

Aus dem oberhalb  $460^{\circ}\text{C}$  siedenden Rückstand konnten durch Raffination Produkte mit Erstarrungspunkten von  $95^{\circ}\text{C}$  und höher gewonnen werden. Sie ließen sich wie die Tafelparaffine und darüber hinaus noch in der Elektroindustrie, zum Tränken von Hölzern usw., einsetzen.

Das Reaktionswasser vor allem der Mitteldrucksynthese, enthielt geringe Mengen s a u e r s t o f f h a l t i g e r P r o d u k t e , u.a. ca. 0,5-1% an Fettsäuren. Die Fettsäuren im Bereich  $\text{C}_{11}$ - $\text{C}_{18}$  wurden im zweiten Weltkrieg als Rohstoffe für die Seifenherstellung gewonnen<sup>33)</sup>. Äthyl-, Propyl- und Butylalkohole konnten gleichfalls aus dem Reaktionswasser abgetrennt werden.

Das R e s t g a s wurde als Heizgas für die Reinreinigung, Vorheizung, Destillation, Energieerzeugung, als Koksofenunterfeuerungsgas u.a.m. eingesetzt. Aufgrund der Tatsache, daß das Restgas schwefelfrei und daher wertvoller als Heizgas war, wäre es richtiger gewesen, es an Nickelkatalysatoren mit Wasserdampf zu frischem Synthesegas umzusetzen. Die Ausbeuten an  $\text{C}_3$ -Kohlenwasserstoffen je  $\text{Nm}^3$  Synthesegas hätten auf diese Weise beträchtlich erhöht werden können.

## 2.2.5 Betrachtungen über die Wirtschaftlichkeit der Kohlenwasserstoffsynthese

### 2.2.5.1 Energiebilanz

Bei der Energiebilanz ist zwischen dem Wirkungsgrad der Synthesereaktion, bei der in den gebildeten Kohlenwasserstoffen etwa 80% des Heizwertes der umgesetzten Gase enthalten sind, und dem einer Syntheseanlage zu unterscheiden. Tabelle 2-26 bringt Wärmebilanzen für die Treibstoffwerke der Essener Steinkohle und der Ruhrchemie AG aus dem Jahr 1942. Aus den Zahlen geht hervor, daß die Wärmewirtschaft noch nicht gut ausgebildet war. Trotz der hierin besseren Verhältnisse bei der Anlage der Essener Steinkohle betrug die Ver-

Tabelle 2-26: Wärmebilanz der Kohlenwasserstoff-Synthese<sup>20)</sup>

Treibstoffwerk	Essener Steinkohle				Ruhrchemie AG			
	Normaldruck	Normaldruck	Normaldruck	Mitteldruck	Normaldruck	Normaldruck	Normaldruck	Mitteldruck
Syntheseart	160,3	129,6	140,6					
Spezifische Ausbeute g/m <sup>3</sup> CO + H <sub>2</sub>								
	kcal/kg Primärprodukt %							
Wärmeeinbringen Koks	24078	43573	40164	80,3				
Koksofengas	11578	-	-	-				
Elektrische Energie	1037	1306	7616	15,2				
Dampf	1370	2145	2236	4,5				
Summe	38063	47024	50016	100,0	100,0	100,0	100,0	
Wärmeausbringen Primärprodukte	11260	11260	11260	22,5	24,1	11260	22,5	
Restgas	7627	6196	3775	7,6	13,2	3775	7,6	
Dampf	2210	2804	2804	5,6	6,0	2804	5,6	
Verluste	16966	26674	32177	64,3	56,7	32177	64,3	
Wärme im Primärprodukt %	29,6	24,0	22,5					
Ges.-Wärmeausbeute %	55,6	43,3	35,7					
Ges.-Kohlebedarf in kg zur Herstellung von 1 kg Primärprodukte	4,5	6,0	6,9					

luste noch ca. 44%, und nur 30% des Heizwertes der eingesetzten Rohstoffe fanden sich in den Primärprodukten wieder. Wegen der seinerzeitigen Verwendung von bei Atmosphärendruck arbeitenden Gaserzeugern und der deshalb notwendigen zusätzlichen Kompressionsenergie lagen die Wirkungsgrade beim Mitteldruckverfahren nicht höher. Für 1 t Primärprodukt wurden zwischen 4,5 und 7 t Kohle benötigt.

