

### 2.1.5.2 Produkte der Gasphase-Hydrierung

Die Tabellen 2-10 und 2-11 enthalten Daten über Kraftstoffe, die in deutschen Hydrierwerken gewonnen wurden. Auch hier zeigt sich, daß für die Zusammensetzung des Produktes die Beschaffenheit des Rohstoffes von Wichtigkeit ist. Benzin aus Braunkohle enthält mehr Paraffine als solches aus Steinkohle, ebenso ist der bei 300 at erzeugte Dieselkraftstoff aus Braunkohle paraffinreicher und damit zündwilliger als jener aus Steinkohle. Höherer Druck bei der Herstellung wirkt sich günstig auf die Cetanzahl aus.

Tabelle 2-10: Benzin aus der Gasphase-Hydrierung deutscher Hydrierwerke <sup>20)</sup>

Werk Einsatzprodukt		Leuna: Braunkohle, Braunkohlen- schwelteer	Scholven: Steinkohle	Gelsenberg: Steinkohle
<u>Verfahrensdruck</u>				
Flüssigphase	at	250	300	700
Gasphase	at	250	300	300
<u>Benzin</u>				
Dichte bei 15°C, g/cm <sup>3</sup>		0,719	0,738	0,740
<u>Siedepunkt</u>				
Anfang	°C	45	44	46
Ende	°C	139	156	151
<u>Zusammensetzung</u>				
Paraffine	%	51,5	37,5	36,5
Olefine	%	1,0	1,0	0,5
Naphthene	%	38,0	53,0	54,0
Aromaten	%	8,5	8,5	9,0
Motor-Oktanzahl (MOZ) ohne Bleitetraäthyl		71	73	73

Tabelle 2-11: Dieselkraftstoff aus der Gasphase-Hydrirung deutscher Hydrirwerke;  
WS<sub>2</sub>-Katalysator 20)

Verfahrensdruck Einsatz	200-300 at		600 at	
	Braunkohle	Steinkohle	Braunkohle	Steinkohle
Dichte bei 20°C, g/cm <sup>3</sup>	0,827	0,876	0,802	0,829
Anilin-Punkt °C	60	42,5	72,8	65,4
Cetan-Zahl	55	45	75	72
Siedepunkt				
Anfang °C	---	198	193	196
Ende °C	304	305	271	290
Pourpoint °C	-23	---	-50	-68
Viskosität °E bei 38°C	1,10	1,14	1,00	1
Heizwert kcal/kg	---	---	10 349	10 304
Wasserstoffgehalt (Gew.%)	---	---	14,5	14,0

Tabelle 2-12 gibt einen Vergleich der Eigenschaften von Autobenzinen, die nach verschiedenen Verfahren der Gasphase-Hydrierung aus dem gleichen Steinkohlemittelöl erhalten wurden. Die Bildung von Aromaten bei der Aromatisierung drückt sich in den Werten des spezifischen Gewichtes und der Oktanzahl deutlich aus.

Tabelle 2-12: Eigenschaften von Autobenzinen aus Steinkohlemittelöl 21)

Katalysator	Benzinierung			Aromatisierung $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-V}_2\text{O}_5$ auf A-Kohle
	Vorhydr. $\text{WS}_2$ ; Benzin. $\text{WS}_2$	Vorhydr. $\text{WS}_2$ ; Benzin. $\text{WS}_2$ auf Bleicherde	Vorhydr. $\text{WS}_2\text{NiS}$ auf Tonerde; Benzin. $\text{WS}_2$ auf Bleicherde	
Dichte bei 15°	0,735	0,745	0,770	0,830
Oktanzahl ROZ	67	75	78	95
MOZ	66,5	74	75	83

Tabelle 2-13 bringt eine Zusammenstellung der Qualität von Flugbenzinen vom Typ OZ 87 aus verschiedenen Hydrierwerken.

