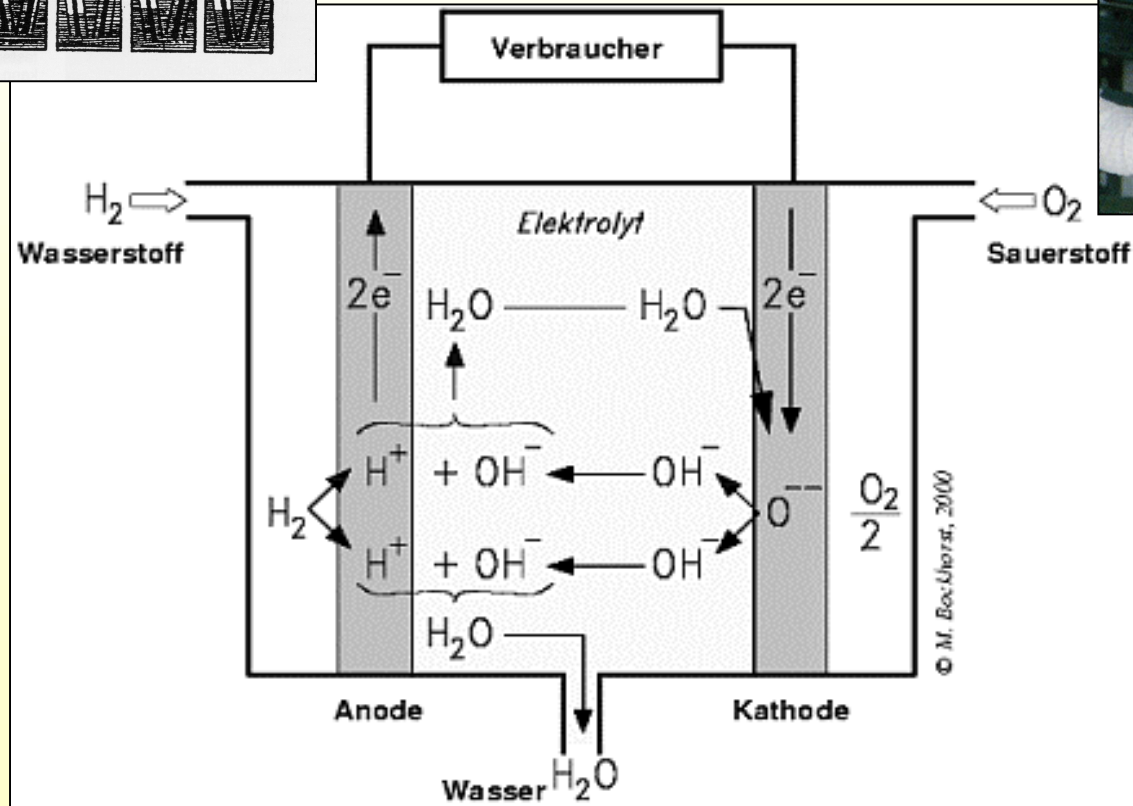
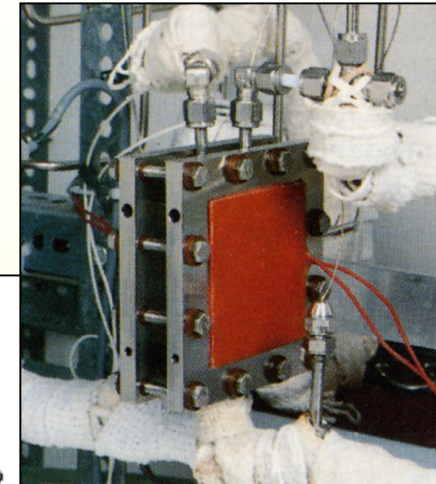
Outlook

Brennstoffzelle



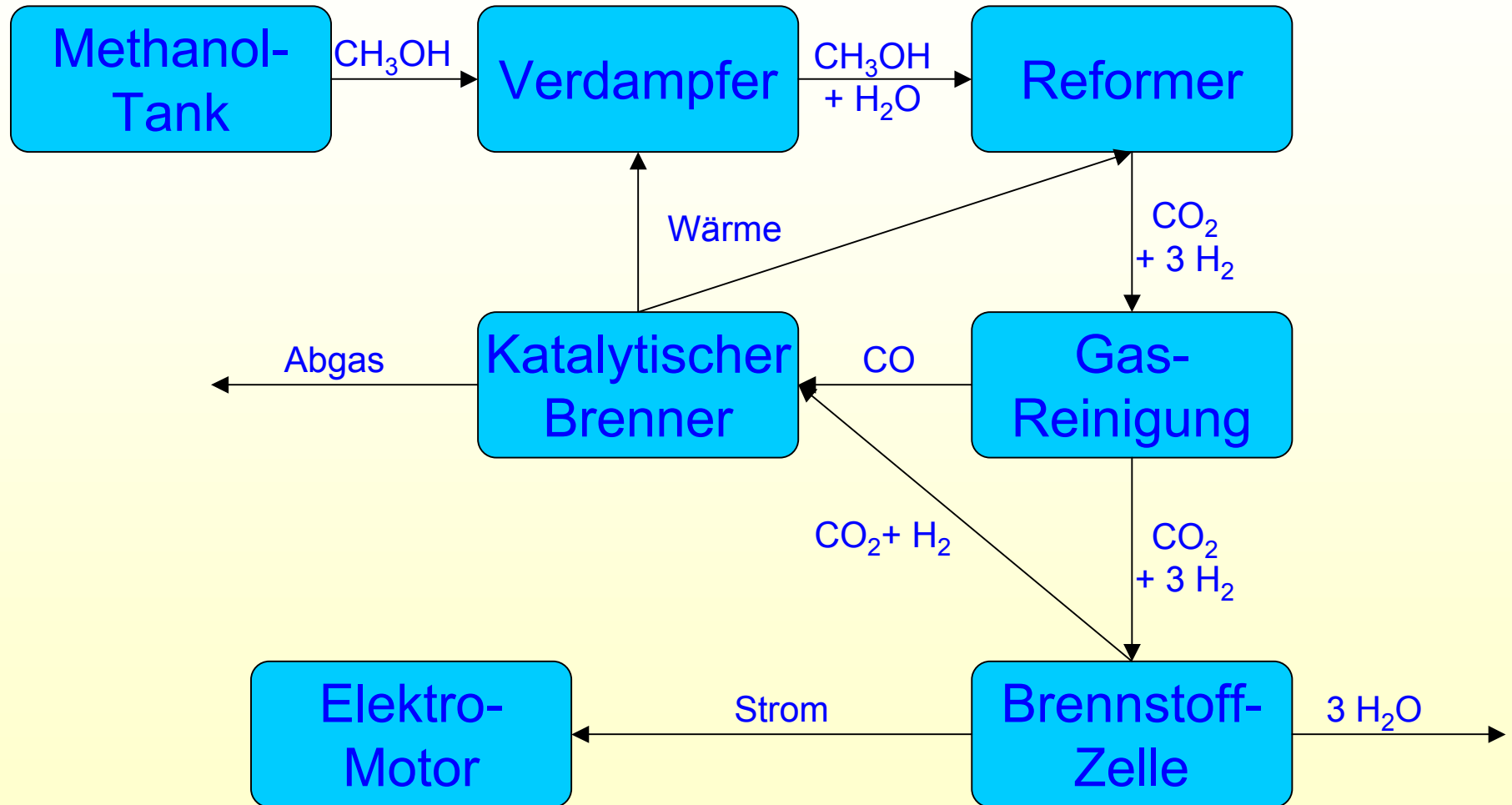
1839 Sir William Grove

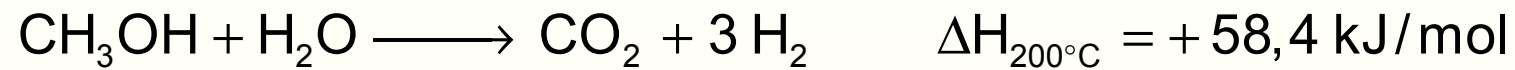
1995 Forschungszentrum Jülich



"Klassische" Brennstoffzelle mit Wasser als Elektrolyten

On-board Aufarbeitung von Methanol





Katalysator: Metalloxide,
Kupfer, Zink

Betriebstemperatur:
200 - 350°C

Hersteller des Katalysators:
BASF

Anforderungen: Flexibilität
bei Belastungswechsel,
mechanische Stabilität

Daimler-Chrysler:

NECAR4

Höchstgeschw.: 145 km/h, Reichw.: 450 km, Treibstoff: fl. Wasserstoff

NECAR5

Höchstgeschw.: 150 km/h, Treibstoff: Methanol

NEBUS

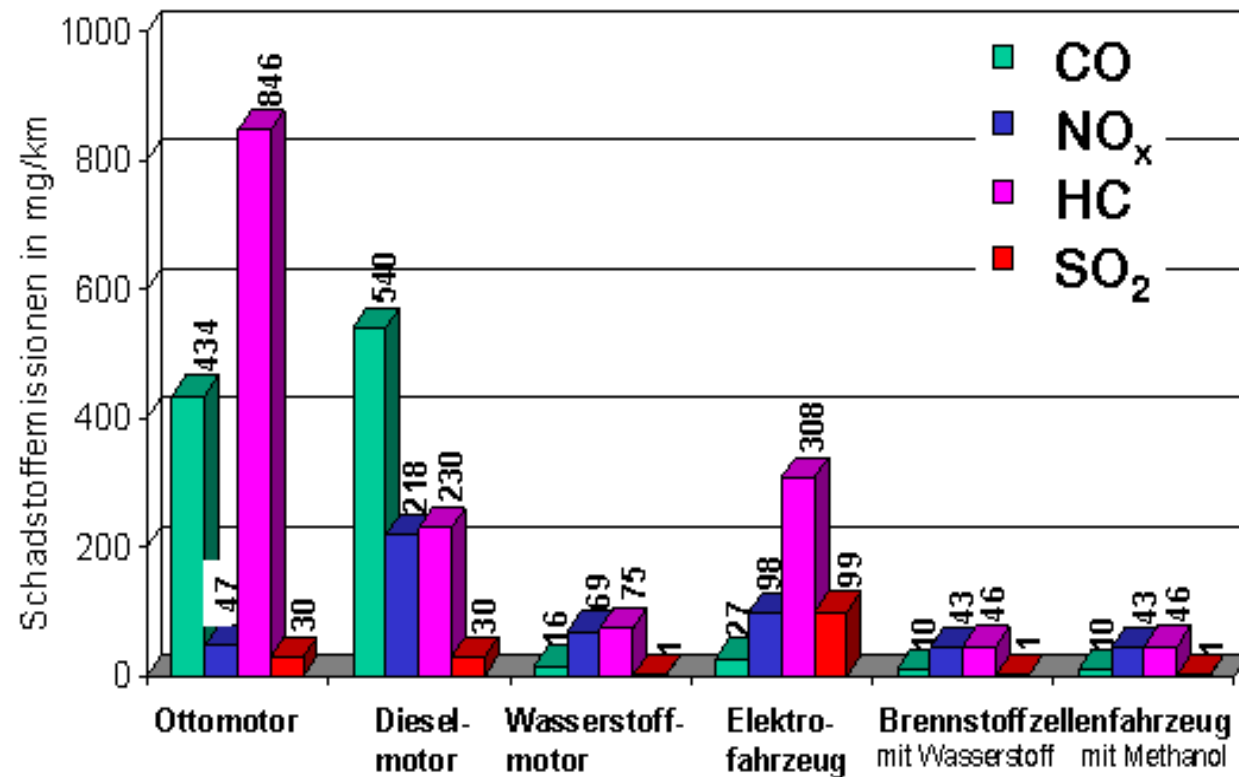
Höchstgeschw.: 80 km/h, Reichw.: 250 km, Treibstoff: Wasserstoff

Gokart

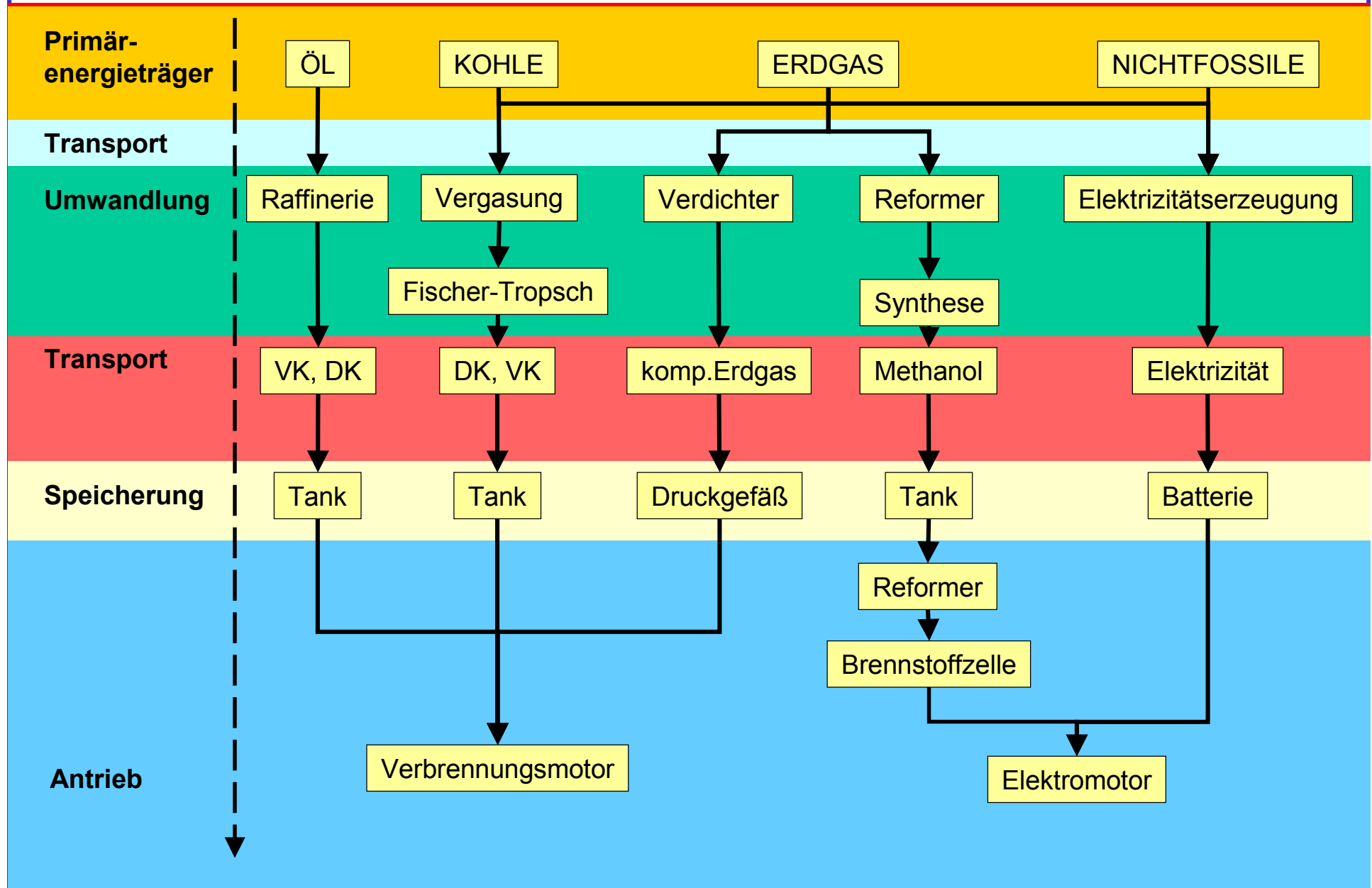
Höchstgeschw.: 35 km/h, Reichw.: 15 km, Treibstoff: Methanol (direkt)

Toyota, VW, General Motors usw. arbeiten an ähnlichen
Antriebskonzepten

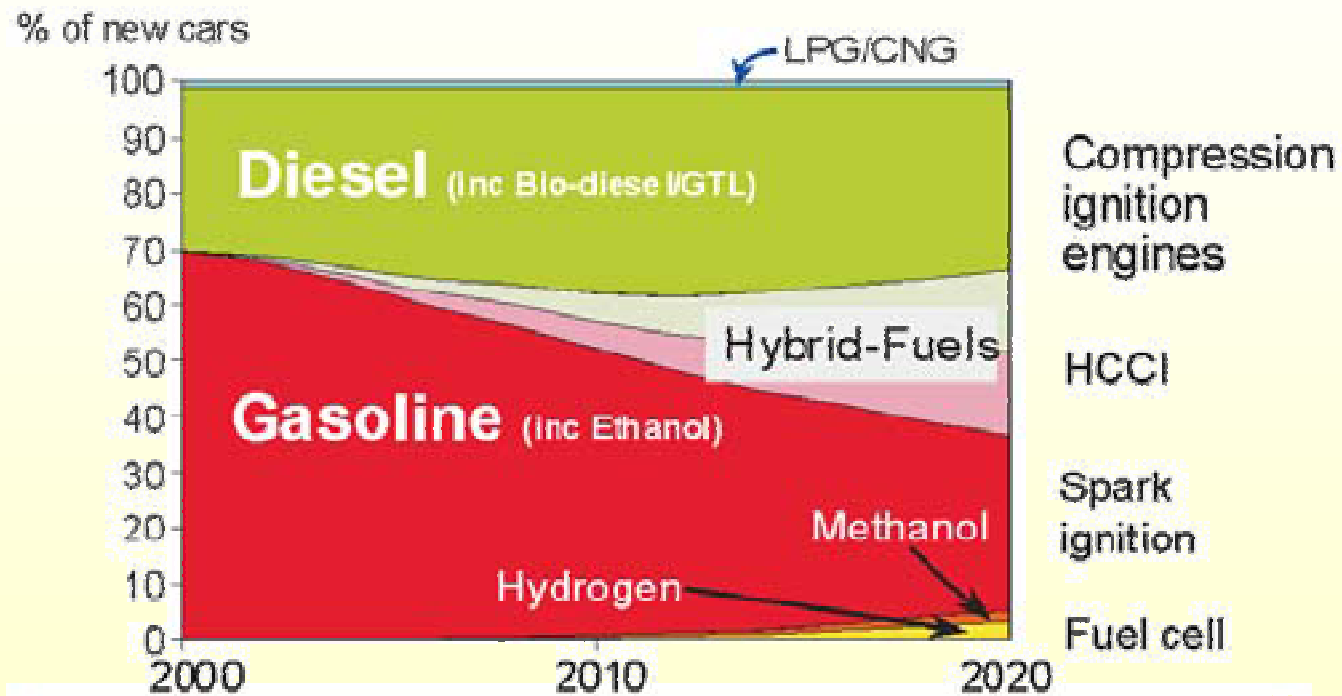
Schadstoffemissionen für verschiedene Antriebskonzepte