#### 2.2.5.2 Kosten

Als Beispiel für die Gesteungskosten der Kohlenwasserstoffsynthese sei eine Aufstellung der Essener Steinkohle für 1943 wiedergegeben (Tabelle 2-27), die für die Aufgliederung der Kosten einer Normaldruckanlage typisch war.

Die Verteilung der Kosten bei Anlagen der bis 1945 üblichen Größe mit Kobaltkatalysator ergibt sich aus Tabelle 2-28.

Tabelle 2-28: Verteilung der Kosten nach Kostenstellen; Angaben für 1942, Co-Katalysator

---

Gaserzeugung, Reinigung, Kompression	70-80%
Synthese und Kondensation	13-16%
Nachverarbeitung der Produkte	5-11%

Für eine Mitteldruckanlage mit 200 000 t/a an Kraftstoffen, allerdings mit Eisenkatalysator, hat Tramm<sup>34)</sup> eine Kostenverteilung auf die Kostenstellen in Abhängigkeit vom Kohlepreis errechnet (Abb. 2-20). Aus Tabelle 2-28 und Abb. 2-20 ist zu ersehen, daß die Kosten der Kohlenwasserstoffsynthese in erster Linie von den Kosten des Rohstoffes Kohle und dessen Vergasung abhängig sind. Demgegenüber traten die eigentlichen Synthesekosten weit zurück; dabei waren zunächst die Kosten für den Katalysator beachtlich, ließen sich aber durch Einführung der Mitteldrucksynthese herabsetzen.

Tabelle 2-27: Selbstkosten-Aufstellung des Treibstoffwerkes Essener Steinkohle für das Synthesepriärprodukt als Verkaufsprodukt<sup>20)</sup>

flüssige Produkte 6 583 291 kg/Monat  
 Treibgas 487 074 kg/Monat  
 = Gesamt-Priärprodukt 7 070 365 kg/Monat

	M e n g e n		Einzelpreis RM	K o s t e n	
	gesamt	je 100 kg Primärprod.		gesamt RM	je 100 kg Primärprod. RM
1) Einsatz Koks (kg WE) Kokereigas (m <sup>3</sup> , 4800 WE) O.H.	27168 t 18964100 m <sup>3</sup>	384 kg 268 m <sup>3</sup>	20.68/t 0.019/m <sup>3</sup>	561834.24 360317.90 922152.14	7.95 5.09 <u>13.04</u>
./. Restgasrückgabe (m <sup>3</sup> , 3900 o.H. WE) Sa.Einsatz	12665200 m <sup>3</sup>	179 m <sup>3</sup>	0.019/m <sup>3</sup>	240638.80 681513.34	3.40 <u>9.64</u>
2) Betriebskosten 20) Löhne u. Gehälter Löhne Gehälter	75830 Lohnstd.		0.85/std.	64455.42 8631.62	0.91 <u>0.12</u>
21) Energien Strom bezogen Strom erzeugt Dampf (3,5 atü) Heizgas (m <sup>3</sup> , WE) Speisewasser Frischwasser Kühlwasser Summe 21)	1569505 Kwh 1989562 Kwh 36563 t 1008400 m <sup>3</sup> 91052 m <sup>3</sup> 271781 m <sup>3</sup> 1684725 m <sup>3</sup>	22 Kwh 28 Kwh 0.5 t 14 m <sup>3</sup> 1.3 m <sup>3</sup> 3.8 m <sup>3</sup> 24 m <sup>3</sup>	0.02/Kwh 0.01/Kwh 1.67/t 0.013/m <sup>3</sup> 0.25/m <sup>3</sup> 0.08/m <sup>3</sup> 0.007/m <sup>3</sup>	32976.31 21541.59 81070.19 13109.20 23054.20 22167.63 13257.90 207177.02	0.47 0.30 0.86 0.19 0.33 0.31 0.19 <u>2.65</u>



Die Gesteungskosten in Abhängigkeit von der Anlagengröße hat gleichfalls Tramm untersucht (Abb. 2-21).