Tabelle 2-13: Flugbenzine vom Typ OZ 87 aus verschiedenen Hydrierwerken 22)

	Leuna	Scholven	Gelsenberg	Pölitz
Spez. Gewicht bei 15°C	0,719	0,738	0,740	0,730
ASTM-Siedekurve:				
Beginn °C	45	44	46	44
bis 70°C %	25	16	15	16
bis 100°C %	67	56	58	61
bis 120°C %	89	77	78	84
bis 150°C %	--	93	96	97
Endpunkt °C/%	139/98	156/98	151/98	152/98
Dampfdruck at	0,39	0,47	0,50	0,47
Zusammensetzung:				
Paraffine %	51,5	37,5	36,5	48,5
Naphthene %	38	53	54	43
Aromaten %	8,5	8,5	9	7,5
Ungesättigte %	1	1	0,5	1
MOZ	71	73	73	72
MOZ (0,12% TEL)	90	91	91	91

Tabelle 2-14 bringt Angaben über Flugbenzine aus Steinkohle-Mittelöl, die durch Benzinierung, Aromatisierung oder durch Kombination von Benzinierung und DHD-Verfahren sowie von Aromatisierung und DHD-Verfahren gewonnen wurden.

Tabelle 2-14: Vergleich von Flugbenzinen aus Steinkohle-Mittelöl 23)

Verfahrenstyp	Benzi- nierung	Aromati- sierung		Benzinier. + DHD	Aromatis. + DHD
		300 at	700 at		
Spez. Gewicht bei 15°C	0,730	0,806	0,780	0,785	0,844
Aromaten + Olefine (Vol.%)	8	50	39	50	83
Gesamtbenzin					
MOZ 73	73	80	79	84,5	92
MOZ 91 (0,12% TEL)	91	91	91	94,5	100
Restbenzin MOZ (aromatenfrei)	--	65	69	75	72

Die Gase aus der Gasphasebehandlung enthielten mehr C<sub>3</sub>- und C<sub>4</sub>-Kohlenwasserstoffe und mehr i-Butan als die aus der Sumpfphase.

In Tabelle 2-15 werden Betriebsdaten für zwei repräsentative Hydrierwerke, dem Hydrierwerk Wesseling, Union Rheinische Braunkohlen-Kraftstoffe AG und dem Hydrierwerk Gelsenberg Benzin AG, mitgeteilt.

Tabelle 2-15:

Betriebsdaten der Hydrierwerke Wesseling, 25) und Gelsenberg Benzin AG 1943  
 Kraftstoffe 24) aus dem Jahre 1943

	Wesseling	Gelsenberg
Anfahrtermin:	1941	1939
Kapazität:	260 000 jato	400 000 jato
Max. Produktion: (1943)	39 400 t Autobenzin 93 200 t Flugbenzin 72 800 t Dieselmotorkraftstoff 21 100 t Treibgas <u>226 500 t Kraftstoffe</u> 1 000 t Phenole	331 500 t Benzin (ohne Blei MOZ = 73) ca. 100 000 t Treibgas ca. 431 500 t Kraftstoffe
Rohstoffe:	78% Braunkohle 67,8% C; 5,1% H; 25,3% O; 1,1% N; 0,75% S; 6,0% Asche; 7,5% Wasser und 22% Mittelöle	Ruhrkohle (83% C i.waf); 4-5% Asche; 8% Wasser
Wasserstoff- herstellung:	a) Aus Wassergas aus BK-Briketts 47 500 Nm <sup>3</sup> /h b) Aus Wassergas aus Methan und nied- rig siedenden Kohlenwasserstof- fen <u>36 500 Nm<sup>3</sup>/h</u> 84 000 Nm <sup>3</sup> /h	a) Aus Wassergas (Koks) 100 000 Nm <sup>3</sup> /h b) Aus Schwachgas durch Linde-Zerle- gung 15 000 Nm <sup>3</sup> /h c) Von Bunawerk Hüls 15 000 Nm <sup>3</sup> /h d) Aus Hydrierabgas <u>55 000 Nm<sup>3</sup>/h</u> 135 000 Nm <sup>3</sup> /h
	Konvertierung über FeCr-Oxid, CO <sub>2</sub> - und CO-Wäsche, Verdichtung auf 325 at, Nachverdichtung auf 700 at	Wassergaskonvertierung mit FeCr-Oxid, CO <sub>2</sub> - und CO-Wäsche, Verdichtung auf 325 at, Nachverdichtung auf 700 at