Energieumwandlungsketten für den Verkehr



Conventional Liquid Fuels will Continue to Dominate the Future Market for a Long Time



Biodiesel



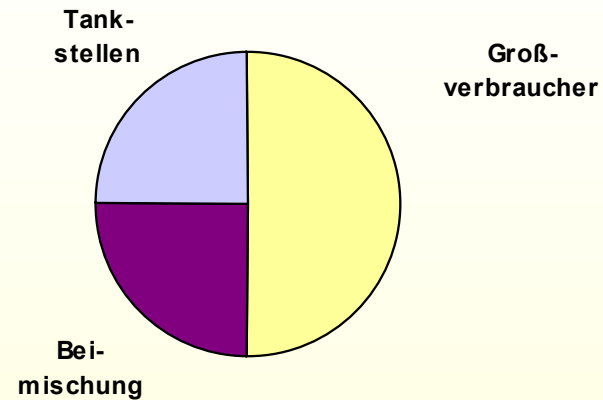
1 ha Raps - 1500 L Biodiesel

2004

D	1,2 Mio t
F	0,52 Mio t
I	0,37 Mio t
E	0,12 Mio t

D: 1800 Tankstellen für ca. 300000 PKW

Verbrauchsstruktur

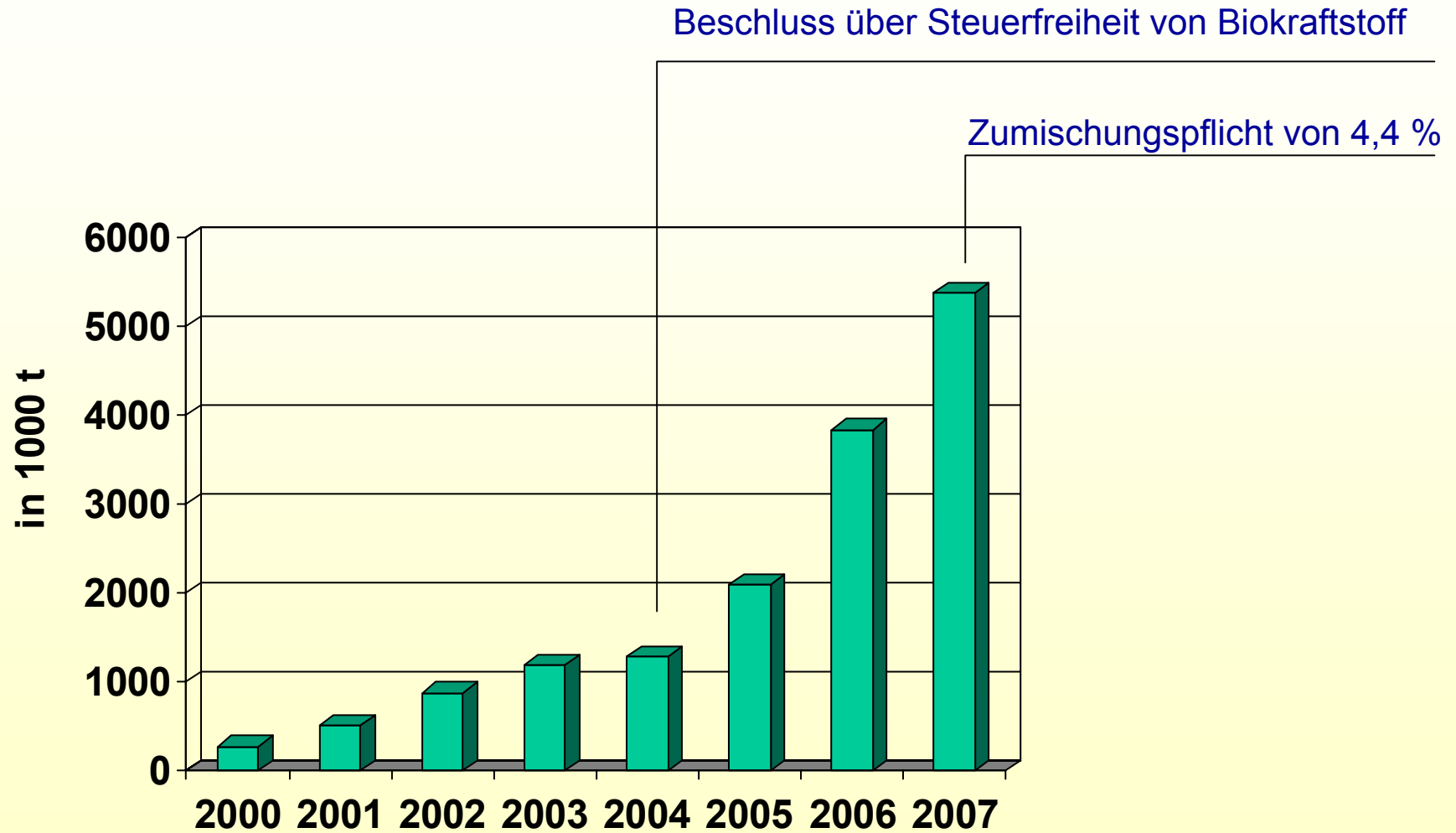


Maximaler Zusatz:

DK (EN 590) - max.	5 Vol.% FAME
VK (EN 228) - max.	5 Vol.% Ethanol
VK (EN 228) - max.	15 Vol.% Ether

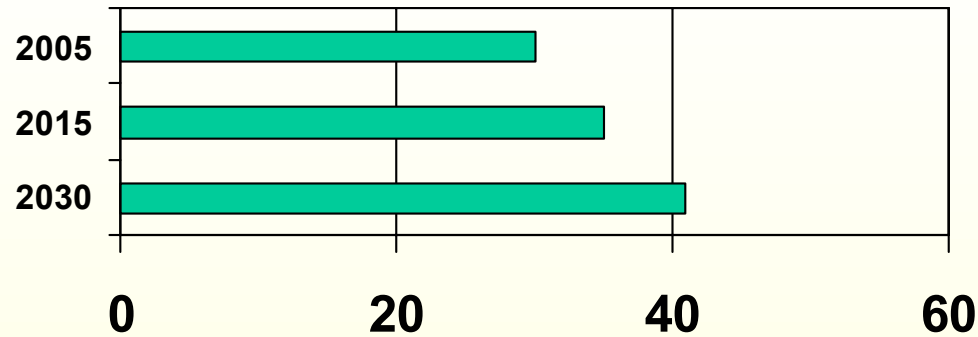
FAME - Fatty Acid Methyl Ester
RME - Rapsölmethylester

Produktionskapazitäten für Biokraftstoffe in Deutschland



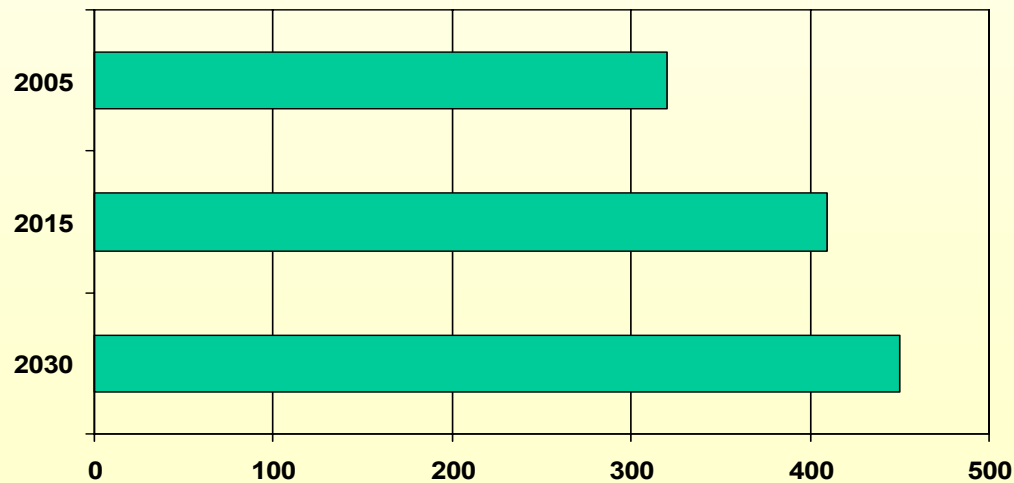
Renewable Resources Biofuels

world wide demand on oil / bill. barrel



**30 % of the agriculture area
to satisfy 10 % of oil demand !**

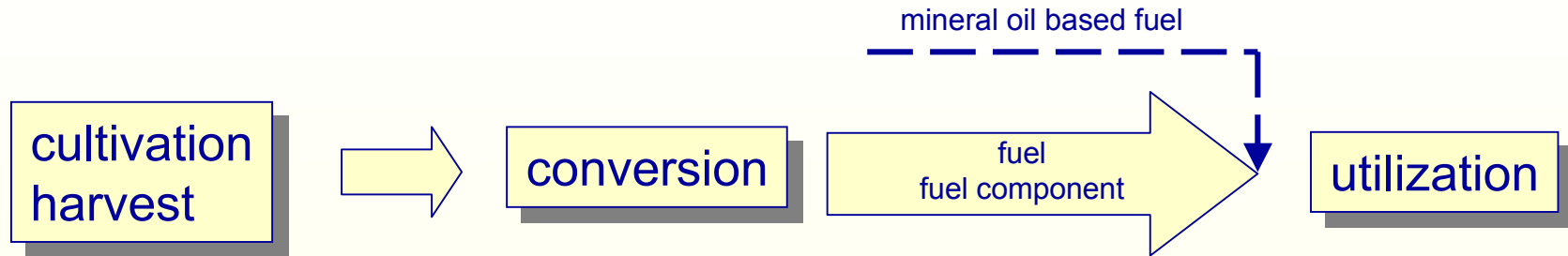
demand on agriculture area / mio ha



Strategy:

- improvement of technology
- innovation in protection of plants
- increase of oil in rape-seeds
up to 45 %

First Generation of Biofuels



vegetable oils rape sun flower <i>jatropha curcas</i>	trans-esterification	Fatty Acid Methyl Ester	diesel engine
----------------------------------------------------------------	----------------------	-------------------------	---------------

Carbohydrates sugar starch	fermentation saccarification	C_2H_5OH	petrol engine
----------------------------------	---------------------------------	------------	---------------

esterification	Ethy-tert-Butyl-Ether	petrol engine
----------------	-----------------------	---------------

Jeder Anfang ist Schwer

Donnerstag, den 25. April 1996

NORDWEST/BREMEN

NORDWEST-ZEITUNG

Leer gibt mit Biodiesel Vollgas

Erste deutsche Großanlage in Betrieb genommen – Funke erkennt eine neue Dimension

Der umweltfreundliche Treibstoff ist allerdings nur konkurrenzfähig, weil er steuerbefreit ist. Die Grünen sprechen von Fehlinvestition.

Von Thomas Haselier

Leer/Oldenburg. 80 000 Tonnen Biodiesel jährlich oder 270 000 Liter täglich produziert die erste deutsche Großanlage, die gestern im ostfriesischen Leer in Betrieb genommen worden ist. Den Startknopf drückte Niedersachsens Landwirtschaftsminister Karl-Heinz Funke (SPD). Das Land hatte die rund 20 Millionen DM teure

Anlage mit einer Million DM unterstützt und zugleich 3,6 Millionen DM Fördermittel aus der Europäischen Union losgeeist. Funke bezeichnete die Biodieselanlage als richtungweisend für die Zukunft. Der Geschäftsführer der Oelmühle Leer Connemann, Dr. Joosten Connemann, wies ein kritisches Gutachten der Universität Oldenburg, das Probleme mit Keimbildung und Lagerfähigkeit von Biodiesel nicht ausschließt, als realitätsfremd zurück.

Funke erklärte, mit ihrem Förderkonzept habe die Landesregierung maßgeblich zur Entwicklung von nachwachsenden Rohstoffen beigetragen und bundesweit Signale gesetzt. Die Biodiesel-Produktionsanlage Leer sei in ih-

rer Dimension einmalig in Europa, weitere neue Entwicklungen seien bereits in Arbeit.

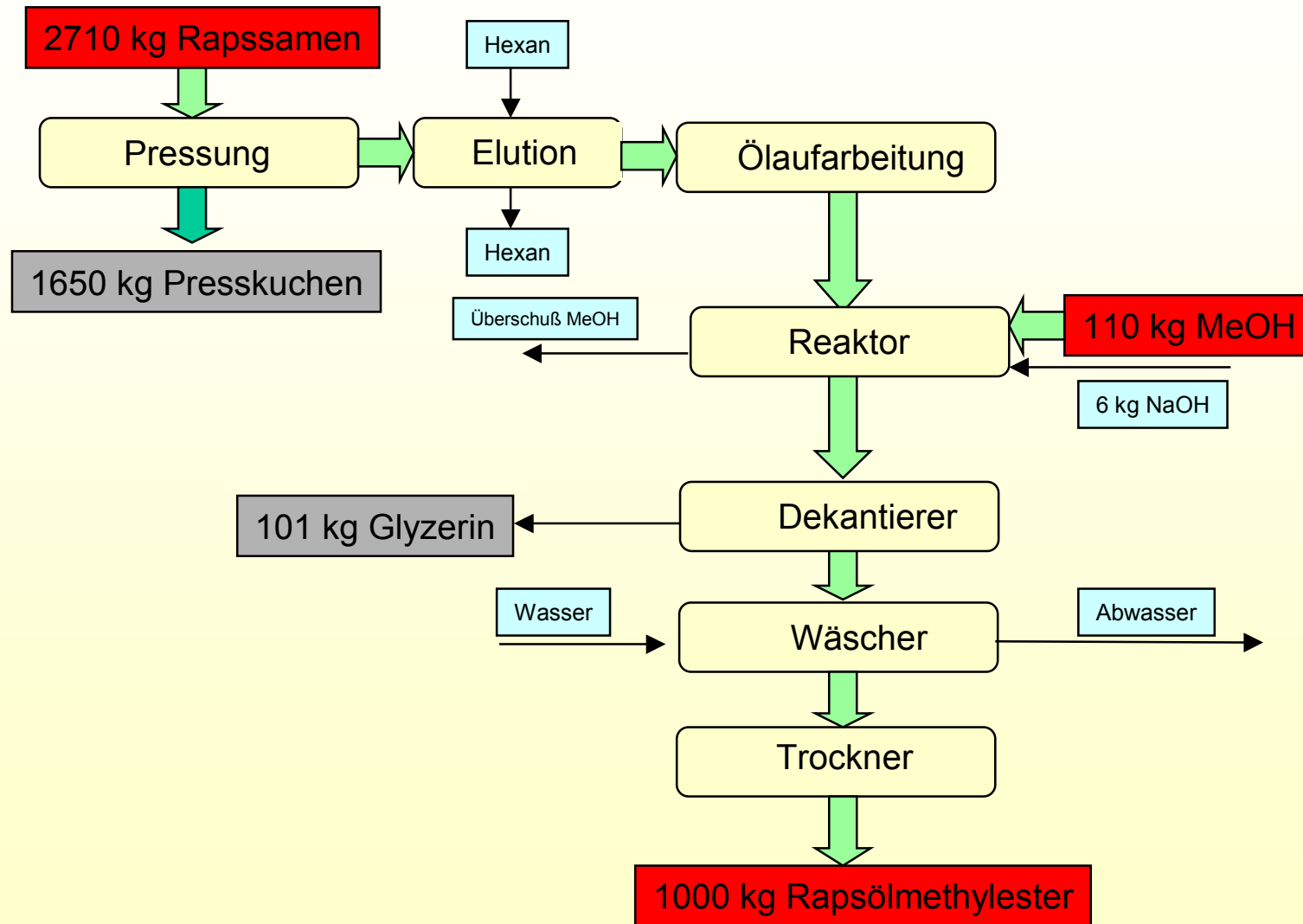
Der aus Raps gewonnene Biodiesel werde zukünftig eine immer größere Bedeutung erhalten, zeigte sich Joosten Connemann von der Richtigkeit der Investition überzeugt. Biodiesel sei umweltfreundlicher als herkömmlicher Diesel, er sei fast völlig schwefelfrei, halbiere die Ruß-Emissionen und setze bei der Verbrennung nur soviel Kohlendioxid frei, wie die Pflanze beim Wachstum aufgenommen habe. Darüber hinaus sei Biodiesel biologisch leicht abbaubar und gefährde bei Unfällen nicht Boden und Grundwasser.

