

9. Bestimmung des Heizwertes von Kohle

Man unterscheidet bei der Angabe des Heizwertes einen unteren und oberen Heizwert je nach dem Aggregatzustand des bei der Verbrennung der Kohle entstehenden Wassers. Nach Aufhäuser "Vorlesungen über Brennstoffkunde" versteht man unter dem (unteren) Heizwert der Kohle "die in WE (K cal) angegebene Wärmemenge, die von 1 kg Kohle bei vollkommener Verbrennung zu Kohlensäure und Wasserdampf entwickelt wird". Dies ist bei allen technischen Feuerungen mit einer Rauchgasabgangstemperatur von mehr als 100° der Fall. Bei der kalorimetrischen Heizwertbestimmung dagegen tritt das Verbrennungswasser flüssig auf. Man bestimmt in diesem Falle den oberen Heizwert. Der Unterschied zwischen beiden ist also gleich der Verdampfungswärme des Verbrennungswassers und beträgt (auf Reinkohle berechnet) bei den Steinkohlen etwa 250 -- 300 WE. Praktisch ausnutzbar ist nur der untere Heizwert (Hu). Man erhält ihn aus dem oberen Heizwert (Ho) durch Subtraktion der Verdampfungswärme des Wassers.

Zur Bestimmung des oberen Heizwertes wird die Kohle in einer kalorimetrischen Bombe mit Sauerstoff verbrannt. Aus der eingetretenen Temperaturerhöhung des Wassers und dem vorher ermittelten Wasserwert des Kalorimeters wird der Heizwert berechnet. Zur Verbrennung der Kohle bedient man sich der Berthelot-Mahler'schen Verbrennungsbombe. Diese sowie das Verbrennungskalorimeter sind in dem Handbuch der chemisch-technischen Untersuchungsmethoden von Lunge-Berl 7. Aufl. 1921 Bd. I, S. 431 ff. ausführlich beschrieben, so daß an dieser Stelle darauf verzichtet werden kann.

1. Bestimmung des Wasserwertes (Wärmekapazität) des Kalorimeters.

Der Wasserwert des Kalorimeters ist numerisch gleich der Wärmekapazität, d.h. der Wärmemenge in WE, die nötig ist, um das gesamte System um genau 1° zu erwärmen. Er setzt sich aus der Wärmekapazität der genau bestimmten Wassereinwage und der Wärmekapazität der einzelnen Apparate Teile zusammen.

Die Bestimmung erfolgt entweder auf elektrischem Wege, indem man eine genau gemessene Strommenge durch einen Widerstand im Kalorimeter leitet, wobei die gesamte Stromarbeit

in Wärme verwandelt wird, oder durch Verbrennung einer chemischen Substanz von bekannter Verbrennungswärme. Diese Methode verdient insofern den Vorzug, als sie unter denselben Bedingungen erfolgt, wie sie später bei der eigentlichen Heizwertbestimmung angewandt werden, und die somit gleichsam eine "umgekehrte Heizwertbestimmung" darstellt. Im einzelnen sei wegen der Ausführung des Versuchs auf die nachfolgende Beschreibung einer Heizwertbestimmung verwiesen. Als Präparate mit genau bekannter Verbrennungswärme kommen vor allem in Betracht:

Benzoessäure	=	6323 WE/kg	(s. Landolt-Börnstein, 2. Erg. Bd. S. 1642 (1931)).
Naphtalin	=	9614 WE/kg	(s. L. B. 1. Erg. Bd. S. 867 (1927))
Campher	=	9273 WE/kg	(s. L. B. II. Bd. S. 1599 (1923)).
Rohrzucker	=	3955 WE/kg	(s. L. B. II. Bd. S. 1600 (1923). 1. Erg. Bd. S. 872 (1927)).

Diese werden eigens für diesen Zweck von E. Merck und auch von C.A.F. Kahlbaum in den Handel gebracht.

Es ist zu beachten, daß der Temperaturunterschied, den man misst, wie bei jeder Heizwertbestimmung nicht über 2° betragen soll. Selbstverständlich ist die Bestimmung des Wasserwertes mit derselben Genauigkeit und Sorgfalt und unter genau denselben Bedingungen durchzuführen, wie sie sich später bei der eigentlichen Heizwertbestimmung ergeben.