	Wesseling	Gelsenberg
<u>Hydrierung:</u>		
<u>Sumpffphase</u>		
- Einsatz	Brei aus 36% Reinkohle, 5% Roterz + 1,25% Schwefel als Katalysator, 1,4 t/m <sup>3</sup> /h	Brei aus 45% Kohle, 3% Katalysator (1,2% Ferrosulfat, 1,5% Bayermasse, 0,3% Natriumsulfid), 0,9 t/m <sup>3</sup> /h eingesetzt
- Betriebsdaten	4 Kammern mit je 4 Reaktoren von zusammen 32 m <sup>3</sup> Reaktionsraum/Kammer, mittl. Reaktionsdruck 650 at, mittl. Wasserstoffdruck 475 at, mittl. Reaktionstemperatur 475°C	6 Kammern mit je 4 Reaktoren, 36 m <sup>3</sup> Gesamtreaktionsraum je Kammer, mittl. Reaktionsdruck 650 at, mittl. Wasserstoffdruck 560 at, Reaktionstemperatur 475-480°C
- Wasserstoffverbrauch	rd. 1 850 Nm <sup>3</sup> /t Mittelölneubildung (0,265 t/m <sup>3</sup> /h)	rd. 1 900 Nm <sup>3</sup> /t Mittelölneubildung (0,225 t/m <sup>3</sup> /h)
- Produkte	40% Mittelöl, Kp < 348°C 60% Rückstand, Kp > 340°C Mittelöl: 15,4% Phenole, Dichte/20°C 0,927 Zusammensetzung nach Entphenolierung: 62,5% Aromaten, 17,2% Olefine, 11,1% Paraffine, 9,2% Naphthene	10% Benzin (bis 155°C) + 90% Mittelöl (bis 325 bzw. 340°C); (0,253 t/m <sup>3</sup> /h) Mittelöl (220-327°C): Phenole 12,9%, Dichte 0,979, Anilinpunkt -31°C. Nach Entphenolierung: Dichte 0,968, Anilinpunkt -29°C, Ungesättigte 13,0%
<u>Gasphase</u>		
- Vorhydrierung	2 Einheiten mit je 1 Reaktor mit Kat. 5058 + 2 Reaktoren mit Kat. 7846 W und 1 Einheit mit 1 Reaktor mit Kat. 5058 + 1 Reaktor mit Kat. 7846 W; Reaktionsgesamtvolumen 64 m <sup>3</sup>	4 Kammern mit je 3 Reaktoren von zusammen 24 m <sup>3</sup> Reaktionsraum je Kammer, Katalysatoren für Reaktor 1 + 2 meist 5058, für Reaktor 3 meist 8376

(Fortsetzung Tabelle 2-15)

	Wesseling	Gelsenberg																								
- Benzinierung	1 Einheit mit 5 Reaktoren mit Kat. 6434; Reaktionsvolumen 40 m <sup>3</sup>	3 Kammern mit je 3 Reaktoren mit Kat. 6434																								
- Druck, Temp.	325 at, 410-425°C	325 at, 390-440°C																								
- Wasserstoffverbrauch	Vorhydrierung 390 Nm <sup>3</sup> /t Einsatz, Benzinierung 230 Nm <sup>3</sup> /t Einsatz	ca. 900 Nm <sup>3</sup> /t Flugbenzin (für Vorhydrierung 600, für Benzinierung 300 Nm <sup>3</sup> /t Einsatz)																								
- Produkte	Benzin (bis 180°C) Vorhydrierung 0,28 t/m <sup>3</sup> /h Benzinierung 0,71 t/m <sup>3</sup> /h a) <u>Vorhydrierung:</u> Einsatz: Mittelöl aus Sumpffphase Produkt Benzin bis 180°C <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>Dichte g/cm<sup>3</sup></td> <td>0,825</td> <td>0,765</td> </tr> <tr> <td>Phenole %</td> <td>0,03</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>-180°C %</td> <td>38</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Aromaten %</td> <td>15,0</td> <td>8,4</td> </tr> <tr> <td>Olefine %</td> <td>2,0</td> <td>1,9</td> </tr> <tr> <td>Naphthene %</td> <td>29,4</td> <td>30,4</td> </tr> <tr> <td>Paraffine %</td> <td>53,6</td> <td>59,3</td> </tr> <tr> <td>MOZ</td> <td></td> <td>60,5</td> </tr> </table>	Dichte g/cm <sup>3</sup>	0,825	0,765	Phenole %	0,03	-	-180°C %	38	-	Aromaten %	15,0	8,4	Olefine %	2,0	1,9	Naphthene %	29,4	30,4	Paraffine %	53,6	59,3	MOZ		60,5	a) <u>Vorhydrierung:</u> Einsatz: ca. 10% Benzin (bis 155°C) + 90% Mittelöl (155-340°C), Dichte 0,940, Schwefel 0,35%  Produkt: ca. 25-40% Benzin (bis 155°C), Dichte ca. 0,74 je nach Katalysator, Rest Mittelöl, Dichte ca. 0,81; Durchsatz 0,6-0,8 t/m <sup>3</sup> /h,  b) <u>Benzinierung:</u> Einsatz: ca. 65% Mittelöl aus Vorhydrierung + 35% Rückführmittelöl (Siedende 290°C), Dichte 0,855, Anilinpunkt 47-50°C
Dichte g/cm <sup>3</sup>	0,825	0,765																								
Phenole %	0,03	-																								
-180°C %	38	-																								
Aromaten %	15,0	8,4																								
Olefine %	2,0	1,9																								
Naphthene %	29,4	30,4																								
Paraffine %	53,6	59,3																								
MOZ		60,5																								