Konkurrenzfähig ist der

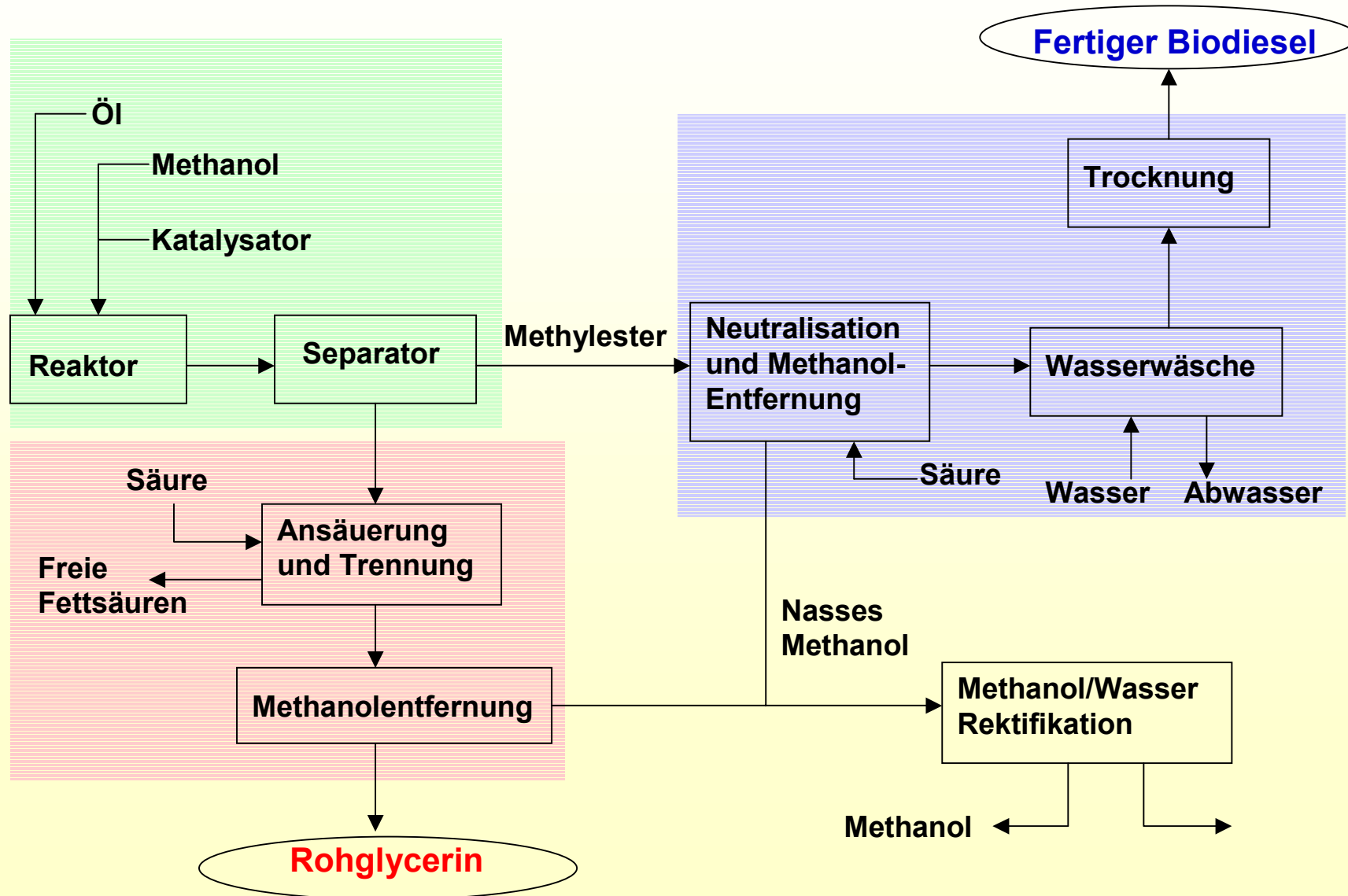
Treibstoff allerdings nur, weil er steuerbefreit ist. Probleme bereitet auch noch die allgemeine Verfügbarkeit. In ganz Deutschland gibt es nur 400 Zapfsäulen, weitere 100 sollen in diesem Jahr folgen.

Von einer Fehlinvestition sprachen gestern die niedersächsischen Grünen. Der Anbau von Raps zur Produktion von Biodiesel schaffe keine langfristigen Anbauperspektiven für die Landwirtschaft. Er lohne sich nur wegen der staatlichen Flächenprämien. Die „relativ geringen Umweltvorteile“ würden mit der Steuerbefreiung teuer erkauft, der Ersatz von fünf Prozent des normalen Dieserverbrauchs führe zu einer jährlichen staatlichen Mindereinnahme von einer Milliarde DM.

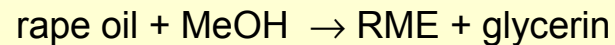
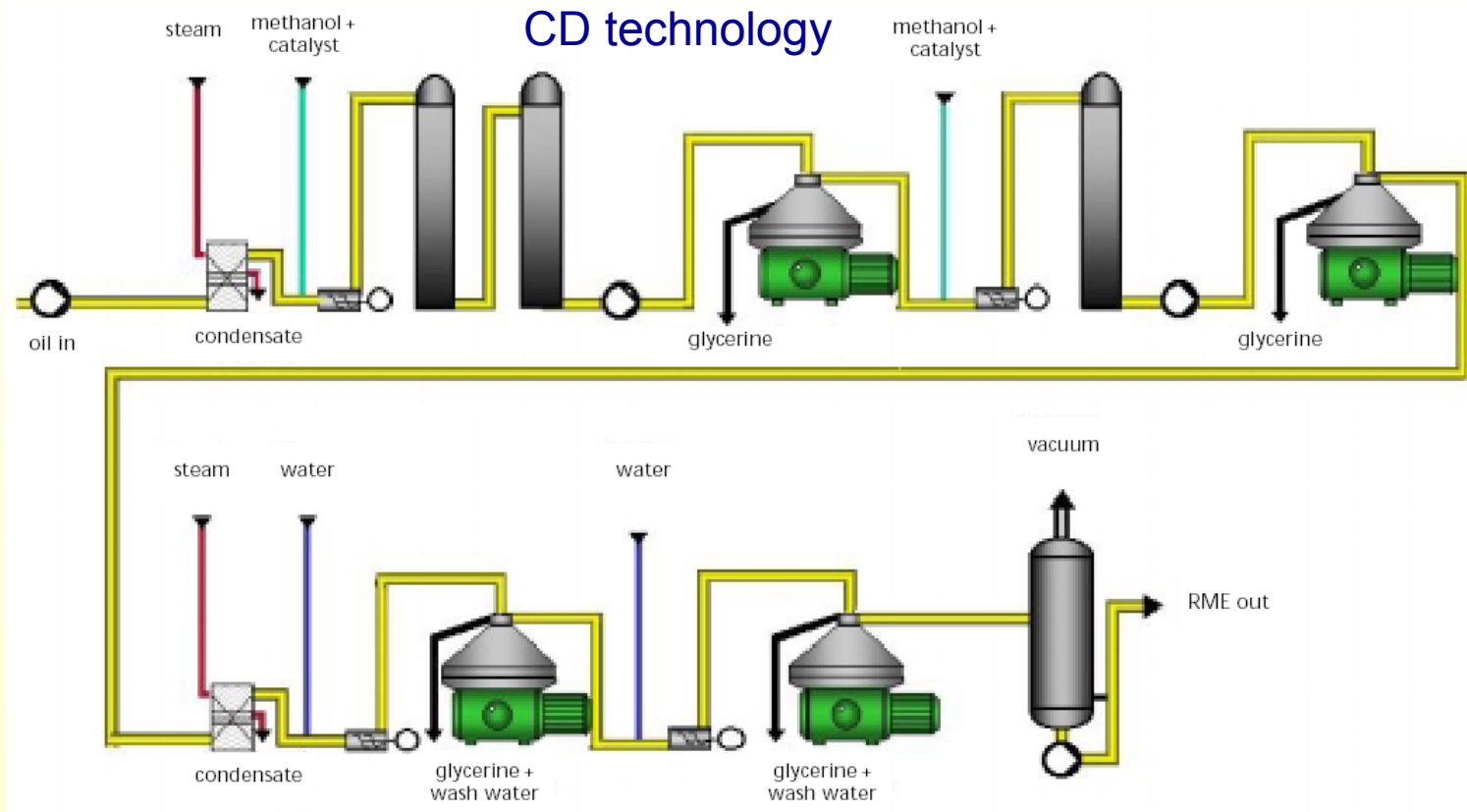
Materialbilanz für RME-Herstellung



Produktaufarbeitung



Production of Biodiesel

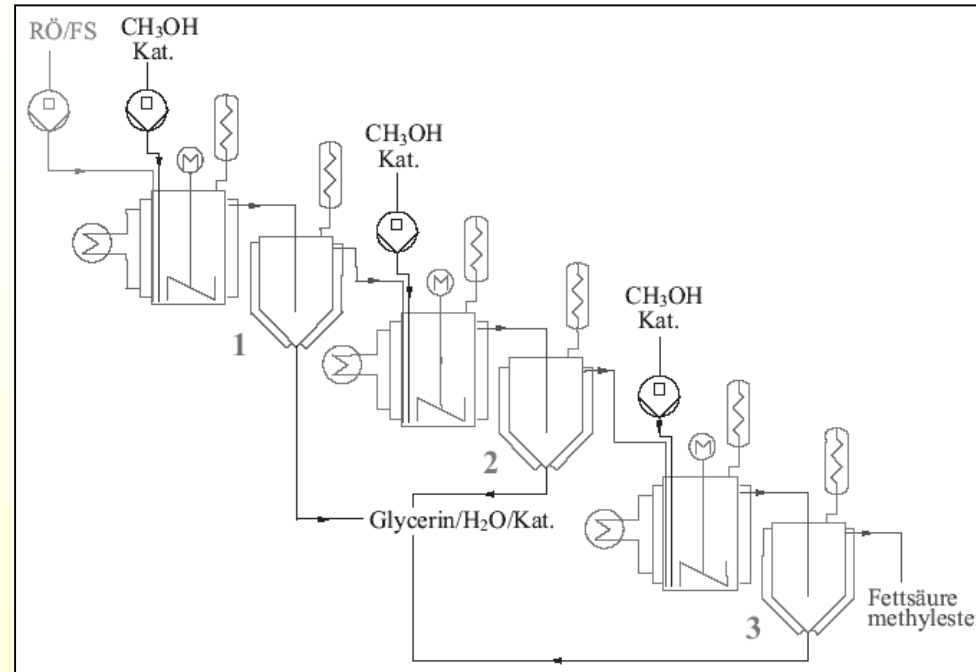


catalyst: NaOH / KOH anhydrous

pressure: $p = 1 \text{ at}$, $T = 60^\circ\text{C}$ excess of methanol

advantage: no waste products **disadvantage:** loss of catalyst caused by soap formation
feed must be free of fatty acids

Multifeedstock Process



series of CSTR with intermediate separation of glycerine

catalyst: *p*-toluene-sulfonic acid

$T = 80^{\circ}\text{C}$

$X > 95\%$

advantage: usage of water containing feed,
processing of used fats

Probleme der Subventionen

EUROPA

Scharfe Kritik der OECD an EU-Nachfrage nach Biokraftstoffen

Die Unterstützung der Regierungen für Biokraftstoffe werde Lebensmittelknappheit verursachen und zur Zerstörung natürlicher Lebensräume führen – aber nur wenig Einfluss auf den Klimawandel haben. Davor hat die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung gewarnt und den EU-Plänen, bis 2020 10 % des Kraftstoffs für den Verkehrssektor von Pflanzen zu gewinnen, damit einen Schlag versetzt.

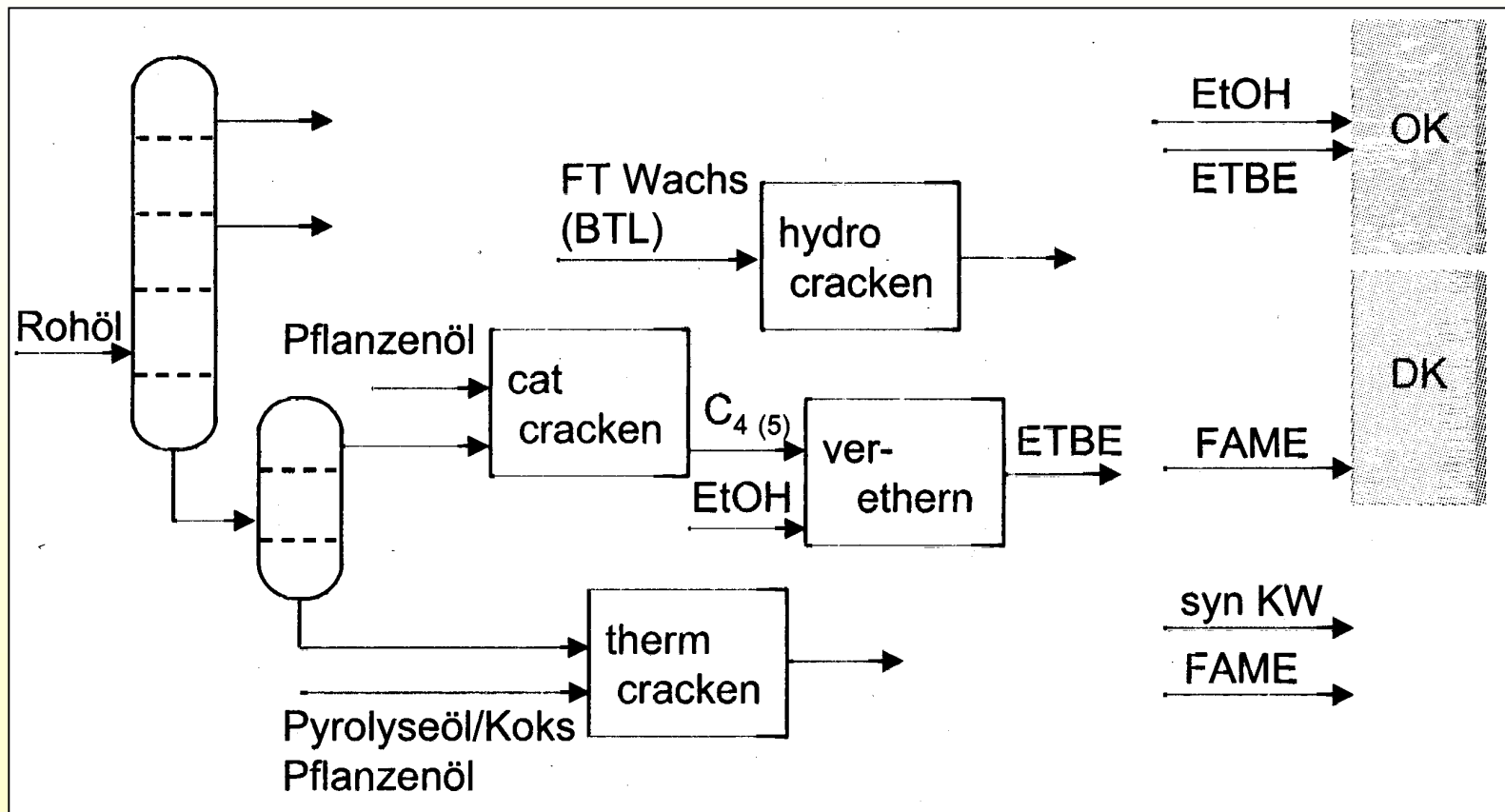
Eine aktuelle Studie der OECD kommt zu dem Schluss, dass selbst im besten Fall (»Best case scenario«) in 2050 reine Biokraftstoffe nur zu einer 3 %igen Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen werden beitragen können.

Damit würde das Ziel verfehlt, den Verbrauch von erdölstämmigen Kraftstoffen zu reduzieren. Zudem würde dieser geringe Vorteil mit immens hohen Kosten erkaufte, da die meisten Biokraftstoffe preislich nicht mit fossilen Kraftstoffen konkurrieren könnten. Beispielhaft nennt der Bericht für die USA CO₂-Vermeidungskosten von über 500 \$/t CO₂ im Falle von Ethanol, dessen Einsatz jährlich mit rund 7 Mrd. \$ subventioniert wird. In Europa, so die Autoren der Studie, könnten die Kosten noch deutlich höher liegen.

Überdies kritisiert der Report, dass die derzeitige Biokraftstoff-Politik die Preise für Lebensmittel steigen ließe.

Statt dessen wird empfohlen, die staatlichen Subventionen für den Biokraftstoff-Sektor auslaufen zu lassen und das Geld lieber in die Forschung für Biokraftstoffe der 2. Generation zu investieren.