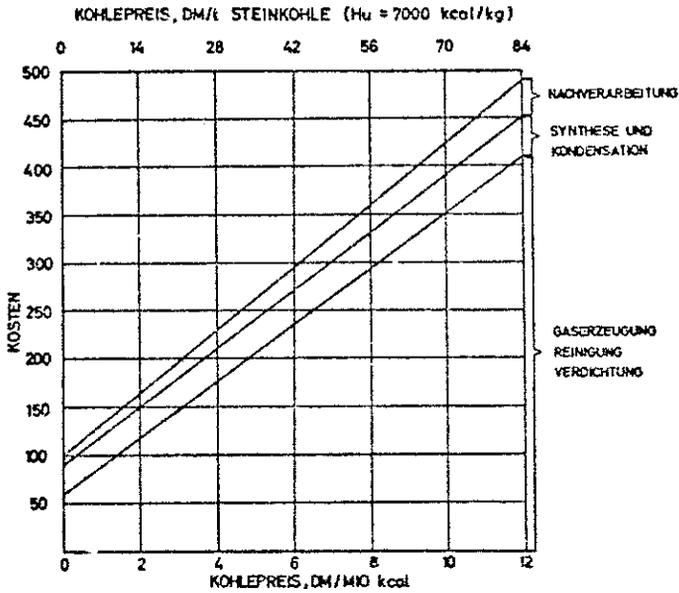


Abb. 2-20: Kostenverteilung auf Kostenstellen<sup>34)</sup>

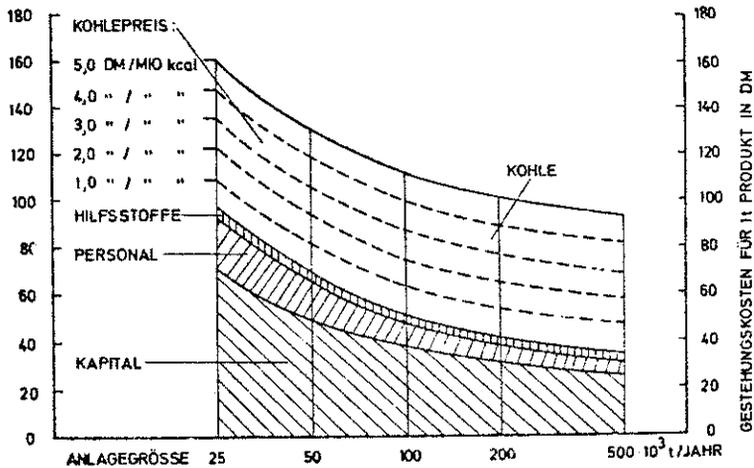


Abb. 2-21: Gliederung der Kosten der Fischer-Tropsch-Endprodukte in Abhängigkeit von der Anlagengröße nach Tramm<sup>34)</sup>

Im allgemeinen lagen die Gestehungskosten für 1 kg Rohprodukt zwischen 24 und 28 Pf. Die von der Essener Steinkohle erzielten niedrigeren Kosten rührten einmal von dem geringeren Kostenanteil des Synthesebetriebes her, der hohe spezifische Ausbeuten und lange Katalysatorlaufzeiten erreichte und das hochkalorige Restgas günstig gutgeschrieben erhielt, dann von der infolge der Verbundwirtschaft mit der Koks und Koksofengas liefernden Zeche relativ billigen Gaserzeugung.

Für die Investitionskosten läßt sich angeben, daß sie für Anlagen mit einer Erzeugung 100 000 Jahrestonnen bei 400-900 RM/jato Produkt lagen. Der Stahlbedarf betrug ca. 20 t/jato Produkt.