Berechnung. Ist ΔT die gemessene Temperaturerhöhung, a die angewandte Substanzmenge in g, Qs die bekannte Verbrennungswärme der Substanz in WE/kg und Qd die Verbrennungswärme des Zünddrahtes, so ist der

$$\text{Wasserwert} = \frac{a \cdot Q_s + Q_d}{\Delta T} \text{ WE pro } 1^\circ$$

<u>Beispiel:</u>	Angewandt:	a = 1,1624 g	Rohrzucker
	Wassermenge	= 2800,0 g	
	Verbrennungswärme	Qs = 3955 WE/kg	(Rohrzucker)
	Zünddraht (18 mg)	Qd = 29 WE	(1g = 1600 WE)
Gefunden:	ΔT	= 1,439°	(korr.)
	Wasserwert	= $\frac{1,1624 \cdot 3955 + 29}{1,439}$	WE
	Wasserwert	= 3215 WE	

d.h. Bei einer Wärmezufuhr von 3215 WE wird das ganze System um genau 1° erwärmt.

Da genau 2800 g Wasser eingewogen worden waren, so setzt sich der Wasserwert des Kalorimeters aus dem Wasserwert der Wassereinwage (2800 WE) und dem Wasserwert der Apparattenteile (= $3215 - 2800 = 415$ WE) zusammen. Der Wasserwert des Kalorimeters ist, wie man sieht, um so genauer, je kleiner der Anteil des Materials gegenüber dem Anteil des Wassers ist. Denn infolge der geringen spezifischen Wärme der Apparattenteile (etwa 0,1 gegen Wasser = 1) bedingen geringe stoffliche oder gewichtsmäßige Veränderungen der Apparattenteile keinen nennenswerten Unterschied im Wasserwert. Die Wärmekapazität des Wassers soll mindestens 80 % des Gesamtwasserwerts betragen (in obigem Beispiel beträgt sie 87,1 %)

Die Bestimmung des Wasserwerts ist von Zeit zu Zeit zu wiederholen, mindestens aber nach jeder grösseren Reparatur oder nach dem Einsetzen eines Ersatzteils.

2. Bestimmung des oberen Heizwertes (Ho).

Man füllt zunächst das Wassergefäß längere Zeit vor dem eigentlichen Versuch mit der gleichen wie bei der Wasserwertbestimmung angewandten Menge Wasser (auf 1 g genau gewogen) und sorgt durch Einschalten des Rührwerks für gleichmäßigen Temperaturübergang. Da die Temperaturerhöhung bei einer Verbrennung etwa 2° beträgt, so temperiert ^{man} das Wasser im Kalorimeter so, daß es etwa $1-2^{\circ}$ kälter ist als das Wasser im umgebenden Mantel. Durch die Verbrennung ist dann das Wasser etwas wärmer als die Füllung des Wassermantels, so daß man auf diese Weise eine sehr kleine Korrektur für den Wärmeaustausch mit der Umgebung sowie einen sehr ruhigen und gleichmäßigen Gang des Thermometers erhält.

Dann presst man sich aus der fein gepulverten (unter 0,1 mm) und vorher nochmals getrockneten Kohle mittels der Pastillenpresse eine gleichmäßige, etwa 0,8 - 1 g schwere Pastille, in die man einen dünnen eisernen Zünddraht gleich mit hineinpresst. Als solchen verwendet man reinsten Eisendraht (Klavierdraht) von etwa 18 cm Länge und einem Gewicht von 18-20 mg, dessen mittleres Stück in einer Länge von etwa 6 cm zu einer feinen Spirale (um einen feinen Glasstab herum) aufgerollt ist, die so in die Kohlenpastille eingepresst