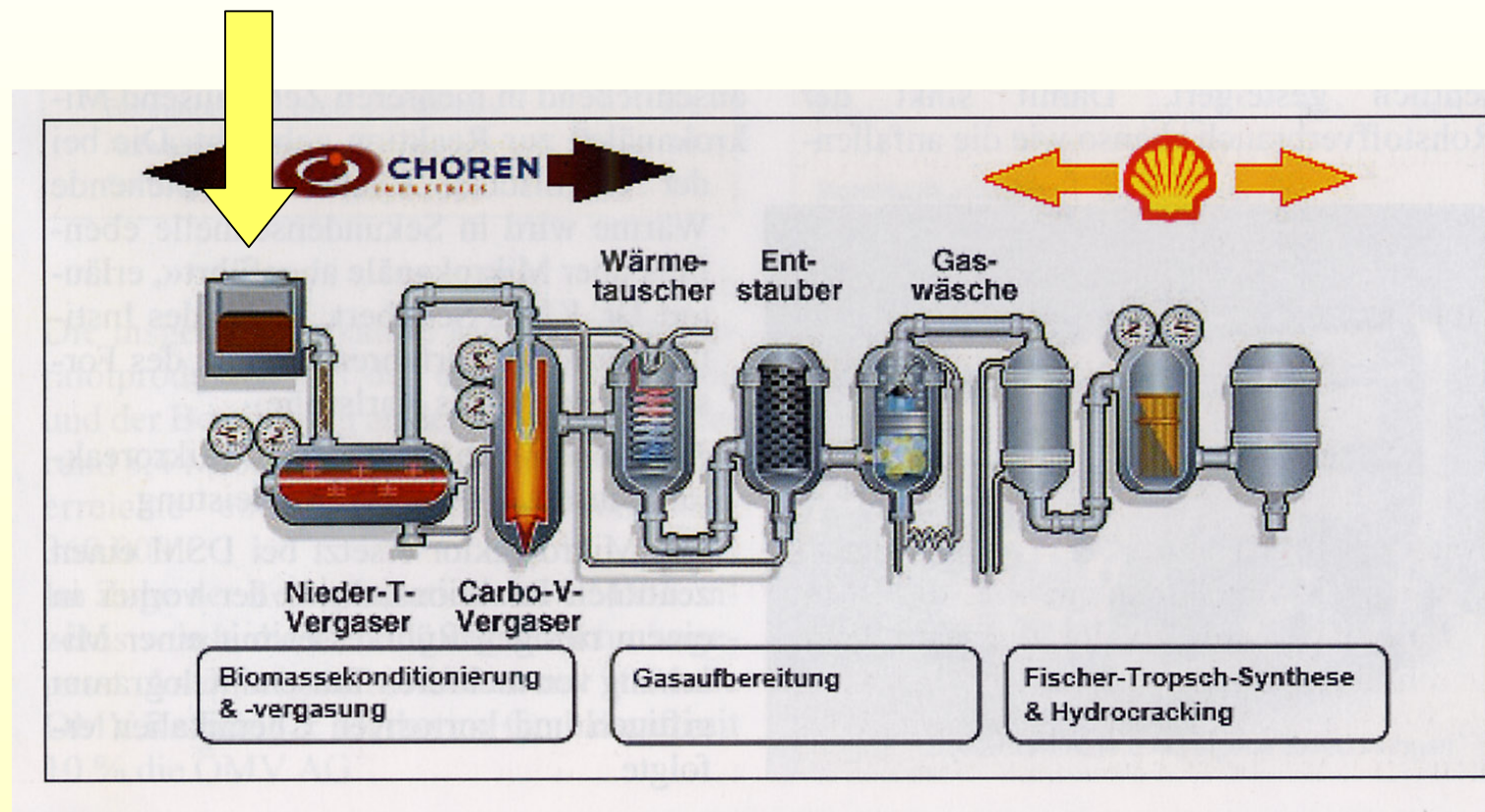
Raffinerie mit Biokomponenten



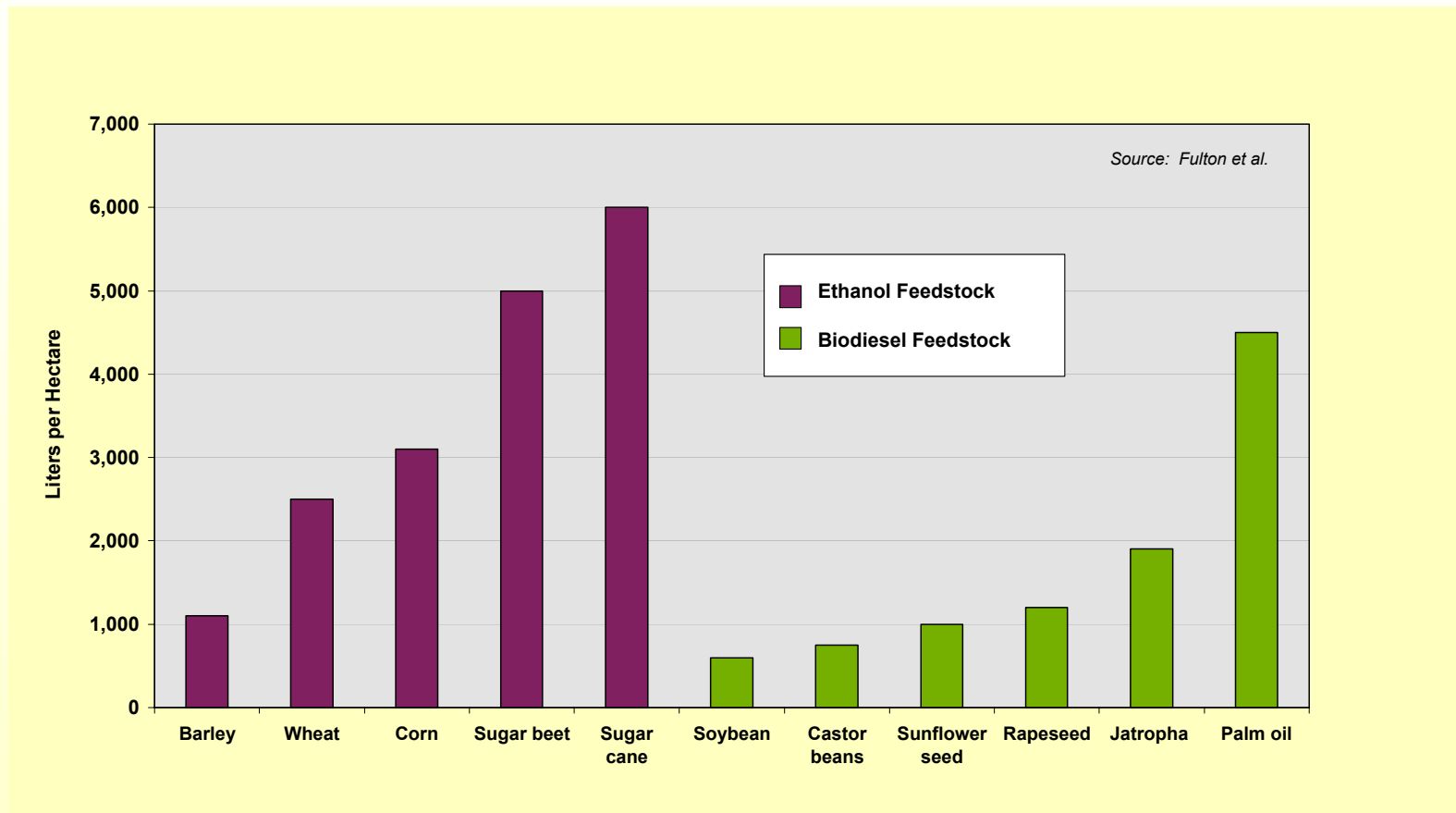
Zweite Generation von Biokraftstoffen

Biomass to liquid

Biomasse



Ergiebigkeit



Ethanol und Auto

1860 Nikolaus August Otto verwendet Ethanol als Kraftstoff in den Prototypen seines Verbrennungsmotors

1925 Ethanol wird als Mittel zur Erhöhung der Klopfestigkeit eingesetzt

2005 Flexible Fuel Vehicles (FFV) in Deutschland (Ford, SAAB)

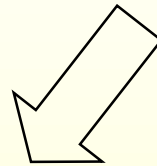
Benzin/Ethanol: 15/85 (E85)100/0



Der Saab 9-5 BioPower in Europas größter Bioethanolanlage in Zeitz

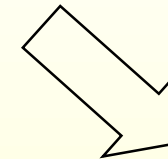
Preise

BIOETHANOL



2007 Beimischung von 1,2 % Bioethanol
Anteil steigt jährlich um 0,8 %

**Beimischungsanteil
ist steuerpflichtig**



2007 80,9 ct/L
E85 ist bis 2015
steuerbefreit

*Energiegehalt ist 30% niedriger
als von Benzin !*

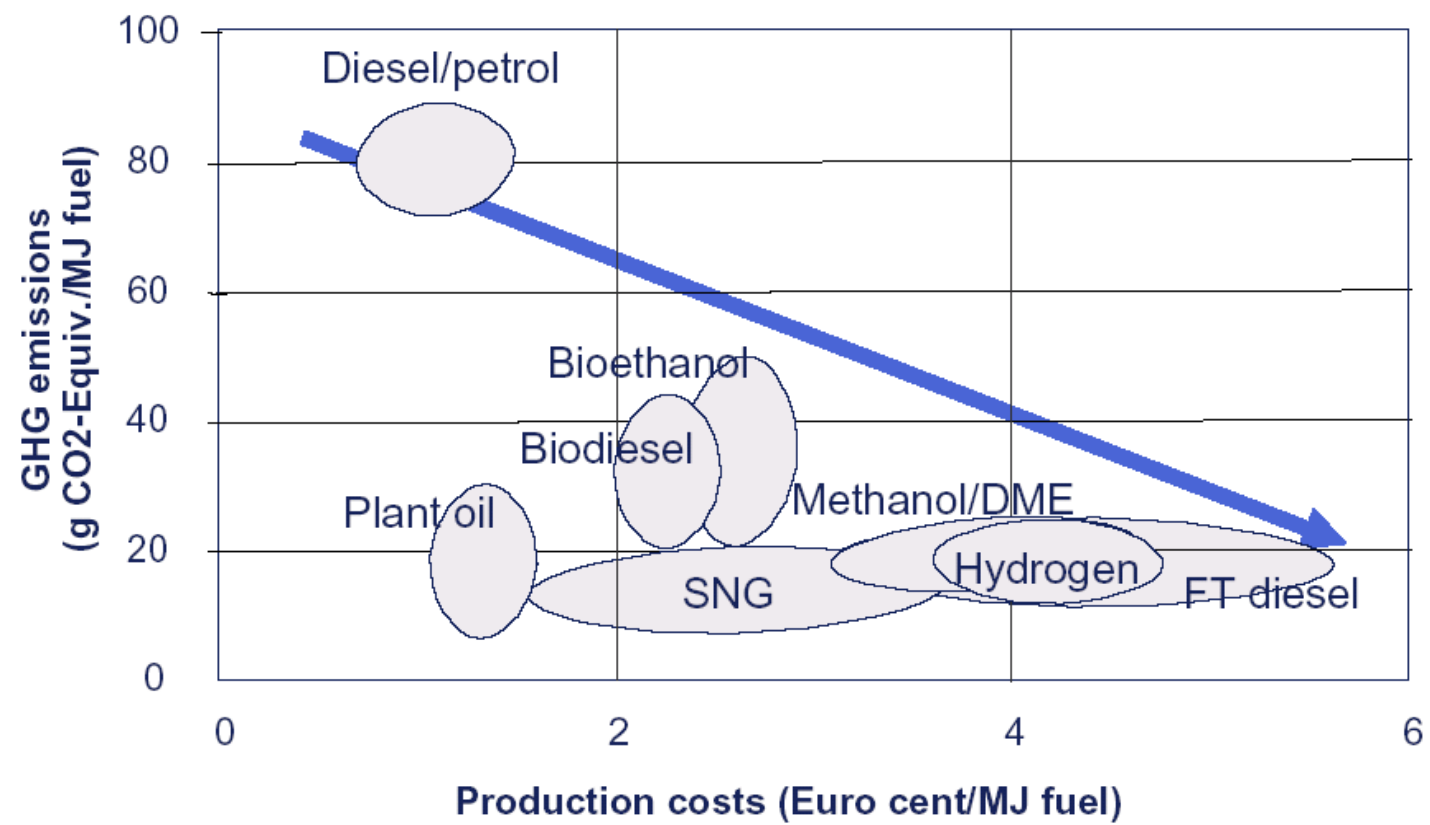
Investitionen

Zeit (Crop Energies)

Investment:	200 Mio	EUR
Rohstoffe:	700 000	t Getreide
Kapazität:	260 000	m ³ /a

Europa 2010

Bedarf: 4...7 Mio m³



Termine

20.2.2008	Klausur "Chemische Prozesskunde"
31.3.2008	Nachklausur "Technische Chemie"
1.-3.4.2008	Betriebsexkursion (Ruhrchemie, Henkel/Cognis, Evonik), Übernachtung in der Jugendherberge Duisburg-Wedau

2.1.2 Natural Gas

2.1.2.1 Resources and Exploitation

Erdgasvorräte der Welt

ruhrgas

in Billionen m³*

Nord-amerika



Westeuropa



GUS/
Zentraleuropa



Mittel-
und Nahost

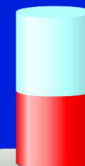
Fernost/
Pazifik



Südamerika



Afrika



Zusätzliche Erdgasressourcen
gesamt 150 Billionen m³

Sicher gewinnbare Erdgasreserven
gesamt 133 Billionen m³

*1 m³ = 11,5 kWh (H₀)
Stand 31. 12. 1998

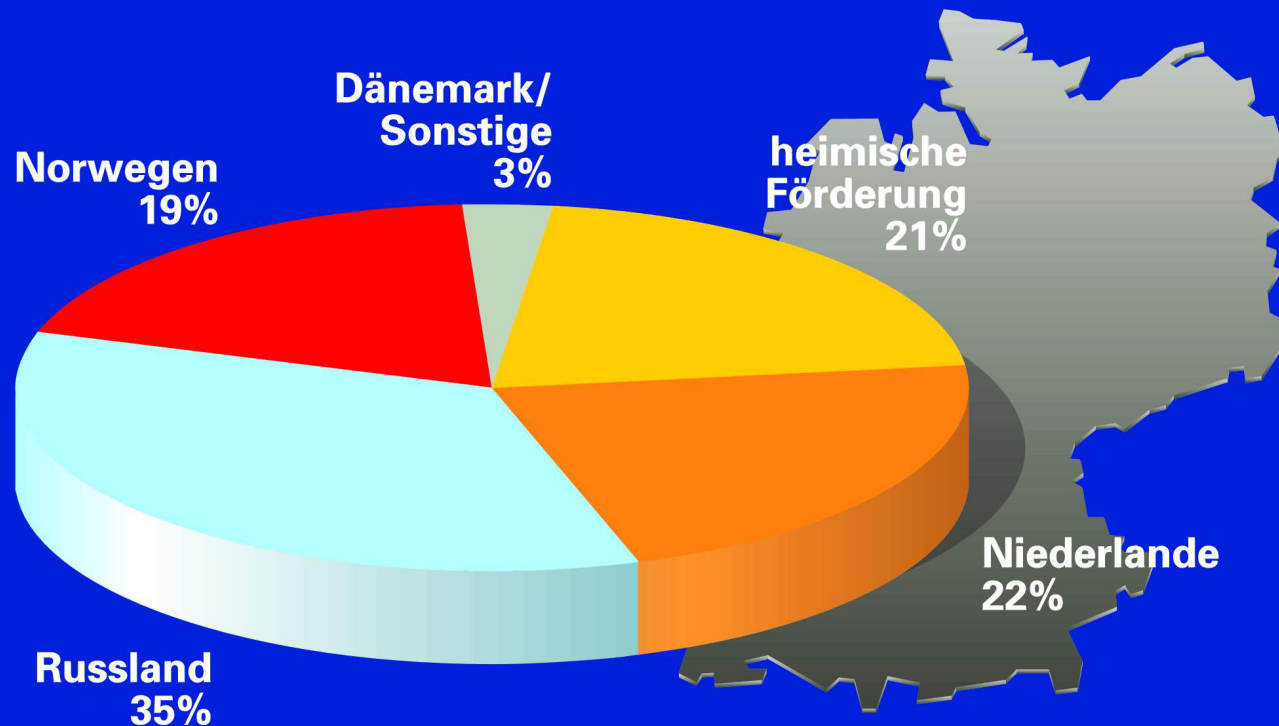
<http://www.ruhrgas.de/deutsch/index.htm>