## 2.2.6 Literatur

- 1) P. Sabatier u. J.B. Senderens,  
C.R. hebdom. Séanc. Acad.Sci. 134, 514, 689 (1902)
- 2) BASF, DRP 293 787, 295 202, 295 203 (1913)
- 3) BASF, DRP 415 686, 41 433; FP 571 356, 580 905  
(1923); IG 580 695
- 4) F. Fischer u. H. Tropsch,  
Brennstoff-Chem. 4, 276 (1923);  
DRP 411 216 (1922)
- 5) F. Fischer u. H. Tropsch,  
Ber.Dtsch.Chem.Ges. 59, 830, 832 (1928)
- 6) F. Fischer u. H. Koch, Brennstoff-Chem. 13,  
61 (1932)
- 7) O. Roelen und W. Feisst,  
Brennstoff-Chem. 15, 187 (1937)
- 8) F. Fischer und H. Pichler,  
Brennstoff-Chem. 17, 24 (1936)
- 9) F. Fischer u. H. Pichler,  
Brennstoff-Chem. 20, 41, 221 (1939);  
DRP 731 295 (1936)
- 10) F. Fischer und H. Pichler,  
Abh. Kenntn. Kohle 13, 407 (1937/51)  
DBP 888 240 (1937), 888 841 (1937)
- 11) H. Pichler,  
Vortrag im KWI für Kohlenforschung, Mühlheim (Ruhr)  
am 10.9.1940
- 12) H. Kölbel, P. Ackermann, E. Ruschenburg, R. Langheim  
u. F. Engelhardt,  
Chemie-Ing.-Techn. 23, 153, 158 (1951)
- 13) FIAT-Rep., Sect.B. Item 24, Techn. Oil Mission,  
Reel 134;  
H. Pichler, "Advances in Catalysis" IV
- 14) Mitteilungen des Fachverb. Kohlechemie e.V., Essen,  
Erg. zum 6. Jahrgang, 1. Halbjahr 1957
- 15) z.B. Ruhrchemie AG, DBP 902 851 (1943)
- 16) H. Pichler,  
Brennstoff-Chem. 19, 226 (1938);  
H. Pichler u. H. Büffleb, Brennstoff-Chem. 21,  
257, 273, 285 (1940)
- 17) F. Fischer, Öl u. Kohle 39, 517 (1943);  
H. Pichler u. K.H. Ziesecke, Brennstoff-Chem. 30,  
13, 60, 81 (1949);  
H. Pichler, K.H. Ziesecke u. E. Titzenthaler,  
Brennstoff-Chem. 30, 333 (1949)

- 18) H. Pichler, Ges.Abh.Kenntn.Kohle 13, 425 (1937/51)
- 19) H. Pichler, Ges.Abh.Kenntn.Kohle 13, 440 (1937/51)
- 20) F. Martin u. E. Weingaertner "Die Fischer-Tropsch-Synthese" in Winnacker-Weingaertner "Chemische Technologie", Bd. III, 776-890, München, (1952)
- 21) z.B. H. Pichler, Ges.Abh.Kenntn.Kohle 13, 442 (1937/51);  
vgl. auch BIOS-Overall-Rep. No. 1, S. 99 (1947)
- 22) H. Pichler, Ges.Abh.Kenntn.Kohle 13, 443 (1937/51)
- 23) H. Pichler u. H. Schulz, Chem.Ing.Techn. 42, 1162 (1970)
- 24) D.F. Smith u. A.W. Francis, Ind.Eng.Chem. 19, 801 (1927)
- 25) vgl. hierzu H.H. Storch, H. Golumbic u. R.B. Anderson "The Fischer-Tropsch and Related Syntheses", Wiley, New York, 1951; R.B. Anderson in P.H. Emmett: "Catalysis", Bd. 4, Reinhold, New York 1958, S. 257
- 26) F. Fischer u. H. Tropsch, Brennstoff-Chem. 7, 97 (1926)
- 27) H. Pichler u. H. Buffleb, Brennstoff-Chem. 21, 280 (1940)
- 28) H. Pichler, B. Firnhaber, D. Kioussis u. A. Dawaller, Makromol.Chem. 70, 12 (1964)
- 29) Stud. Verw. Ges., DRP 651 462 (1935)
- 30) O. Roelen "Normaldrucksynthese", in Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, "Kohlenoxid-Hydrierung", Bd. 9, 706, München/Berlin/Wien, (1958)
- 31) H. Pichler u. O. Roelen "Mitteldrucksynthese" in Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, "Kohlenoxid-Hydrierung", Bd. 9, 707, München/Berlin/Wien, (1958)
- 32) BIOS-Overall Rep. No. 1, S. 82 ff (1947)
- 33) BIOS-Rep. No. 30, XXVII-69
- 34) H. Tramm, Chemie-Ing.-Techn. 24, 237 (1952)