wird, daß nur die beiden Enden des Drahtes herausragen. Bei aschereichen Kohlen stößt das Formen der Pastille mitunter auf Schwierigkeiten. In diesem Falle verwendet man die Kohle als loses Pulver und legt den Zünddraht so an das Pulver, daß er es eben berührt. Nachdem Pastille und Draht in dem Quarzverbrennungsschälchen genau gewogen worden sind, hängt man das Schälchen in die Bombe und verbindet die Enden des Zünddrähtchens mit den Elektroden für die Stromzuführung. Darauf wird die Bombe geschlossen und mit Sauerstoff gefüllt, wobei man anfangs das Ausgangsventil etwas entlastet, um die Luft aus der Bombe austreten zu lassen. Nach der Auffüllung mit Sauerstoff (25-30 Atm.) setzt man die völlig geschlossene Bombe in das Kalorimeter, wobei (schon bei der Wasserwertbestimmung) darauf zu achten ist, daß die Kontakte aus dem Wasser herausragen. Undichtigkeiten in der Dichtung zwischen Bombendeckel und Becher erkennt man an den aufsteigenden Gasblasen im Wasser.

Nun überläßt man das Kalorimeter unter dauerndem Rühren während einiger Minuten sich selbst, bis sich der größte Wärmeaustausch vollzogen hat, und beobachtet den Temperaturgang, bis dieser nur noch geringe konstante Differenzen anzeigt. Jetzt wird mit dem eigentlichen Versuch begonnen, der in eine Vorperiode, eine Hauptperiode und eine Nachperiode zerfällt. ~~Am Ende der Vorperiode erfolgt die Zündung auf~~ elektrischem Wege, wobei die Kohle verbrennt und die frei werdende Wärmemenge einen entsprechenden Anstieg des Thermometers bedingt. Die Beobachtung der Vor- und Nachperiode dient zur Berechnung der Korrektur für den Wärmeaustausch mit der Umgebung. Zur Temperaturmessung verwendet man ein Quecksilberthermometer, das von 14-23° geht und in 1/100 Grade eingeteilt ist. Die 1/1000 Grade lassen sich beim Ablesen mit der Lupe bequem schätzen. Vorteilhaft verwendet man auch ein Beckmannsches Thermometer mit unbestimmter Gradeinteilung. Man liest nun das Thermometer von Minute zu Minute (Stoppuhr) auf 0,001° ab, notiert diese Werte als Vorperiode und führt dies etwa 5-6 Minuten lang durch, mindestens aber solange, bis der Temperaturanstieg annähernd konstant ist. Dan erfolgt am Ende einer Minute die Zündung,

mit der die Hauptperiode einsetzt. Der Quecksilberfaden des Thermometers steigt jetzt schnell, während man weiter alle Minuten auf 0,01 Grad angenähert abliest, bis das Thermometer nur noch einen schwachen Gang hat, was nach etwa 5 Minuten der Fall ist. Jetzt ist das Wasser in der Regel wärmer als seine Umgebung. Sobald der Temperaturabfall einsetzt schließt man die Nachperiode an, wobei man die Temperaturablesung während 5-10 Minuten alle Minuten bis zur konstanten Temperaturdifferenz fortsetzt. (auf 0,001° genau).

Damit ist der Versuch beendet. Man nimmt nun die Bombe aus dem Kalorimeter und bestimmt zur Berechnung des unteren Heizwertes (s. unten) das gebildete Verbrennungswasser. Will man darauf verzichten, so braucht man die Bombe nur auszublasen und zu reinigen, um sie für eine neue Bestimmung gebrauchsfertig zu machen.

Berechnung: Da nach der Definition der Wasserwert ^{die} Wärmemenge in WE ist, die einen Temperaturanstieg des ^{Kalo-}rimeterwassers um 1° bedingt, so ist:

$$\text{Oberer Heizwert} = \frac{\text{Wasserwert} \cdot \Delta T - Q_d}{\text{Einwage der Kohle}} \quad \text{WE/kg}$$

ΔT = beobachteter Temperaturanstieg (korr)

Q_d = Verbrennungswärme des Zünddrahtes
(für 1 g Draht = 1600 WE)

Beispiel: $\text{Wasserwert} = 3215 \text{ WE}$

Tiegel + Kohle + Zünddraht	= 5,3415 g
Tiegel (leer)	= 4,5332 g
Kohle + Zünddraht	= 0,8083 g
Angewandt: 18 mg Zünddraht	= 0,0180 g
Einwage: Kohle	= 0,7903 g
Gefunden: $\Delta T = 1,815^\circ$ Temperaturdifferenz (korr.)	