1999

Erdgasaufkommen in Deutschland 1998



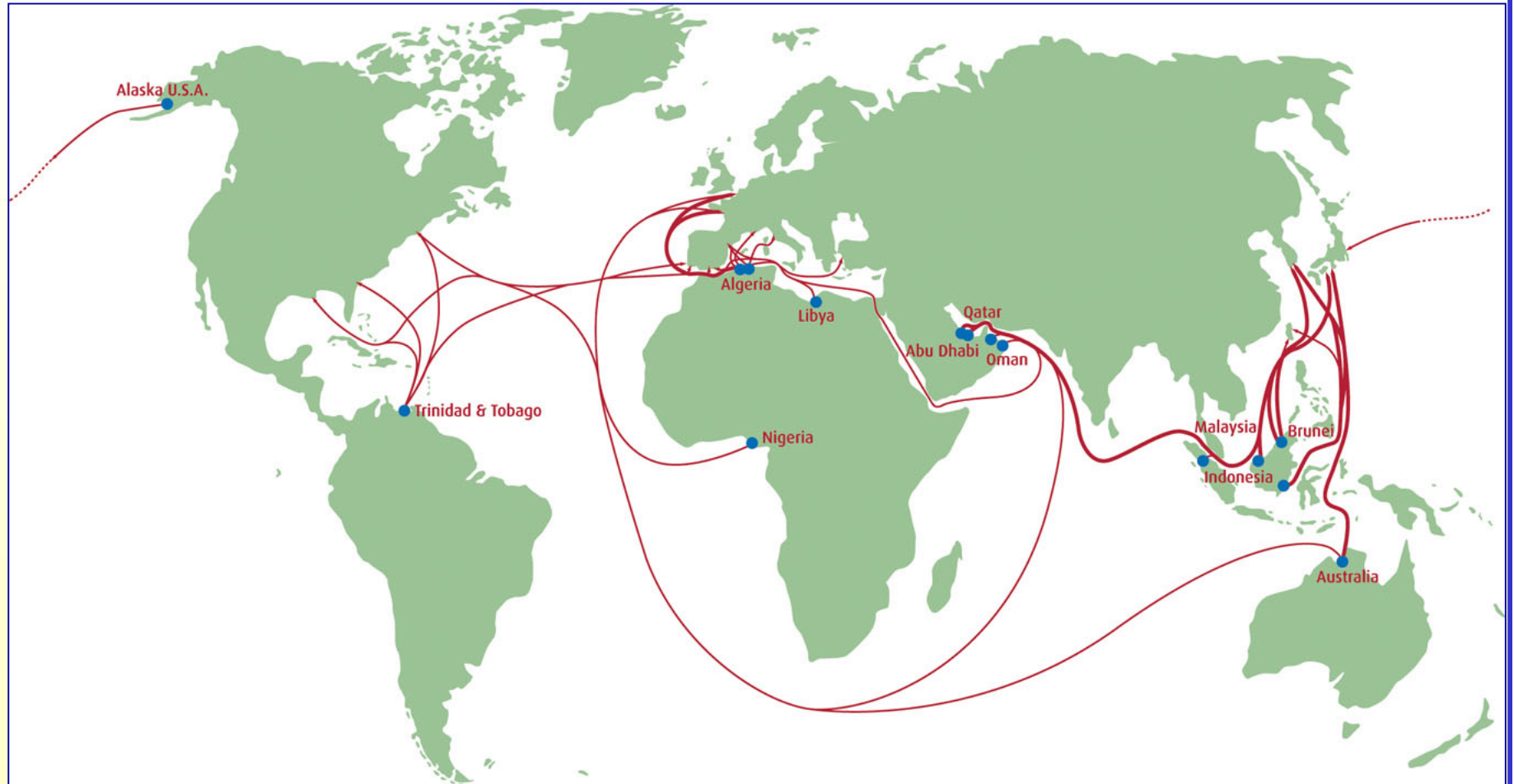
Erdgasaufkommen insgesamt: 83 Mrd m³*



*1m³ = 11,5 kWh (H₀)
vorläufig

1999

Transportwege für Erdgas



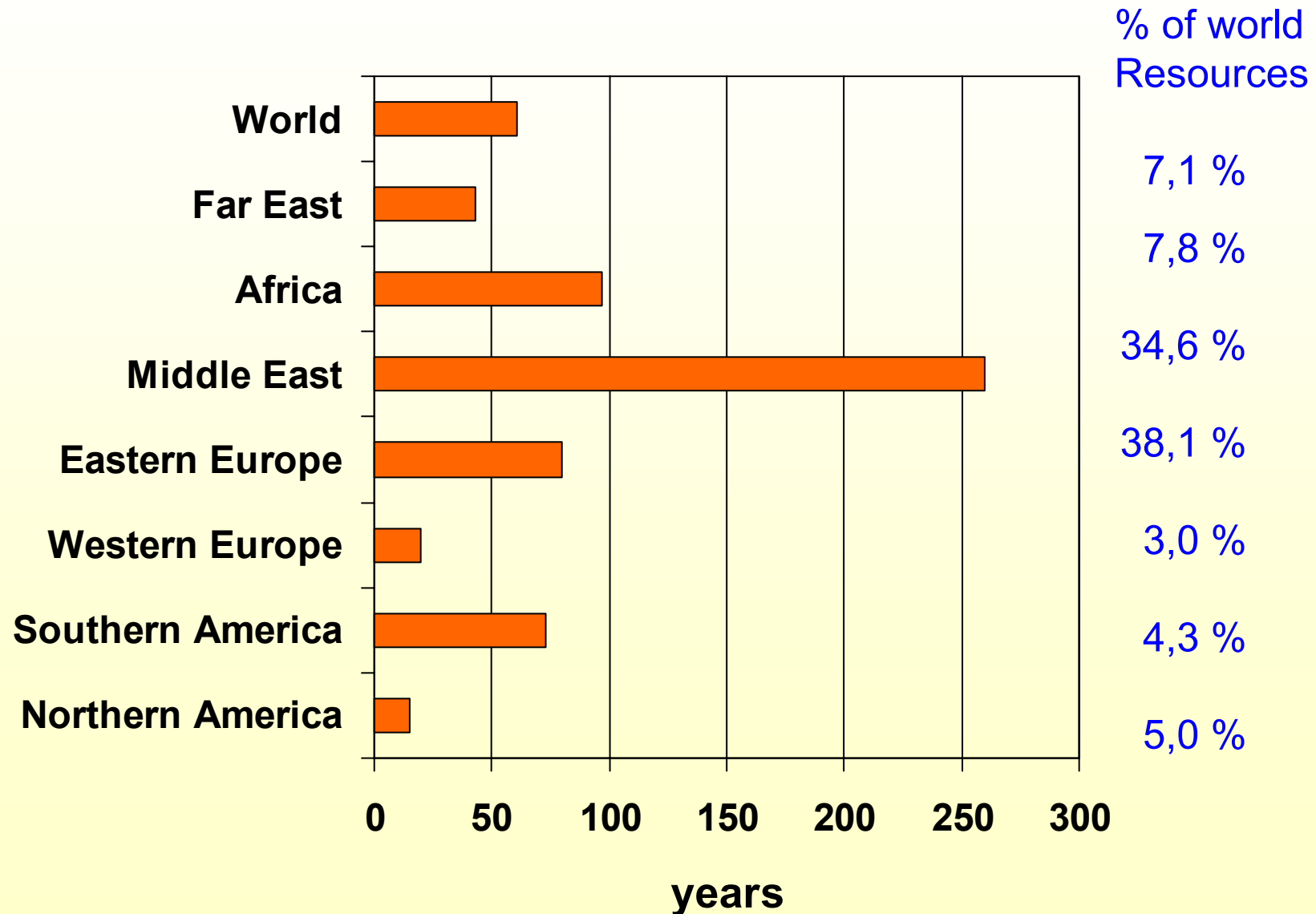
European Pipeline Network



Erdgasterminal und Erdgastanker



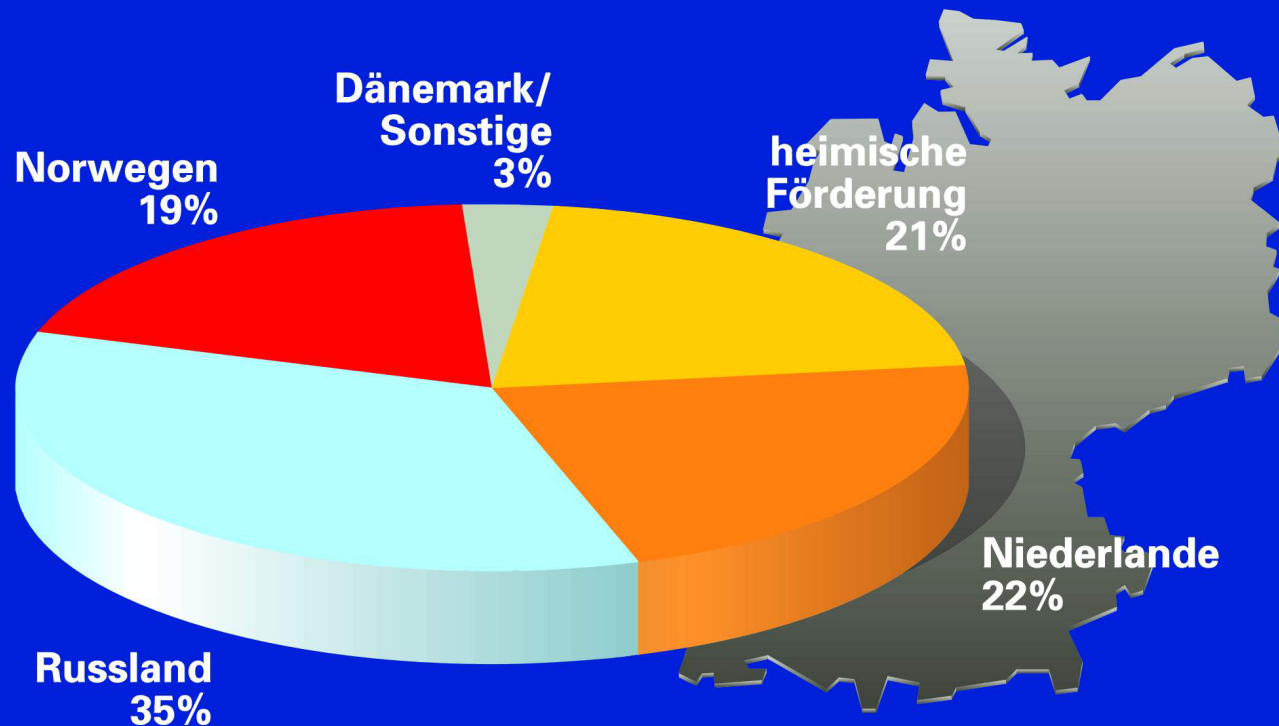
Range of Natural Gas Resources



Erdgasaufkommen in Deutschland 1998



Erdgasaufkommen insgesamt: 83 Mrd m³*



*1m³ = 11,5 kWh (H₀)
vorläufig

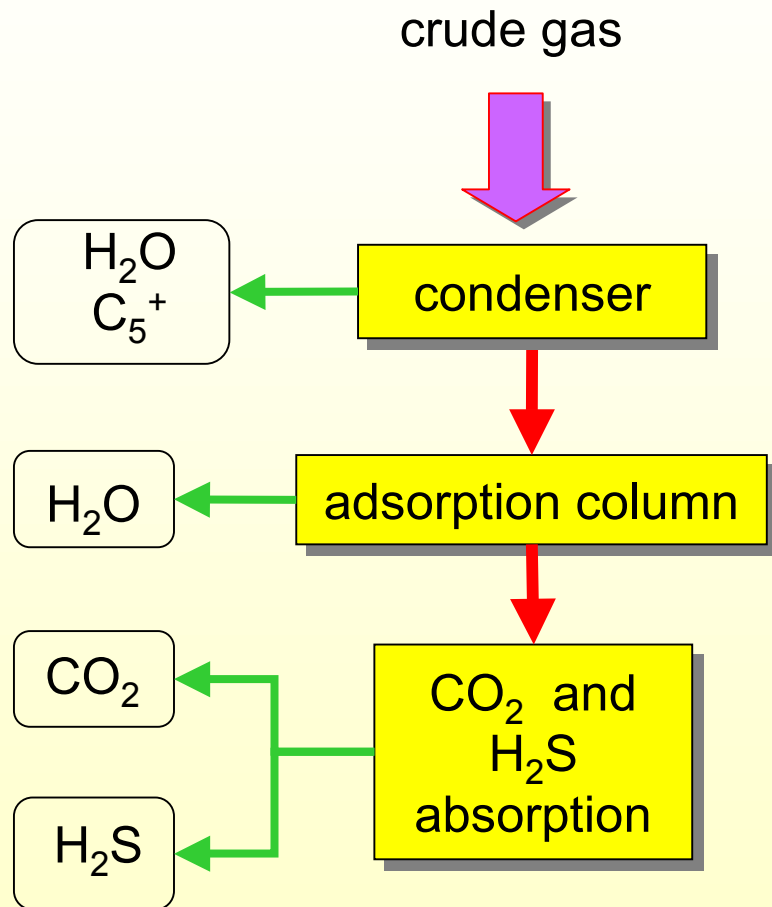
1999

2.1.2.2. Aufarbeitung

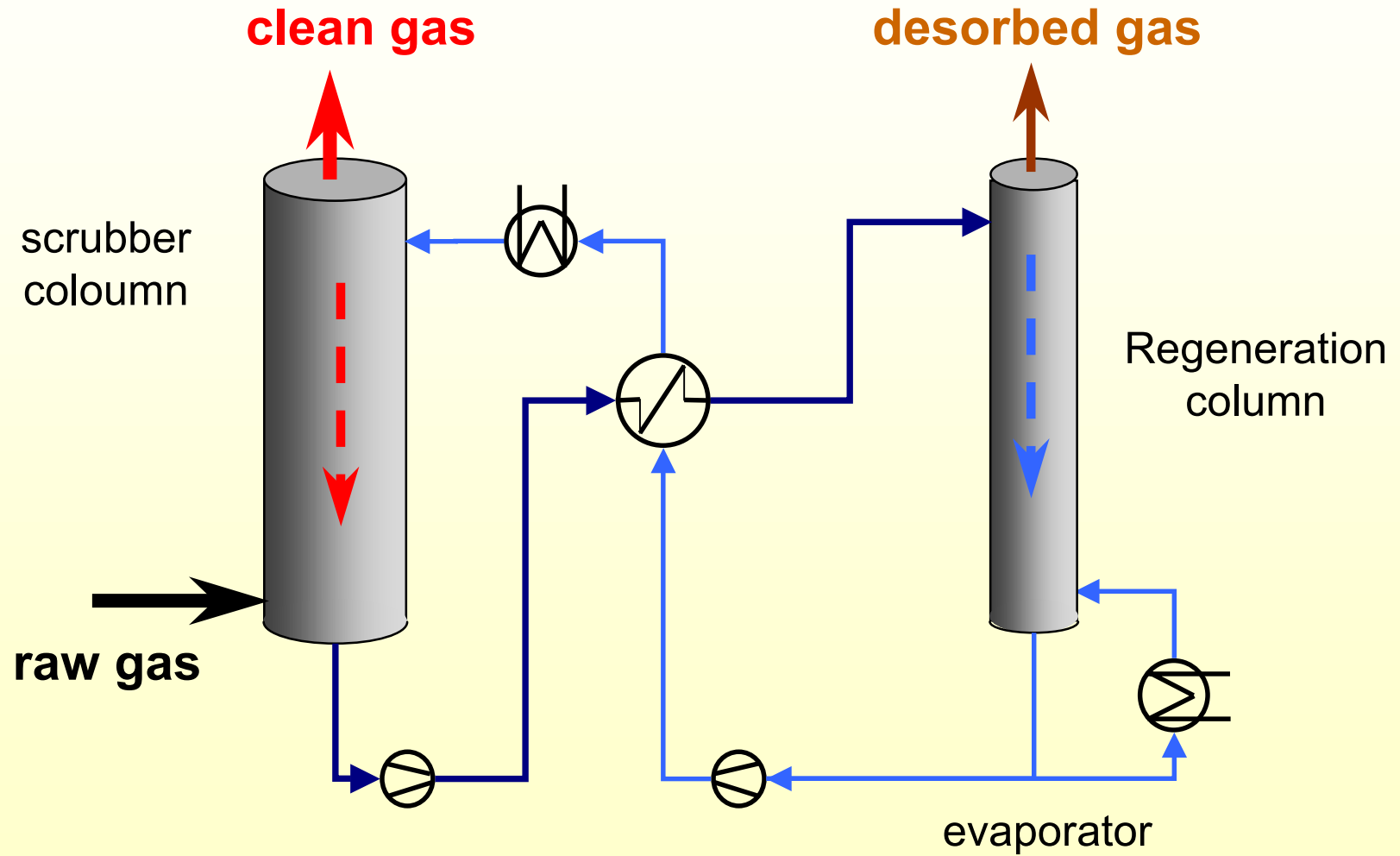
Composition of Natural Gas

	Netherlands	France	Italy	Algier	Iraque *	USA*
Methane	81,9	69,3	95,9	84,5	59,6	77,3
Ethane	2,7	3,1	1,4	7,0	19,8	11,2
Propane	0,38	1,1	0,4	2,0		
Butane	0,13	0,6	0,2	0,8		
Higher HC	0,08	0,7	0,1	0,4	9,3	8,5
Nitrogen	14,0	0,4	1,8	6,1	2,2	2,7
Sulfur	-	15,2	-	-		