(Fortsetzung Tabelle 2-15)

	Wesseling	Gelsenberg
	<p>Produkt: Dichte 0,724 Fraktion bis 100°C % 49,0 Aromaten % 6,1 Olefine % 1,9 Naphthene % 43,5 Paraffine % 48,5 MOZ 73,3</p>	<p>Produkt: ca. 60-65% Benzin (bis 155°C), Durchsatz 0,9-1,1 t/m<sup>3</sup>/h, Dichte 0,740, Siedekurve Beginn °C 46 - 70°C % 15 - 100°C % 58 - 120°C % 78 - 150°C % 96 Endpunkt °C/% 151/98 Dampfdruck, at 0,50 Paraffine % 36,5 Naphthene % 54 Aromaten % 9 Olefine % 0,5 MOZ 73</p>
Nachverar- beitung:	DHD-Anlage geplant, Alkylierungs- anlage für hochoktanigen Kraft- stoff erstellt, jedoch noch keine Produktion	Keine DHD-Anlage, zeitweilige Aromati- sierung
Wasserstoff- verbrauch für Fertigprodukt:	2 400 Nm <sup>3</sup> /t Autobenzin	2 650 Nm <sup>3</sup> /t Autobenzin



2.1.6 Wirtschaftlichkeit der Kohlehydrierung vor 1945

Die Kosten der Produkte ergeben sich aus den Kosten der für den Prozeß eingesetzten Roh- und Hilfsstoffe (Kohle bzw. Teer, Wasserstoff und Katalysator) und von den Betriebskosten, die weitgehend vom gewünschten Endprodukt abhängen, sowie der Amortisation der Anlagen und den Erlösen für Nebenprodukte. Einen wesentlichen Anteil, etwa 70% an den Einsatzkosten und etwa 50% an den Endkosten, hatte der Wasserstoff. Tabelle 2-16 enthält eine Zusammenstellung des Wasserstoffverbrauchs für die Herstellung verschiedener Endprodukte aus verschiedenen Einsatzprodukten.

Tabelle 2-16: Wasserstoffverbrauch für verschiedene Rohstoffe und Endprodukte <sup>18)</sup>

Rohstoff	Endprodukt	H <sub>2</sub> -Verbrauch m <sup>3</sup> /t Endprodukt
Steinkohle (SK)	Autobenzin (OZ 70)	28800
Braunkohle (BK)	"	2 400
Kokereiteer	"	2 100
SK-Urteer	"	1 300
BK-Schwelteer	"	850
Erdölrückstand	"	900
Gasöl	"	500
Steinkohle	Heizöl u. Autobenzin	2 100
Braunkohle	Dieselöl	1 900
Erdölrückstand	"	500
Braunkohlen- schwelteer	Dieselöl-Schmieröl- Paraffin (TTH)	550

Tabelle 2-17 gibt für die Produktion von 200 000 jato Autobenzin Rohstoff- und Wasserstoffverbrauch sowie das erforderliche Reaktionsvolumen, das sich in den Investitionskosten auswirkt, wieder.