$$\text{Oberer Heizwert} = \frac{3215 \cdot 1,815 - 29}{0,7903} = 7347 \text{ WE.}$$

$$\text{Ho} = 7347 \text{ WE/kg (in trockener Kohle).}$$

=====

Wegen des Wärmeaustausches des Kalorimeters mit seiner Umgebung bedarf die beobachtete Temperaturerhöhung ($u_2 - u_1$) noch einer besonderen Korrektion k.

Ist

- u_1 = Anfangstemperatur der Hauptperiode
- u_2 = Endtemperatur der Hauptperiode
- u_3 = Endtemperatur der Nachperiode
- $u_2 - u_1$ = beobachtete Temperaturerhöhung (unkorr.)
- ΔT = beobachtete Temperaturerhöhung (korr.)
- n_3 = Anzahl Minuten der Nachperiode
- v_2 = Mittlerer Wärmeaustausch während der Nachperiode (Grad pro Minute)
- n_1 = Anzahl Minuten der Hauptperiode
- n_2 = Anzahl Minuten der Hauptperiode, nach denen die mittlere Temperatur der Hauptperiode praktisch am nächsten erreicht ist
- T_1 = Mittlere Temperatur der Hauptperiode
- k = der gesuchte Korrektionsfaktor

so gilt: $\Delta T = u_2 - u_1 + k$

Der Korrektionsfaktor k wird dann auf Grund folgender Beziehungen berechnet:

$$v_2 = \frac{u_2 - u_3}{n_3}; \quad k = v_2 \cdot (n_1 - n_2);$$

$$T_1 = \frac{u_1 + u_2}{2};$$

Beispiel:

Vorperiode			Hauptperiode			Nachperiode		
Minuten	Temp. °C	Bez.	Minuten	Temp. °C	Bez.	Minuten	Temp. °C	Bez.
0	21,602		7)	22,47	$\frac{u_1+u_2}{2}$	12)	23,392	
1	604		8)	23,21	22,506	13)	384	
2	606		9)	23,36		14)	376	
3	608		10)	23,395		15)	368	
4	610		11)	23398	u_2	16)	360	
5	612					17)	352	
6	21,614	u_1				18)	344	
						19)	336	
						20)	23,328	u_3

Am Ende der 6. Minute wurde gezündet, der Höchstwert der Temperatur war bei 23,398° erreicht; damit dauerte die Hauptperiode 5, die Nachperiode 9 Minuten. Demnach ist:

Beobachtete Temperaturerhöhung (unkorr.) = $u_2 - u_1 = 23,398 - 21,614 = 1,784^\circ$.

Mittlerer Wärmeaustausch während der Nachperiode = $v_2 = \frac{u_2 - u_3}{n_3} = \frac{23,398^\circ - 23,328^\circ}{9} = 0,0078^\circ$.

Mittlere Temperatur der Hauptperiode = $T_1 = \frac{u_1 + u_2}{2} = \frac{21,614^\circ + 23,398^\circ}{2} = 22,506^\circ$.

T_1 war praktisch nach der 7. Minute, also nach $n_2 = 1$ Minute der Hauptperiode erreicht. Demnach:

$k = v_2 \cdot (n_1 - n_2) = 0,0078 \cdot (5 - 1) = 0,0312^\circ$ und

$\Delta T = u_2 - u_1 + k = 1,784 + 0,031 = 1,815^\circ$.

Die korrigierte Temperaturerhöhung beträgt also:

$\Delta T = 1,815^\circ$

Für Betriebsuntersuchungen genügt diese vereinfachte Berechnung der Korrektur für die Wärmestrahlung vollkommen. Für genaue Berechnungen sei für obiges Beispiel jedoch die Bestimmung der korrigierten Temperaturdifferenz nach den Angaben von Ostwald-Luther, Physico-chemische Messungen, 4. Aufl. S. 365 (1925) durchgeführt.