3. EIGNUNG DER IN DER BUNDESREPUBLIK GEFÖRDERTEN  
KOHLEN ALS ROHSTOFF ZUR HERSTELLUNG FLÜSSIGER  
KRAFTSTOFFE  
=====

3.1 Kohlenvorräte der Bundesrepublik

- 3.1.1 Entstehung der Kohlenlagerstätten
- 3.1.2 Steinkohlenvorräte
  - 3.1.2.1 Ruhrrevier
  - 3.1.2.2 Saarrevier
  - 3.1.2.3 Aachener und niedersächsisches Revier
  - 3.1.2.4 Beurteilung der Steinkohlenvorräte
- 3.1.3 Braunkohlenvorräte

3.2 Eigenschaften der Kohlen

- 3.2.1 Charakterisierung der Kohlenarten
  - 3.2.1.1 Kohlenpetrographie
  - 3.2.1.2 Ballaststoffe
  - 3.2.1.3 Untersuchungsverfahren zur Kennzeichnung der Kohlen
- 3.2.2 Eigenschaften der Ruhrkohlen
- 3.2.3 Eigenschaften der Saarkohlen
- 3.2.4 Eigenschaften der rheinischen Braunkohlen

4.3 Eignung der Kohlen zur Erzeugung von Wasserstoff oder Synthesegas

- 3.3.1 Anforderungen an Kohlen zur Gaserzeugung
- 3.3.2 Steinkohle als Basis der Gaserzeugung
- 3.3.3 Braunkohle als Basis der Gaserzeugung

3.4 Eignung der Kohlen für die Hydrierung

- 3.4.1 Anforderungen an Kohlen für die Hydrierung
- 3.4.2 Steinkohle als Basis der Hydrierung
- 3.4.3 Braunkohle als Basis der Hydrierung

3.5 Verfügbarkeit der Kohlen

3.6 Literatur

### 3.1 Kohlenvorräte der Bundesrepublik

#### 3.1.1 Entstehung der Kohlenlagerstätten

Die fossilen Brennstoffe, Erdöl und Kohle, sind die Grundlage der heutigen Energiewirtschaft. Während die deutschen Erdölreserven, gemessen an dem Rohölbedarf, unbedeutend sind, stellen die Kohlenvorräte die wichtigsten Bodenschätze der Bundesrepublik dar.

Die Mineralkohlen sind, im Gegensatz zum Erdöl, das seinen Ursprung hauptsächlich in marinen Sedimenten von Mikroorganismen hat, aus Pflanzen entstanden. Die Umwandlung der Pflanzensubstanz zu Kohle bringt tiefgreifende chemische und physikalische Änderungen mit sich. Dieser Prozeß wird als Inkohlung bezeichnet. Die Ablagerung der ungeheuren Pflanzenmassen, die zur Bildung der teilweise mächtigen Kohlenflöze führten, erfolgte in Mooregebieten, deren Untergrund sich in dem Maße absenkte, wie pflanzliches Material sedimentiert wurde. Neben einer üppigen Vegetation war also eine Geosynclinale, ein Senkungsgebiet, notwendige Voraussetzung für die Entstehung der Lagerstätten. Die abgestorbenen Pflanzen vertorften unter der Wasseroberfläche. Bakterien und Pilze beeinflussten diese erste, die biologische Phase der Inkohlung. Sofern die Absenkung schneller erfolgte als die Ablagerung des Pflanzenmaterials, wurde das Moor überflutet und die Torfschicht wurde von Sedimenten aus Sand oder Ton überlagert. Unter der wachsenden Überdeckung wurde das Material verdichtet, der Wassergehalt nahm ab, und der Torf wurde in geologischen Zeiträumen in Braunkohle verwandelt<sup>1-4)</sup>.

Unter dem Einfluß der mit zunehmender Teufe ansteigenden Temperatur erfolgte in der zweiten, der geologischen Phase der Inkohlung, eine Metamorphose der Braunkohle über Glanzbraunkohle in Steinkohle. Dabei ging der Gehalt an Wasserstoff und Sauerstoff und damit auch an Flüchtigen Bestandteilen stetig zurück (s. Tab. 3-1). Der Grad der Inkohlung ist nach neuerer

Auffassung nur von der Temperatur abhängig, der die Kohle in geologischen Zeiträumen ausgesetzt war. Der Druck veränderte die physikalische Struktur der Kohle <sup>4)</sup>.