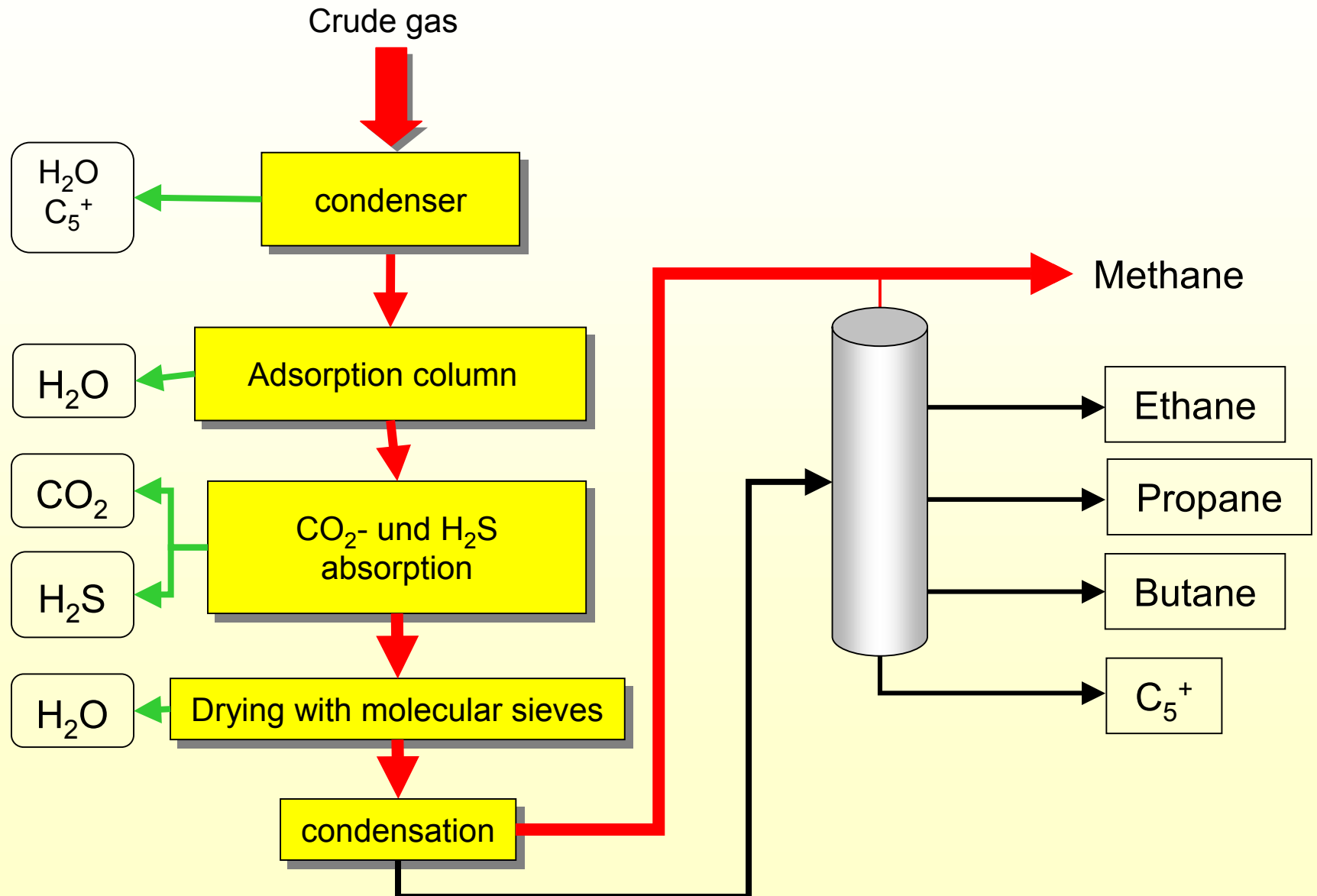
Treatment of Natural Gas



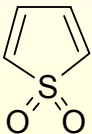
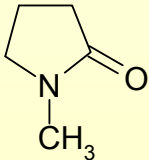
Gas Purification by Absorption



Treatment of Natural Gas

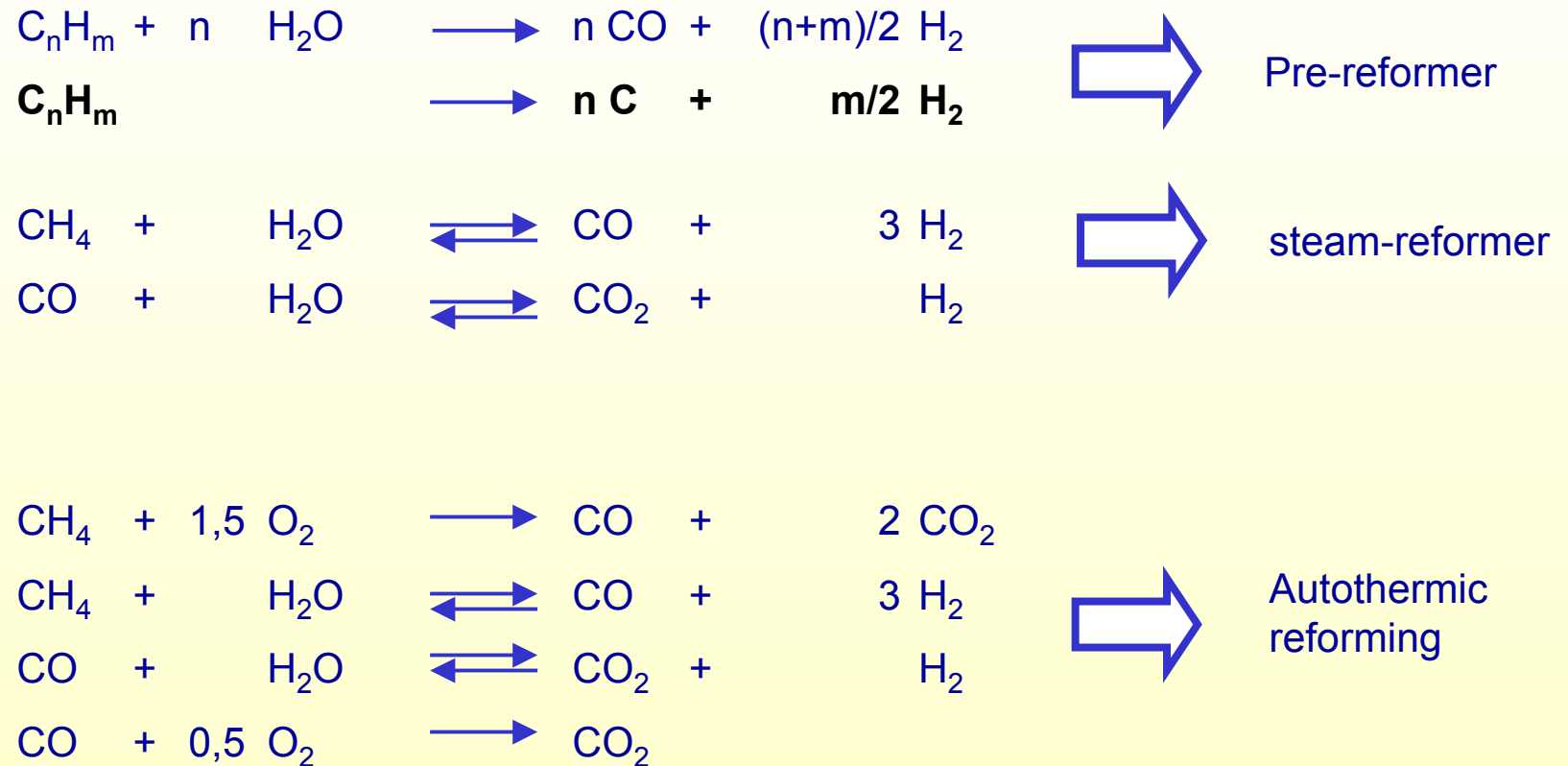


Processes for Sulfur Removal

	Absorbing agent	Method	Company
Rectisol	CH ₃ OH	washing under pressure	Lurgi und Linde
Selexol	CH ₃ (OCH ₂ CH ₂) _n OCH ₃ n = 4 -7 polyglycol dimethylether	separation by fractional expansion	Allied
Sulfinol	 (i-C ₃ H ₆ OH) ₂ NH tetrahydrothiophenoxide (sulfolane) + diisopropanol amine		Shell
Purisol	 N-methylpyrrolidone		Lurgi
Catacarb	K ₂ CO ₃		Benfield

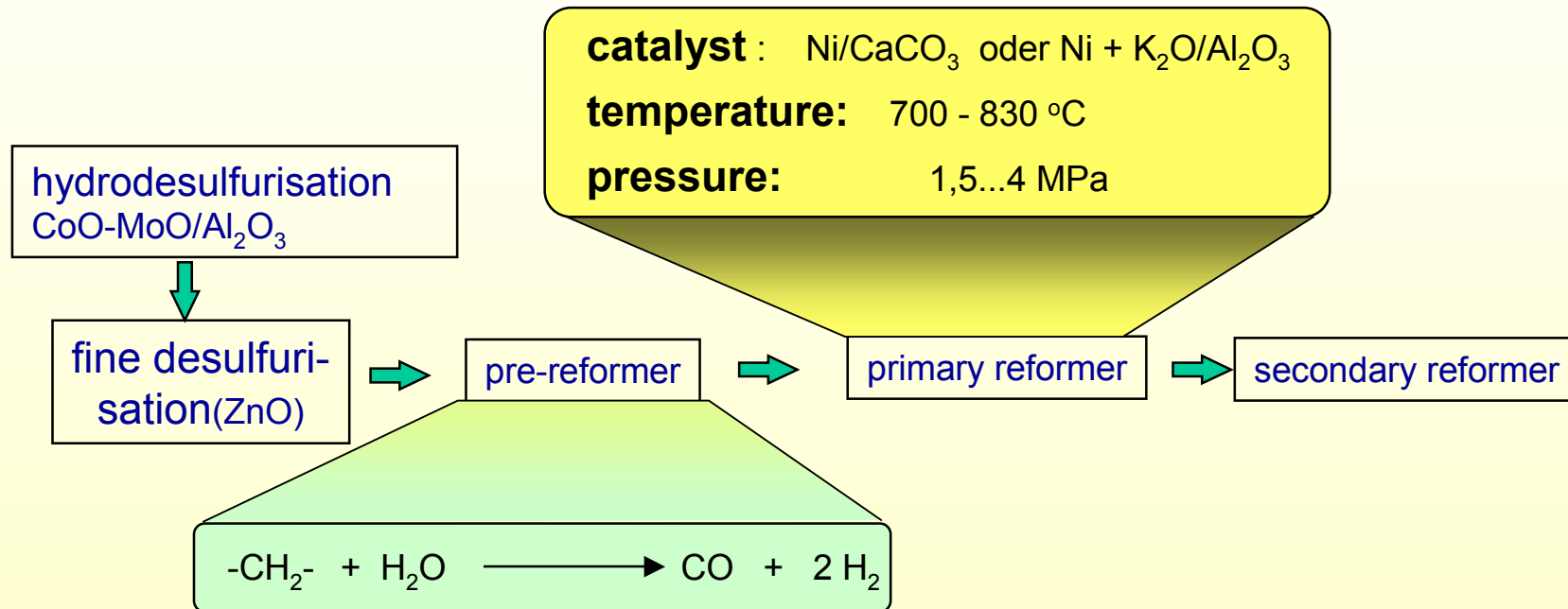
2.1.2.3. Chemische Verwertung von Erdgas

Syngas from Natural Gas Chemical Reactions

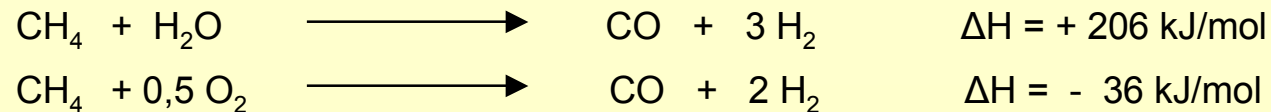


Syngas Production from Natural Gas

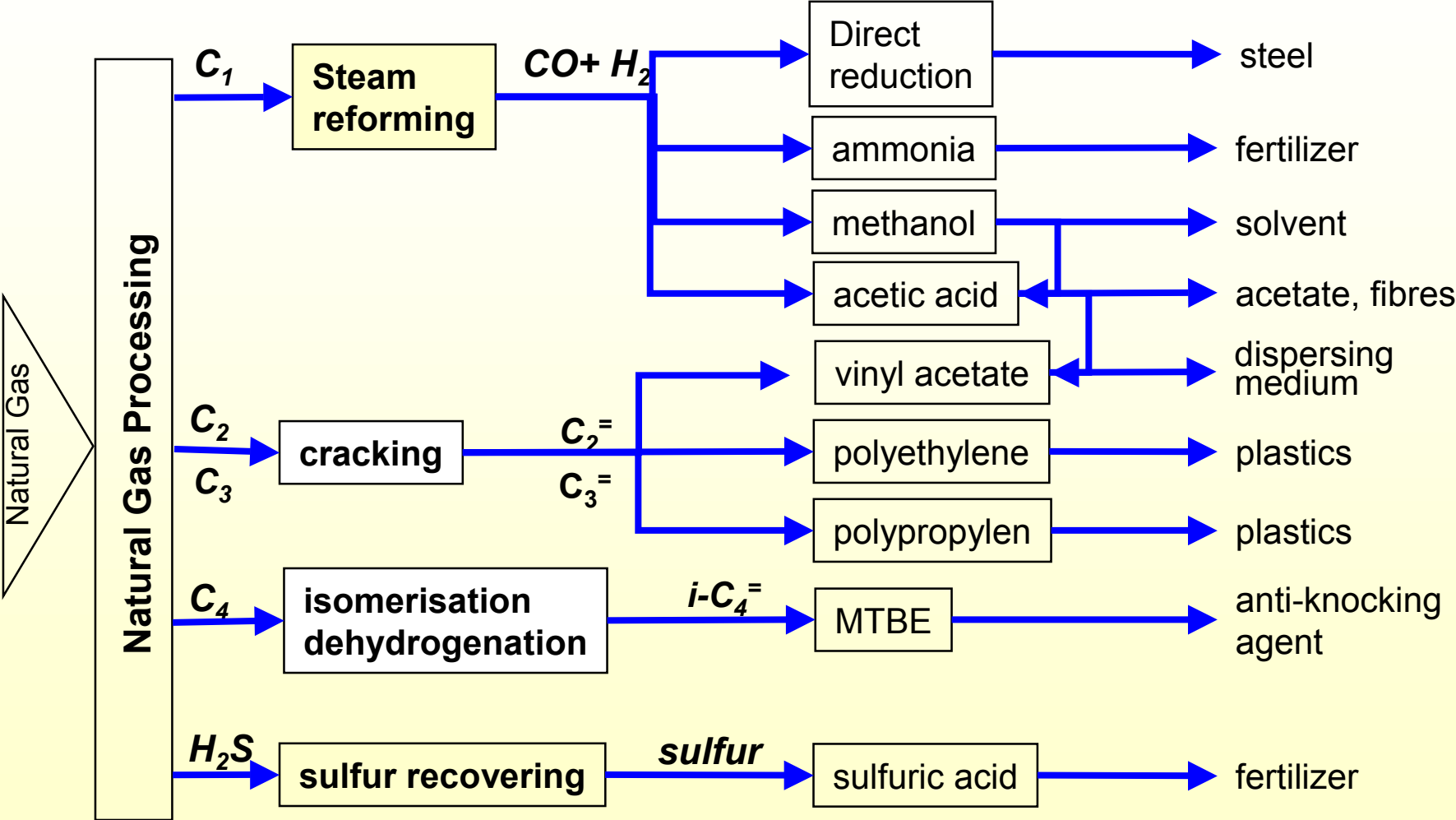
allothermic catalytic gasification (steam reforming)