Beispiel:

Vorperiode			Hauptperiode			Nachperiode		
Minuten	Temp. °C	Bez.	Minuten	Temp. °C	Bez.	Minuten	Temp. °C	Bez.
0	21,602	t_1	7	22,47		12	23,392	
1	604		8	23,21		13	384	
2	606		9	23,36		14	376	
3	608		10	23,395		15	368	
4	610		11	23,398	t_2'	16	360	xx)
5	612					17	352	
6	21,614	t_1				18	344	
						19	336	
						20	328	t_2

x) $n_1 = 6$

xx) $n_2 = 9$

- 8 -

Nach dem Newtonschen Abkühlungsgesetz ist die Temperaturabnahme $-dt$ eines Systems proportional seinem Temperaturüberschuss gegen seine Umgebung $t-t_0$ ($t_0 =$ Temperatur der Umgebung) und proportional dem Zeitabschnitt, während dessen dieser Überschuss besteht. Das führt zur Differentialgleichung:

$$-dt = \alpha \cdot (t - t_0) \cdot dz$$

oder
$$\frac{dt}{dz} = -\alpha \cdot (t - t_0)$$

Für die Vor- und Nachperiode berechnet sich der mittlere Wärmeaustausch (v_1 bzw. v_2) des Kalorimeters mit seiner Umgebung (in Grad pro Minute) wie folgt:

$$t_1 = \text{Endtemperatur der Vorperiode}$$

$$t_1' = \text{Anfangstemperatur der Vorperiode}$$

$$t_2 = \text{Endtemperatur der Nachperiode}$$

$$t_2' = \text{Anfangstemperatur der Nachperiode}$$

$$n_1, n_2 = \text{Minutenzahl der Vor- bzw. Nachperiode.}$$

$$\text{Vorperiode: } v_1 = \frac{t_1 - t_1'}{n_1} = \frac{21,614 - 21,602}{6} = +0,002^\circ$$

$$\text{Nachperiode: } v_2 = \frac{t_2 - t_2'}{n_2} = \frac{23,328 - 23,398}{9} = -0,0078^\circ$$

und ebenso die mittlere Temperatur T_1 bzw. T_2 der Vor- bzw. Nachperiode wie folgt:

$$\text{Vorperiode: } T_1 = \frac{t_1 + t_1'}{2} = \frac{21,614 + 21,602}{2} = 21,608^\circ$$

$$\text{Nachperiode: } T_2 = \frac{t_2 + t_2'}{2} = \frac{23,328 + 23,398}{2} = 23,363^\circ$$

Dann ist nach dem Newtonschen Gesetz:

$$v_1 = -\alpha \cdot (T_1 - T_0) \quad v_2 = -\alpha \cdot (T_2 - T_0)$$

$\alpha =$ Abkühlungsfaktor; $T_0 =$ Umgebungstemperatur, d.h. die Temperatur, bei der kein Wärmeaustausch stattfinden würde.

Daraus ergibt sich für den Abkühlungsfaktor:

$$\alpha = \frac{v_2 - v_1}{T_1 - T_2} = \frac{-0,0078 - 0,002}{21,608 - 23,363} = \frac{0,0098}{1,755} = 0,005584$$

$$\alpha = 0,005584$$

T_0 ist daher: $T_0 = T_1 + \frac{v_1}{\alpha}$; oder $T_0 = T_2 + \frac{v_2}{\alpha}$; bzw. läßt sich nach den Formeln:

$$T_0 = \frac{v_2 \cdot T_1 - v_1 \cdot T_2}{v_2 - v_1} \quad \text{oder}$$

$$T_0 = \frac{T_1 + T_2}{2} + \frac{1}{2\alpha} \cdot (v_1 + v_2)$$

berechnen. Umgebungstemperatur $T_0 = 21,966^\circ$.