Tabelle 3-1: Inkohlungsreihe <sup>1)</sup>

Brennstoffart	Flüchtige Bestandteile % (i.waf)	Kohlenstoff % (i.waf)	Wasserstoff % (i.waf)
Holz	ca. 80	ca. 50	ca. 6
Torf	65-70	55-60	ca. 6
Braunkohle	65-45	60-75	6,0-5,8
Flammkohle	45-40	75-82	6,0-5,8
Gasflammkohle	40-35	82-85	5,8-5,6
Gaskohle	35-28	85-87,5	5,6-5,0
Fettkohle	28-19	87,5-89,5	5,0-4,5
EBkohle	19-14	89,5-90,5	4,5-4,0
Magerkohle	14-10	90,5-91,5	4,0-3,75
Anthrazit	< 10	> 91,5	< 3,75
Graphit	-	100,0	-

### 3.1.2 Steinkohlenvorräte

Steinkohle wird in der Bundesrepublik in den Revieren an Ruhr und Saar, um Aachen und in Niedersachsen gefördert. Die größten Kohlevorräte liegen im Ruhrgebiet, die ebenso wie die Vorkommen bei Aachen und Ibbenbüren ein Teil des nordwesteuropäischen Kohlegürtels sind.

#### 3.1.2.1 Ruhrrevier

Im Ruhrrevier ist das flözführende Oberkarbon etwa 2 900 m mächtig, es umfaßt ca. 80 Flöze aller Steinkohlenarten von der jungen Flammkohle bis zum Anthrazit. Die Schichten, die am Südrand des Reviers zutage treten, fallen nach Norden ein und sind am Nordrand der durch Bohrungen erschlossenen Zone bereits

von 1 000 m mächtigen Deckgebirgen überlagert <sup>5)</sup>. Die gesamten Kohlenvorräte können grob auf 500 bis 1 000 Mrd t geschätzt werden <sup>6)</sup>. Diese Zahlen sind jedoch nur von theoretischem Interesse, da der weitaus größte Teil der Vorräte in Teufen liegt, die in absehbarer Zeit für den Bergbau unerschließbar sind.

Die Schätzungen des Bundesbeauftragten für den Steinkohlenbergbau umfassen daher lediglich die sicher bauwürdigen Vorräte der Schachtbauzone bis zur nächsten geplanten Hauptfördersohle der einzelnen Schachtanlagen, die mit 5,4 Mrd t verwertbarer Förderung angegeben werden. Neben diesen weitgehend erschlossenen Vorkommen werden die wahrscheinlich bauwürdigen Vorräte der Schachtbauzone zwischen der nächsten geplanten Hauptfördersohle und 1 500 m Teufe und die Vorräte der Schachtreservefelder bis zur gleichen Endteufe mit zusammen 7,3 Mrd t angegeben. Im Jahr 1969 betrug die mittlere gebaute Flözmächtigkeit im Ruhrgebiet 1,39 m ohne Berge und Nachfallpacken, die mittlere Förderteufe 746 m <sup>7)</sup>.

### 3.1.2.2 Saarrevier

Das Saarrevier ist die zweitgrößte Kohlenlagerstätte der Bundesrepublik. Die sicher bauwürdigen Vorräte an jungen, gasreichen Steinkohlen des Oberkarbon werden auf 663 Mio t beziffert, während die wahrscheinlich bauwürdigen Vorkommen bis 1 500 m Teufe einschl. der Schachtreservefelder auf 2,2 Mrd t geschätzt werden. Im Jahre 1969 betrug die mittlere gebaute Flözmächtigkeit an der Saar 1,63 m, die mittlere Förderteufe 535 m <sup>7)</sup>.

### 3.1.2.3 Aachener und niedersächsisches Revier

Für das Aachener Revier, in dem die Flamm- und Gasflammkohlen fehlen, werden die entsprechenden Vorräte auf 265 bzw. 658 Mio t geschätzt. Hier lag 1969 die mittlere gebaute Flözmächtigkeit bei 1,09 m, die mittlere Förderteufe bei 618 m <sup>7)</sup>.