autothermic gasification



Chemical Utilisation of Natural Gas

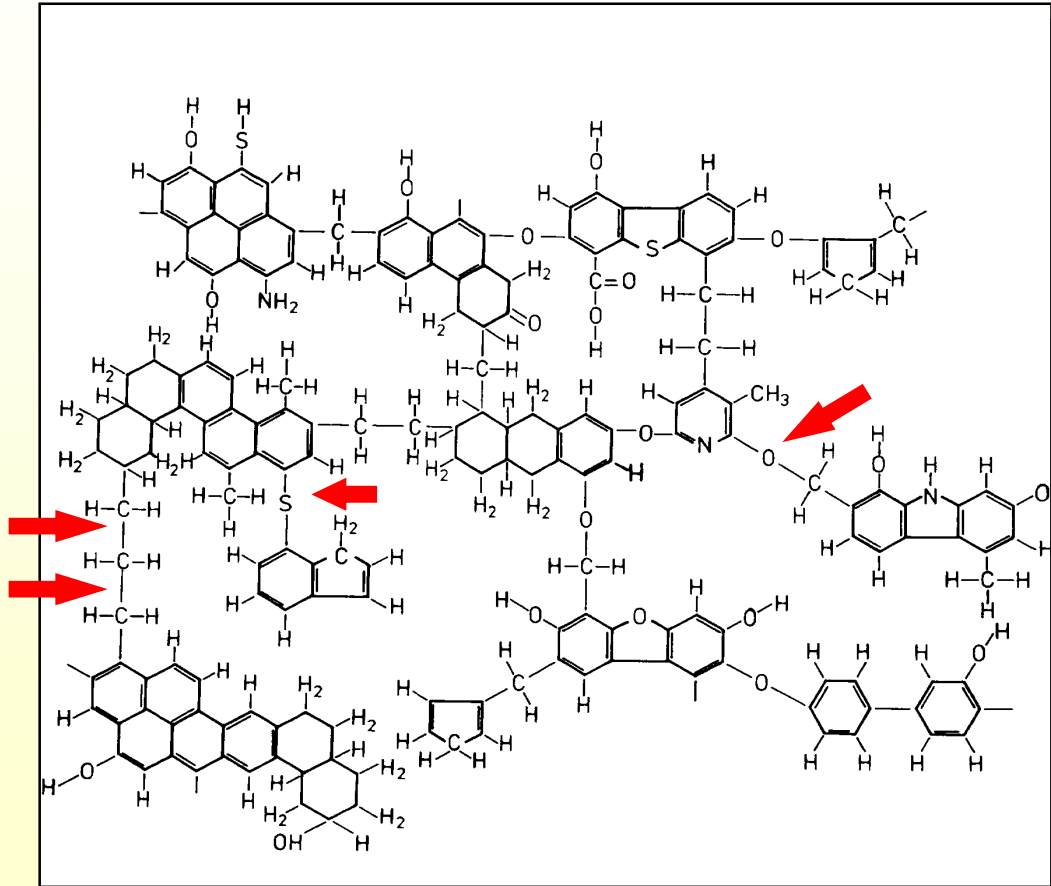


2.1.3 Kohle

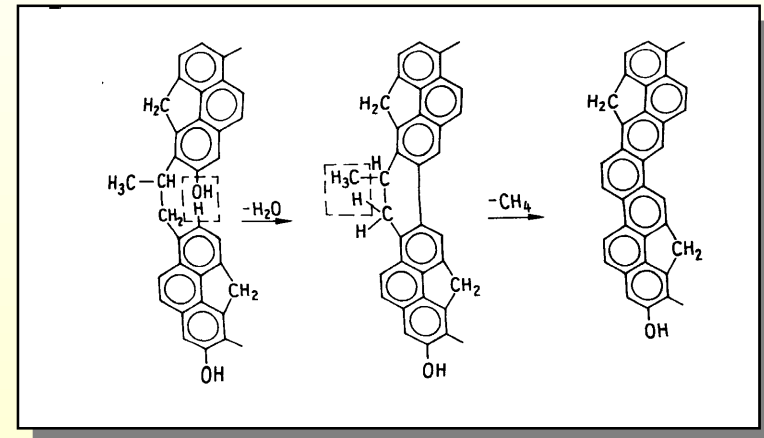
Stromerzeugung aus Steinkohle

Zeitraum	kg Steinkohle/ kWh	Art der Dampfkraftmaschine
1880 - 1900	1,0	Kolbenmaschine (6 atü)
1900 - 1920	0,9 - 1,0	Dampfturbine (12 - 20 atü)
1920 - 1928	0,65 - 0,7	Dampfturbine (120 atü, 450 °C) Staubfeuerung
1928 - 1932	0,5	Dampfturbine (120 atü, 500 °C) Zwischenüberhitzung des Dampfes
1932 - 1945	0,45	Dampfturbine (120 atü, 500 °C) stufenweise Speisewasservorwärmung
1945 - 1955	0,42	Dampfturbine (120 atü, 600 °C) Schmelzkammerkessel
ab 1955	0,32	Dampfturbine (300 atü, 650 °C) Kessel mit überkritischen Druck

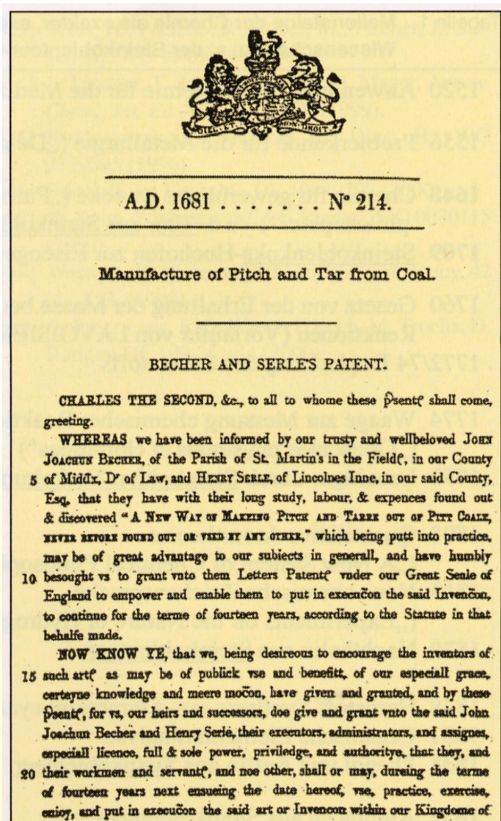
Struktur von Kohle



Inkohlung



Geschichtliches



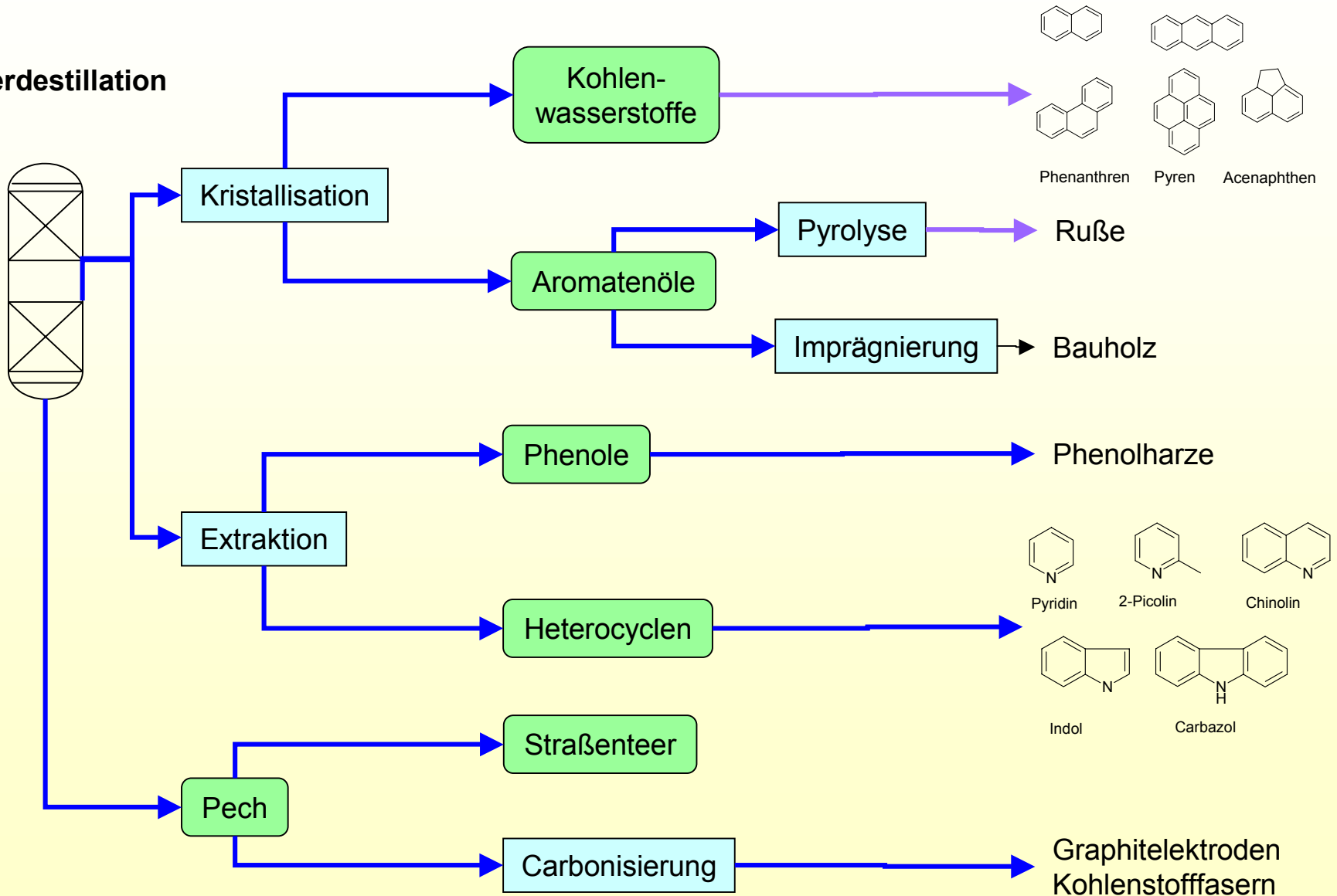
Englisches Patent EP 214 (1681)
an
Johann Joachim Becher
zur Herstellung von Pech und Teer aus Kohle



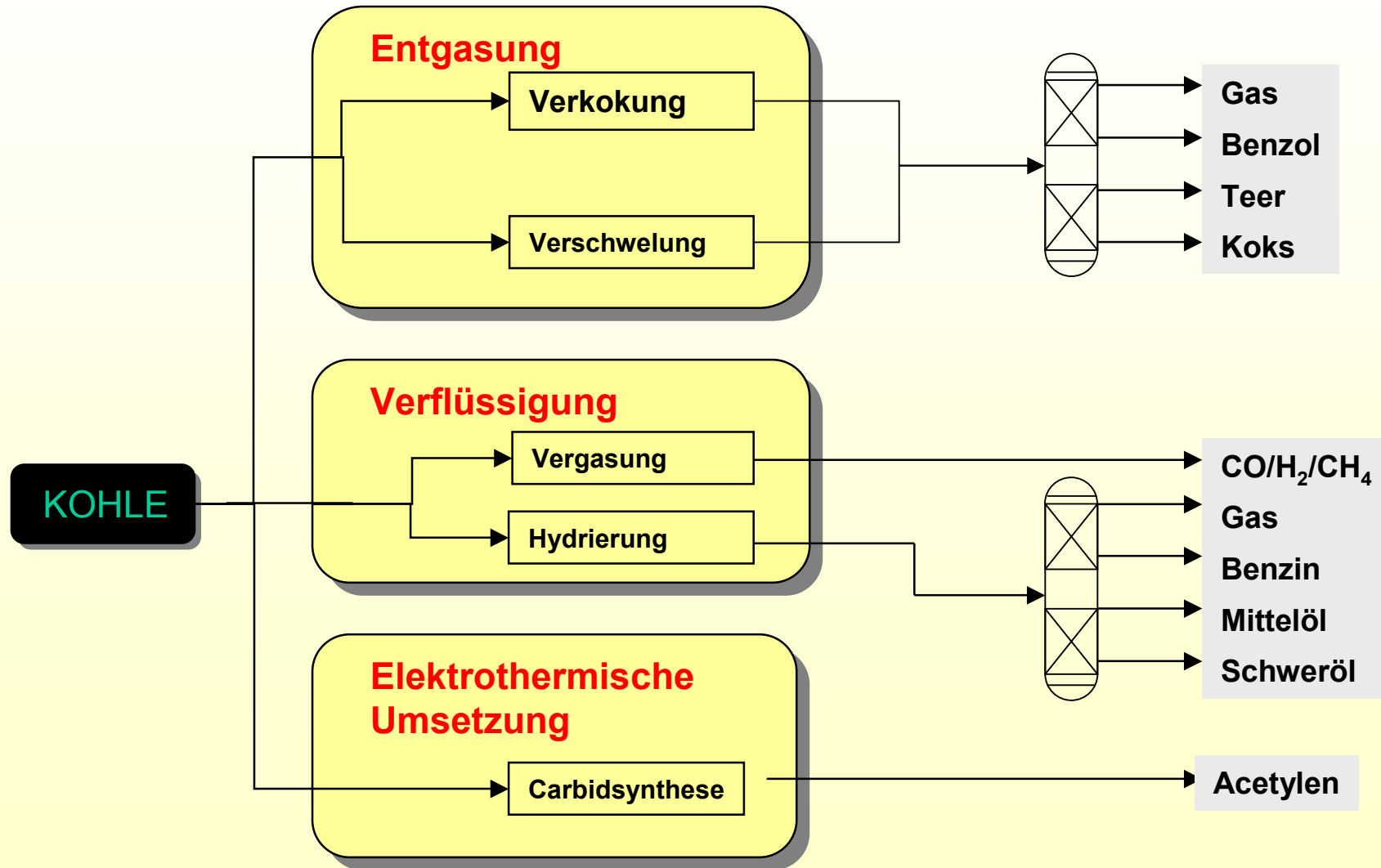
Erstes deutsches Reichspatent (1877)
an
die BASF
Verfahren zur Darstellung blauer Farbstoffe
aus Dimethylanilin und anderen
tertiären aromatischen Monoaminen