Tabelle 2-17: Rohstoff- und Wasserstoffverbrauch sowie Reaktionsvolumen für 200 000 jato Autobenzin (OZ 70) aus verschiedenen Rohstoffen <sup>26)</sup>

	Verbrauch an Rohstoff t/t Benzin	Verbrauch an Wasserstoff t/t Benzin	Wasserstoff 3 Nm <sup>3</sup> /h	Reaktionsvolumen				
				Sumpphase	Vorhydrierung	Benzinierung	Gesamt	
Rohbenzin	1,01	0,002	500	--	10	--	10	
Erdöl-Mittelöl	1,06	0,032	9 000	--	18	30	48	
Kokerei-Mittelöl	1,07	0,097	27 000	--	45	32	77	
Braunkohlenteer (einschließl. Leichtöl)	1,20	0,081	23 000	42	45	30	117	
Erdölrückstand (mit 11% H <sub>2</sub> )	1,26	0,073	20 500	50	18	31	99	
Kokereiteer	1,28	0,176	50 000	68	34	32	134	
Braunkohle (mitteldeutsch)	2,07	0,198	55 000	84	35	46	165	
Steinkohle (Ruhr, 700 at)	1,63	0,236	66 000	105	34	25	164	
Steinkohle (Ruhr, 300 at)	1,77	0,258	72 000	168	34	25	227	

Die Herstellung der gleichen Menge Flugbenzin hätte ca. 20% mehr Wasserstoff und ein um etwa 20% größeres Reaktionsvolumen erfordert. Die Gewinnung von Autobenzin und Dieselöl allein hätten den Wasserstoffverbrauch um etwa 25% herabgesetzt. Außerdem hätte in diesem Falle eine Kombination von Sumpffase-Hydrierung und Vorhydrierung den damaligen Anforderungen an die Qualität von Benzin und Dieselöl genügt.

Außerst wichtig für die Wirtschaftlichkeit war die Bereitstellung von billigem Wasserstoff. Da bei der Kohlehydrierung kein besonders reiner Wasserstoff erforderlich war, konnte nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten entschieden werden, ob reiner Wasserstoff oder billigere wasserstoffreiche Gase einzusetzen seien und in diesem Falle damit verbundene zusätzliche Kosten - für Kompression, höheren Arbeitsdruck und Auswaschen - in Kauf genommen werden sollten. Der durchschnittliche Preis des Wasserstoffs zur Kohlehydrierung lag bei 42-45 RM/1 000 Nm<sup>3</sup>.

Ein weiterer wichtiger Kostenfaktor waren die Anlagekosten. Abb. 2-9 gibt die Kosten für die Anlage eines Werkes zur Erzeugung von 200 000 jato Autobenzin, einmal nur mit Verwertung des Benzins, dann auch des entstandenen C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>-Anteils als Treibgas. Angegeben sind Gesamtzahlen einschließlich der Kosten für Energieerzeugung und -verteilung, Nebenanlagen und Kapitalbeschaffung. Ergänzend sei hinzugefügt, daß im Apparatebau der Preisindex, der die Anlagekosten derartiger Werke weitgehend bestimmt ist, von dem für 1938 mit 100 angesetzten Wert auf 250 im Jahre 1958 und 530 im Jahre 1970 gestiegen ist.

Über die Herstellungskosten für Benzin liegen recht unterschiedliche Angaben vor, z.B. für Leuna 190 RM/t, für Gelsenberg dagegen 244 RM/t. Der niedrige Preis für Leuna ist durch die geringeren Amortisationskosten - die Anlagen waren z.T. bereits 1927 erstellt - bedingt.

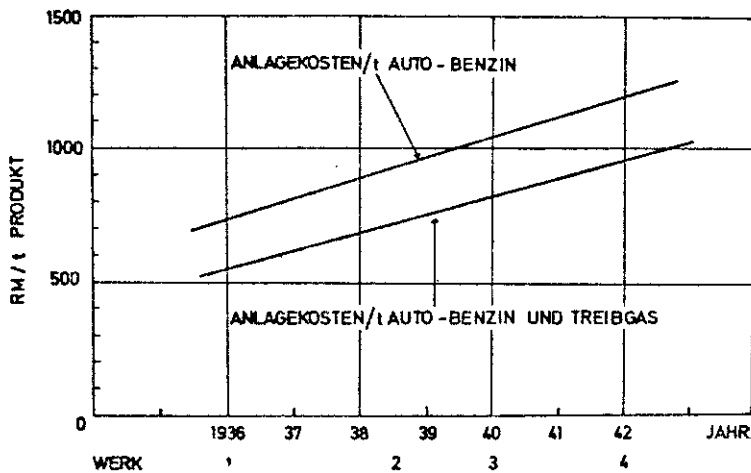


Abb. 2-9: Gesamtanlagekosten in den Baujahren 1936-1942, bezogen auf eine Anlage für 200 000 jato Auto-benzin (OZ 70) aus Steinkohle 18)

Sehr wichtig bei der Beurteilung von Zahlenangaben der Literatur ist die Tatsache, daß manche Werke mit einem vom Staat garantierten Preis der Endprodukte von 240 RM/t Benzin, andere aber mit einer vom Staat garantierten Verzinsung des investierten Kapitals von 5% arbeiteten.