Mit Hilfe des Abkühlungsfaktors α und der Umgebungstemperatur T_0 lässt sich jetzt die Korrektur berechnen, die man an der Temperaturerhöhung $t_2' - t_1$, die durch den eigentlichen Versuch (Hauptperiode) bedingt ist, anzubringen hat. Für die Hauptperiode rechnet man nun für jeden einzelnen Zeitabschnitt dz (1 Minute) aus der Newtonschen Gleichung mittels $\alpha + T_0$ sowie mit der mittleren Temperatur in dem Zeitabschnitt dz aus, welchen Betrag man dt zuzufügen oder (bei Wärmezufuhr von außen) abzuziehen hat. Die Summe aller dieser Größen zwischen den Zeiten $z_1 + z_2$ gibt die Gesamtkorrektur, die an der in diesem Zeitintervall entstandenen Gesamttemperaturänderung anzubringen ist. Dann ist der Korrekturfaktor k (allgemein)

$$k = -\alpha \cdot \int_{z_1}^{z_2} (t - T_0) \cdot dz, \text{ in diesem Falle:}$$

$$k = -\alpha \cdot \int_{t_1}^{t_2'} (t - T_0) \cdot dz, \text{ wobei } t \text{ die mittlere Temperatur innerhalb einer Minute}$$

der Hauptperiode ist.

Es ist also z.B. für $dz = 7-6'$

$$k = -0,005584 \cdot \left(\frac{21,614 + 22,47}{2} - 21,966 \right) \\ = -0,005584 \cdot 0,076 = -0,000424.$$

Auf diese Weise berechnet man die einzelnen Werte für k für jede Minute, woraus sich der Endwert für k durch Mitteln der einzelnen Werte ergibt. So lässt sich folgende Tabelle aufstellen:

Zeit	Mittlere Temp. t	Wärmeaustausch $-\alpha \cdot (t - 21,966)$
7. Minute	22,042°	-0,005584 · 0,076 = 0,000424
8. "	22,84°	-0,005584 · 0,874 = 0,004880
9. "	23,285°	-0,005584 · 1,319 = 0,007365
10. "	23,378°	-0,005584 · 1,412 = 0,007885
11. "	23,397°	-0,005584 · 1,431 = 0,007991

$$k = (22,988 - 21,966) \cdot -0,005584 \cdot 5 = -0,005584 \cdot 5,112 = -0,02855$$

- 10 -

Der Korrektionsfaktor k ist also $-0,029^\circ$, d.h. infolge des Wärmeaustausches ist die Temperaturdifferenz $t_2' - t_1$ um $0,029^\circ$ niedriger, als dies der Fall gewesen wäre, wenn kein Wärmeaustausch zwischen Kalorimeter und Umgebung stattgefunden hätte. Ohne Wärmeaustausch wäre die Temperatur also um $0,029^\circ$ höher gewesen, so daß die korrigierte Temperaturdifferenz

$$t_2' - t_1 + k = 23,398 - 21,614 + 0,029^\circ =$$

$$\underline{\underline{1,813^\circ \text{ ist}}}$$

3. Bestimmung des unteren Heizwertes (Hu)

Soll auch der untere Heizwert bestimmt werden, so nimmt man die Bombe nach der Verbrennung aus dem Kalorimeter, setzt sie in ein Öl- oder Paraffinbad und schließt ein in bekannter Weise vorbereitetes frisches Chlorcalciumröhrchen an. Nun leitet man den Gasinhalt der Bombe unter seinem eigenen Druck durch das Chlorcalciumröhrchen und treibt die letzten Reste des Verbrennungswassers schließlich durch Erhitzen des Heizbades auf $105-110^\circ$ und Durchleiten eines vorher sorgfältig getrockneten Stickstoff- oder Sauerstoffstromes über. Durch Wägen des Chlorcalciumröhrchens vor und nach dem Versuch ergibt sich die bei der Verbrennung gebildete Wassermenge aus der Gewichtszunahme.

Berechnung: Nach der Definition errechnet sich der untere Heizwert aus dem oberen Heizwert durch Subtraktion der Verdampfungswärme Q des Verbrennungswassers, d.h.

$$Hu = Ho - Q$$

Die Verdampfungswärme des Wassers von 20° beträgt $586 \text{ cal}/\text{g}$ (Landolt-Börnstein II. Erg. Bd. S. 1484 [1937]) Demnach ist die Verdampfungswärme des Verbrennungswassers

$$Q = \text{gef. g H}_2\text{O} \cdot 586 \text{ cal}$$

und auf 1 kg der angewandten trockenen Kohle bezogen:

$$Q = \frac{\text{gef. g H}_2\text{O} \cdot 586}{\text{Einwage Kohle}} \quad \text{WE}$$

Demnach ist:

$$Hu = Ho - \frac{\text{gef. g H}_2\text{O} \cdot 586}{\text{Einwage Kohle}} \quad \text{WE (in trockener Kohle)}$$

Beispiel: (vgl. die Bestg. des oberen Heizwerts)

Angewandt: 0,7903 g trockene Kohle.