Teeraufarbeitung

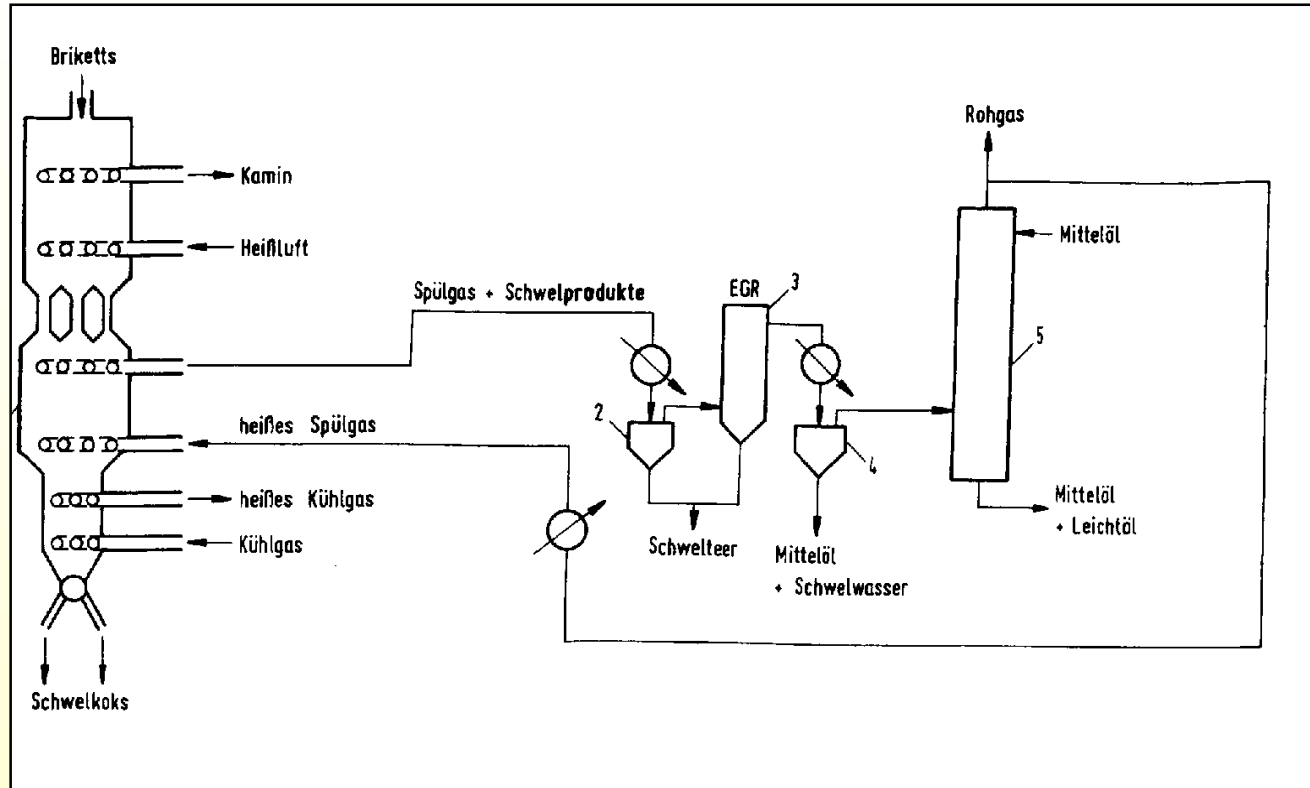
Teerdestillation



Verfahren der Kohleveredelung



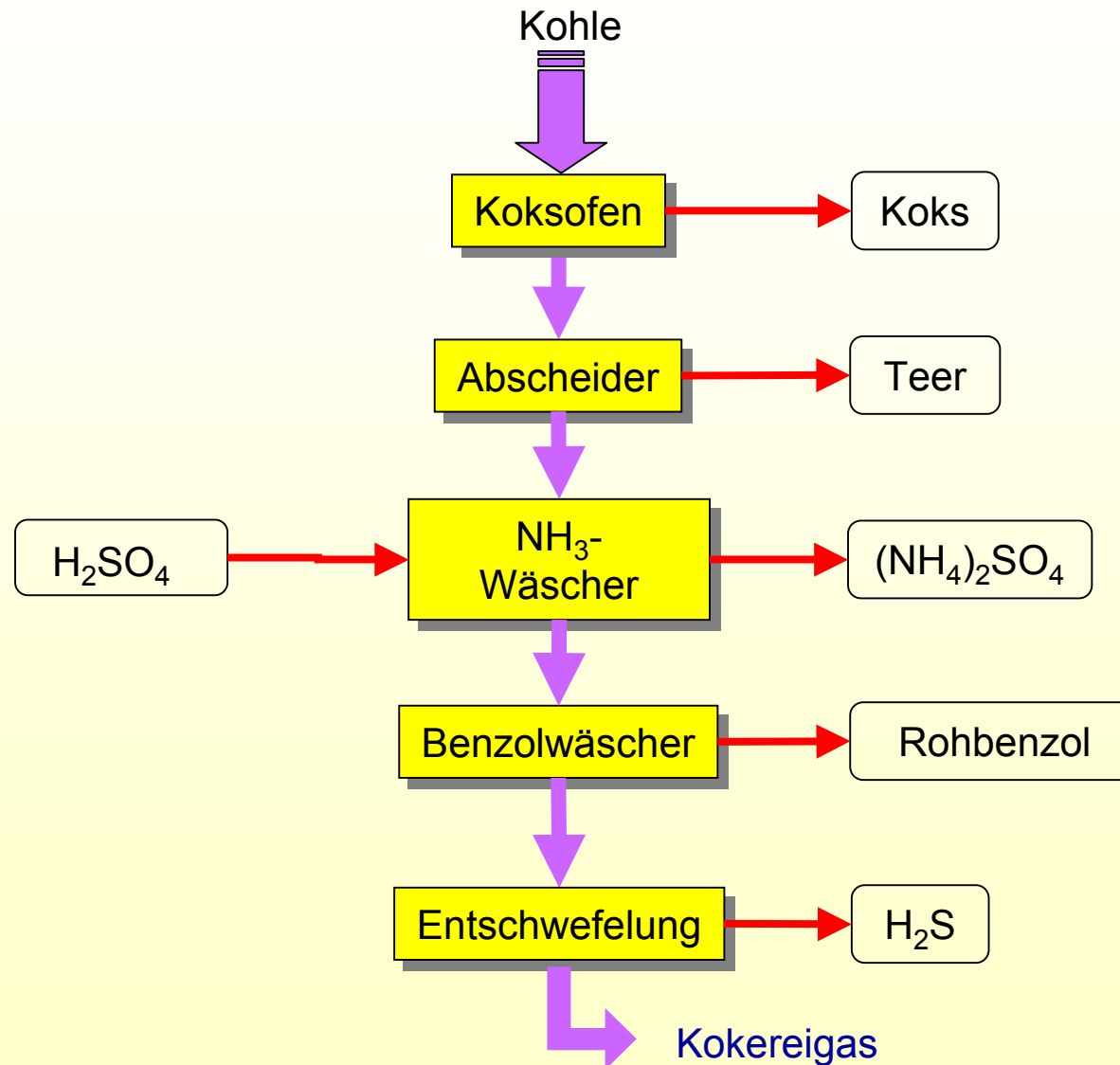
Spülgasschwelanlage



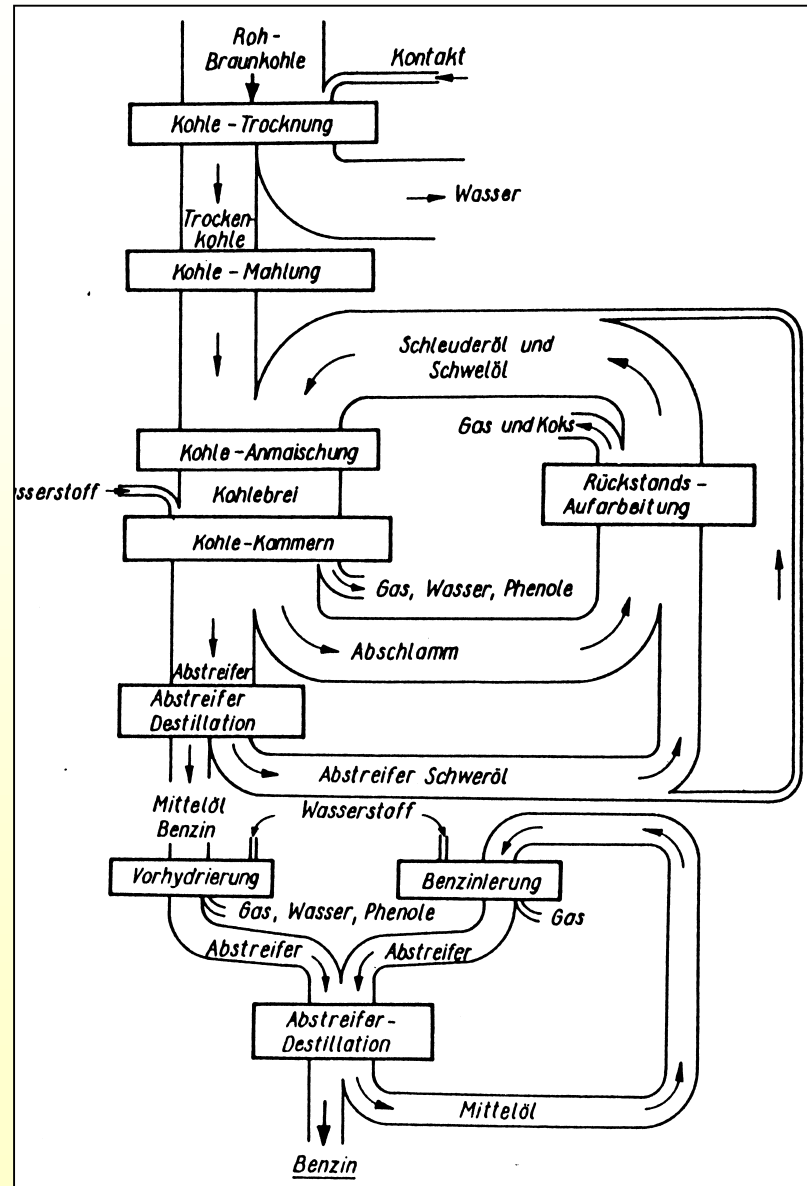
- Teerabscheider**
- Schwelofen mit Gaskreisläufen**
- Trocknung -
 - Schwelung -
 - Kühlung -
- Gaswaschkolonne**
- Mittelölabscheider**

Produkt	Ausbeute
Schwelkoks	47,0 %
Schwelteer	11,5 %
Leichtöl	2,5 %
Gas	8,0 %

Grundfließbild einer Kokerei



Katalytische Druckhydrierung von Braunkohlen



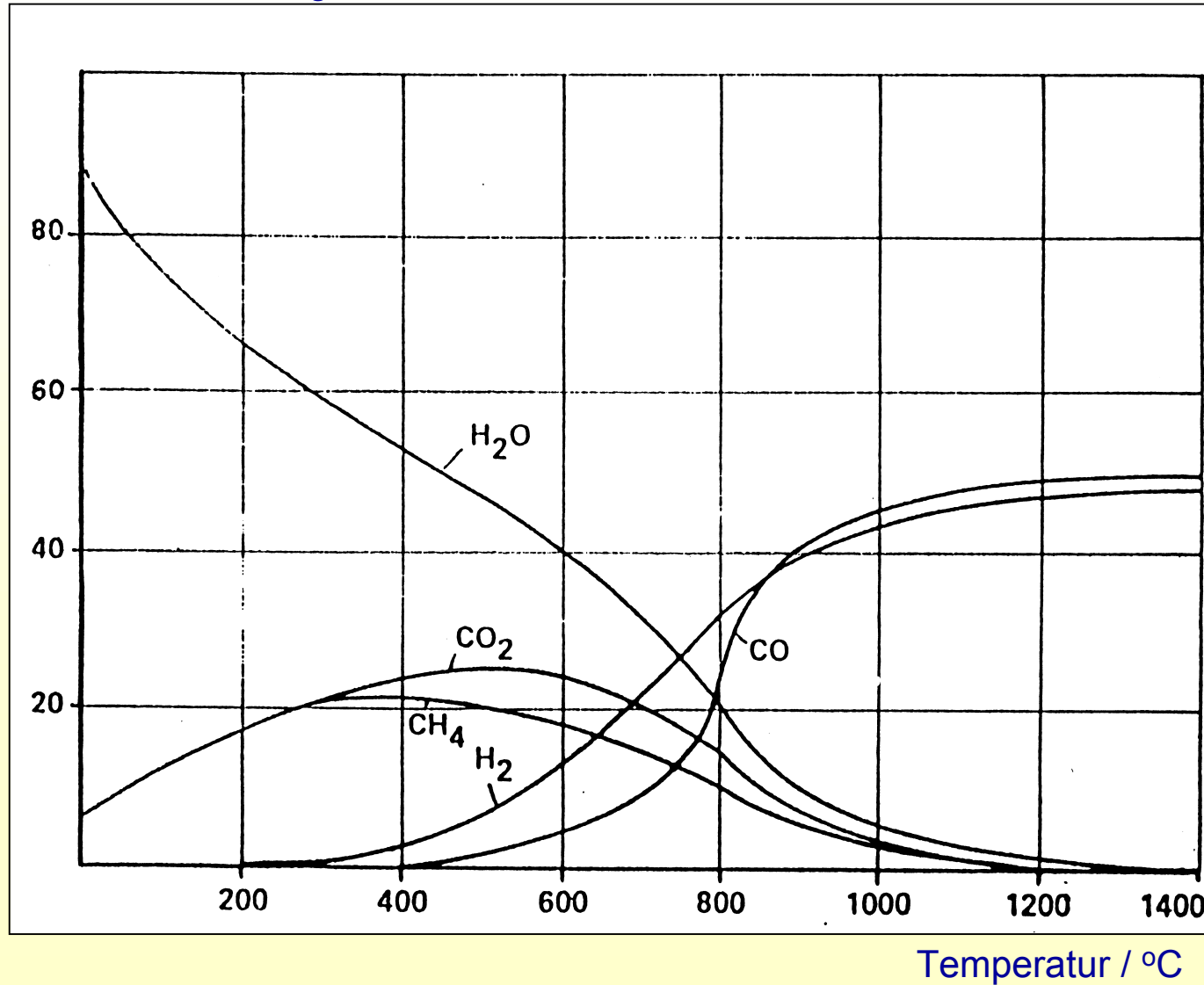
A. Lissner, A. Thau,
 "Die Chemie der Braunkohle,
 Bd. II Chemisch-Technische
 Veredlung", 2. Auflage,
 VEB Wilhelm Knapp Verlag, Berlin, 1953

Chemie der Kohlevergasung

				K	
				700 °C	1000 °C
Gas - Feststoff-Reaktionen					
$C + 1/2 O_2$	\rightleftharpoons	CO	$\Delta H = -246 \text{ kJ/mol}$ (Teilverbrennung)		
$C + O_2$	\rightleftharpoons	CO_2	(Verbrennung)		
$C + CO_2$	\rightleftharpoons	$2 CO$	$\Delta H = 162 \text{ kJ/mol}$ (Boudouard)	1	$3 \cdot 10^3$
$C + H_2O$	\rightleftharpoons	$CO + H_2$	$\Delta H = 119 \text{ kJ/mol}$ (Wassergasrkt.)		
$C + 2 H_2$	\rightleftharpoons	CH_4	$\Delta H = - 87 \text{ kJ/mol}$ (hydr. Vergasung)		
Gas - Gas-Reaktionen					
$CO + H_2O$	\rightleftharpoons	$CO_2 + H_2$	$\Delta H = - 42 \text{ kJ/mol}$ (Konvertierung)	1,5	0,57
$CO + 3 H_2$	\rightleftharpoons	$CH_4 + H_2O$	$\Delta H = - 206 \text{ kJ/mol}$ (Methanisierung)	1,08	$1,1 \cdot 10^{-4}$

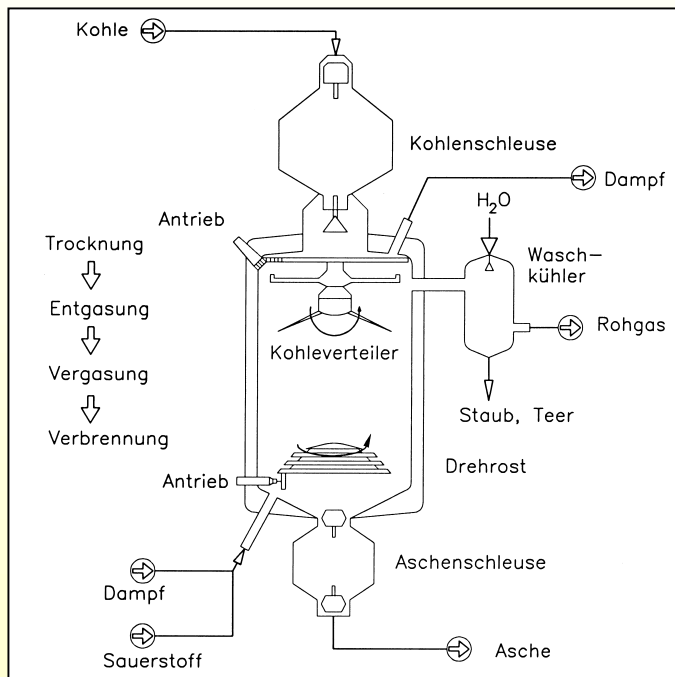
Zusammensetzung von Synthesegas

Gaszusammensetzung / Vol.-%

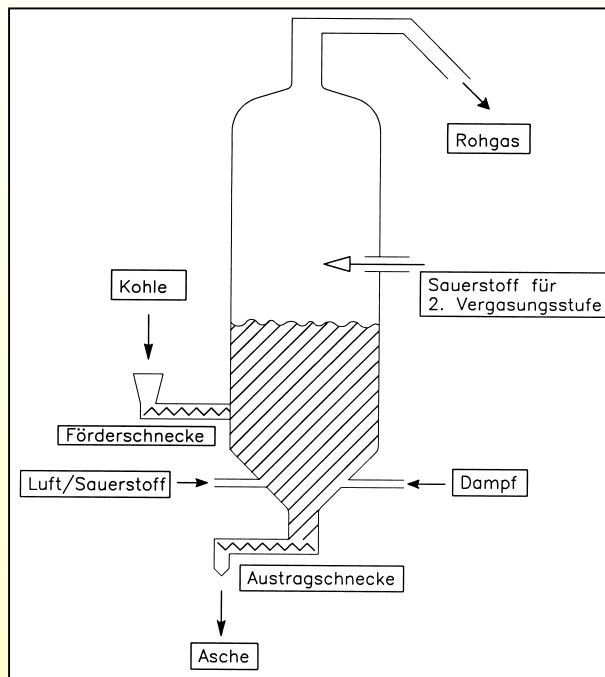


Gasgeneratoren

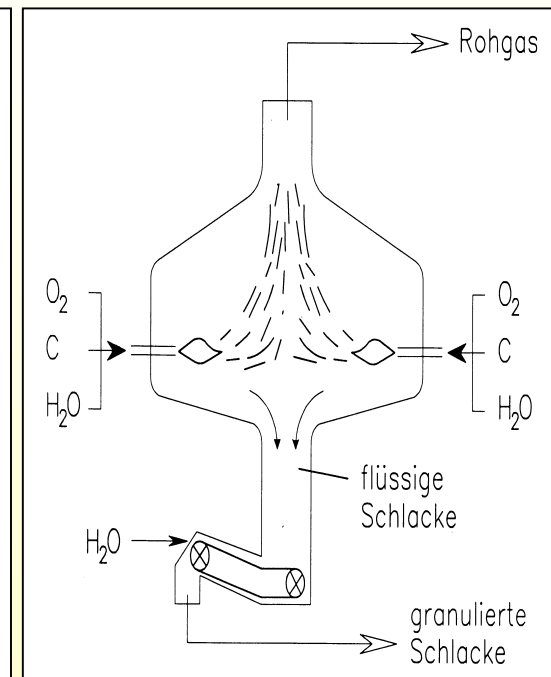
Lurgi-Reaktor



Winkler-Generator



Koppers-Totzek-Verfahren



Verfahren zur Kohlenvergasung

Verfahren	LURGI	WINKLER	KOPPERS- TOTZEK
Reaktortyp	Festbett	Wirbelbett	Flugstaub
Korngröße der Kohle (mm)	10 - 30	1 - 10	< 0,1
Führung von Kohle und O ₂	Gegenstrom	(Wirbel-) Gleichstrom	Gleichstrom
Verweilzeit	60..90 min	15...60 min	< 1 s
Dampf/Sauerstoff (kg/m ³)	9:1...5:1	2,5:1...1:1	0,5:1...0,02:1
Gasaustrittstemperatur (°C)	370 - 600	800-950	1400 - 1600
Druck (bar)	20 ...30	1,03	1....30
Zusammensetzung			
CO + H ₂	62	84	85
CH ₄	12	2	0,1
Nebenprodukte	Teer, Öl, Phenole	keine	keine

a

Verwertung von Kohlen

	VERGASUNG	SCHWELUNG	VERKOKUNG	HYDRIERUNG
Zielprodukte:	Heizgas, Synthesegas	Teer, Schwelkoks	Hüttenkoks, Teer	VK, DK
EP:	Braunkohle (auch salzhaltige)	bituminöse Feststoffe Holz, Torf, Kohle	Steinkohle, Braunkohle	Kohle
Bedingungen:	T= 1300 K p= 1 – 4 MPa	T= 900 K p= 0,1 MPa	T= 1300 – 1500 K	T= 800 K p= 20 MPa
Reaktoren:	Festbett (Winkler), Wirbelschicht, Flugstaub	Spülgasschmelofen	Kammeröfen	Vollraumöfen
Produkte:	Stadtgas, Synthesegas, Asche	Teer, Leicht- und Schweröle Schwelwasser CO, CO ₂ , CH ₄	Koks (BHT-Koks), arom. KW, Teer, Pech, Kokereigas	Benzin Flüssiggas, Mittel- und Schweröle
Besonderheiten:		Koks nicht für Metallurgie		Sumpffasen- hydrierung