Tabelle 2-18 gibt am Beispiel zweier Werke eine Aufschlüsselung der Herstellungskosten des Benzins. Erwähnt sei, daß damals Erdölbenzin 0,06 RM/Liter kostete.

Tabelle 2-19 zeigt die technisch möglichen und wirtschaftlich vertretbaren Variationsmöglichkeiten der Produktverteilungen einer Anlage, geplant für 400 000 jato Autobenzin bzw. für 200 000 jato Autobenzin und 200 000 jato Heizöl nach dem Stand der 40er Jahre.

Tabelle 2-18: Herstellungskosten für Autobenzin (OZ 70)

Werk	Steinkohlehydrierung Gelsenberg		Braunkohle- und Teerhydrierung Leuna	
	Menge	Preis/Einheit   RM/t Benzin	Menge	Preis/Einheit   RM/t Benzin
Rohstoff				
Stein-/Braunkohle	1,84 t	21,50 RM/t   39,50	4,47 t	3,-- RM/t   13,43
Teer			0,22 t	80,-- RM/t   17,24
Wasserstoff	2 800 m <sup>3</sup>	- ,038 RM/m <sup>3</sup>   10€,--	2 220 m <sup>3</sup>	- ,042 RM/m <sup>3</sup>   93,27
Katalysatoren		5,--   130,26		6,32   95,84
		150,50   100,--		
Spesen				15,75   241,85
Amortisation		60,--   310,50		
Gutschriften				28,20
Flüssiggas	0,23 t	200,-- RM/t   46,--	0,17 t	170,-- RM/t   4,36
Äthan			0,04 t	110,-- RM/t   19,14
Heizgas	3 400 m <sup>3</sup>	- ,006 RM/t   20,40	2 735 m <sup>3</sup>	- ,007 RM/t   190,15
Gesamtkosten				
RM/t Benzin		244,10		- ,14
RM/l Benzin		- ,18		

Tabelle 2-19: Möglichkeiten der Variation der Produktionskapazität einer Anlage für die Hydrierung bituminöser Steinkohle mit der Art der Produkte 28)

Produkt	Kapazität in 1 000 jato							
	Planung	Alternativen			Planung	Alternativen		
		1	2	3		1	2	3
Autobenzin	400	-	164	-	200	-	127	-
Flugbenzin	-	360	-	200	-	180	-	134
Dieselöl	-	-	252	186	-	-	78	54
Heizöl	-	-	-	-	200	200	200	200
Summe	400	360	416	386	400	380	405	388

Abb. 2-10 vermittelt einen zusammenfassenden Überblick in Form einer Energiebilanz. Um beispielsweise aus Steinkohle 1 kg Fertigprodukt, bestehend aus 0,8 kg Benzin + Dieselöl und 0,2 kg Flüssiggas herzustellen, waren insgesamt 3,6 kg Kohle nötig. Von dieser Menge wurden 1,25 kg zur Hydrierung, 1,36 kg zur Wasserstofferzeugung und 1 kg zur Energieerzeugung verbraucht.

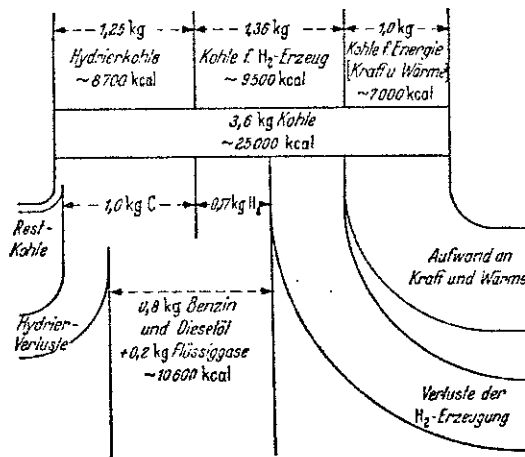


Abb. 2-10: Energiebilanz der Steinkohlehydrierung 29)