CaCl ₂ -Röhrchen mit Wasser	38,8341 g
" " ohne "	<u>38,4789 g</u>
Gewichtszunahme = Wasser =	0,3552 g
Ober-er Heizwert =	7347 WE

$$Hu = 7347 - \frac{0,3552 \cdot 586}{0,7903} = 7347 - 264 = 7083$$

Unterer Heizwert = 7083 WE/kg (in trockener Kohle).

Zur Umrechnung auf Reinkohle hat man die Werte für Ho + Hu

mit $\frac{100}{100 - \text{Asche}} = \frac{100}{100 - 13,82} = 1,1604$ zu multiplizieren.

Man erhält dann als Heizwert für die Reinkohle:

Ho	=	8525 WE
Hu	=	8219 WE
<hr/>		
Ho - Hu	=	306 WE
=====		

~~Der untere Heizwert lässt sich für Betriebsuntersuchungen mit hinreichender Genauigkeit auch rechnerisch bestimmen.~~

~~Nach W. Gumz (Feuerungstechnik 19,1 (1931); C.1931,II, 518) ist nämlich die Differenz zwischen oberem und unterem Heizwert:~~

$$\Delta = Ho - Hu$$

~~eine Funktion des Gehalts der Reinkohle an flüchtigen Bestandteilen (= v)~~

~~$$\Delta = 20,54 \cdot v - 0,3444 \cdot v^2 \text{ WE}$$~~

~~Die Differenz nimmt mit dem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen zunächst zu (Δ_{max} etwa 306 WE bei 30 % fl. Best.) und dann wieder ab. Diese Werte berücksichtigen, da sie für Reinkohle gelten, natürlich nur das Verbrennungswasser, nicht jedoch die in der Rohkohle vorhandene Feuchtigkeit.~~

Beispiel: Aus der kalorimetrischen Heizwertbestimmung wurde berechnet:

Ho	=	8525 WE) in Reinkohle
Hu	=	8219 WE	
gef.	=	306 WE	

Gehalt der Reinkohle an fl. Best. = 30,45 %

$$\Delta = 20,54 \cdot 30,45 - 0,3444 \cdot 30,45^2 = 306,1 \text{ WE}$$

ber. Δ = 306 WE

ber. Hu = 8219 WE

=====

Umrechnungsformeln für die Kohle
in verschiedenem Zustand.

1.	Gegeben: in trockener Kohle	Gesucht: in Rohkohle	Gesucht: in Reinkohle
Wasser	$(H_2O_{Ro}) = 5,80 \%$	--	--
Asche	$A_{tr} = 13,82 \%$	$= A_{tr} \cdot \frac{100 - H_2O_{Ro}}{100} \%$	--
flücht. Bestd- teile	$fl. B_{tr} = 26,24 \%$	$= fl. B_{tr} \cdot \frac{100 - H_2O_{Ro}}{100} \%$	$= fl. B_{tr} \cdot \frac{100}{100 - A_{tr}} \%$
Oberer Heizwert	$Ho_{tr} = 7347 \text{ WE}$	$= Ho_{tr} \cdot \frac{100 - H_2O_{Ro}}{100} \text{ WE}$	$= Ho_{tr} \cdot \frac{100}{100 - A_{tr}} \text{ WE}$
Unterer Heizwert	$Hu_{tr} = 7083 \text{ WE}$	$= Hu_{tr} \cdot \frac{100 - H_2O_{Ro} - 6H_2O_{(Ro)}}{100} \text{ WE}$	$= Hu_{tr} \cdot \frac{100}{100 - A_{tr}} \text{ WE}$

Beispiel: Gegeben $H_2O_{Ro} = 5,80 \%$ und die obigen Werte
für trockene Kohle.

	<u>Gesucht für</u> Rohkohle	Reinkohle
Wasser =	5,80 %	--
Asche =	$13,82 \cdot \frac{100 - 5,80}{100} = 13,02 \%$	--
flücht. Bestd- teile	$26,24 \cdot \frac{100 - 5,80}{100} = 24,72 \%$	$= 26,24 \cdot \frac{100}{100 - 13,82} = 30,45 \%$
Oberer Heizwert	$= 7347 \cdot \frac{100 - 5,80}{100} = 6921 \text{ WE}$	$= 7347 \cdot \frac{100}{100 - 13,82} = 8525 \text{ WE}$
Unterer Heizwert	$= 7083 \cdot \frac{100 - 5,80}{100} - 35 = 6637 \text{ WE}$	$= 7083 \cdot \frac{100}{100 - 13,82} = 8219 \text{ WE}$

2.	Gegeben: in Rohkohle	Gesucht: in trockener Kohle	Gesucht: in Reinkohle
Wasser	$H_2O_{Ro} = 5,80 \%$	--	--
Asche	$A_{Ro} = 13,02 \%$	$= A_{Ro} \cdot \frac{100}{100 - H_2O_{Ro}} \%$	--
flücht. Bestd- teile	$fl.B_{Ro} = 24,72 \%$	$= fl.B_{Ro} \cdot \frac{100}{100 - H_2O_{Ro}} \%$	$= fl.B_{Ro} \cdot \frac{100}{100 - H_2O_{Ro} - A_{Ro}} \%$
Oberer Heizwert	$Ho_{Ro} = 6921 \text{ WE}$	$= Ho_{Ro} \cdot \frac{100}{100 - H_2O_{Ro}} \text{ WE}$	$= Ho_{Ro} \cdot \frac{100}{100 - H_2O_{Ro} - A_{Ro}} \text{ WE}$
Unterer Heizwert	$Hu_{Ro} = 6637 \text{ WE}$	$= (Hu_{Ro} + 6 \cdot H_2O_{Ro}) \cdot \frac{100}{100 - H_2O_{Ro}} \text{ WF}$	$= (Hu_{Ro} + 6 \cdot H_2O_{Ro}) \cdot \frac{100}{100 - H_2O_{Ro} - A_{Ro}} \text{ WE}$

Beispiel: Gegeben: Die obigen Werte für Rohkohle.

	Gesucht für trockene Kohle	Reinkohle
Wasser =	--	--
Asche =	$13,02 \cdot \frac{100}{100 - 5,80} = 13,82$	--
flücht. Bestd- teile =	$24,72 \cdot \frac{100}{100 - 5,80} = 26,24 \%$	$24,72 \cdot \frac{100}{100 - 5,80 - 13,02} = 30,45 \%$
Oberer Heizwert =	$6921 \cdot \frac{100}{100 - 5,80} = 7347 \text{ WE}$	$6921 \cdot \frac{100}{100 - 5,80 - 13,02} = 8525 \text{ WE}$
Unterer Heizwert =	$(6637 + 35) \cdot \frac{100}{100 - 5,80} = 7083 \text{ WE}$	$(6637 + 35) \cdot \frac{100}{100 - 5,80 - 13,02} = 8219 \text{ WE}$

3.

	Gegeben: in Reinkohle	Gesucht: in trockener Kohle	Gesucht: in Rohkohle
Wasser	$(H_2O_{Ro} = 5,80 \%)$	--	$= H_2O_{Ro} \text{ (gegeben)}$
Asche	$(A_{Ro} = 13,02 \%$ $A_{tr} = 13,82 \%)$	$= A_{tr} \text{ (gegeben)}$	$= A_{Ro} \text{ (gegeben)}$
flücht. Best- teile	$fl.B_{Rei} = 30,45 \%$	$= fl.B_{Rei} \cdot \frac{100-A_{tr}}{100} \%$	$= fl.B_{Rei} \cdot \frac{100-H_2O_{Ro}-A_{Ro}}{100} \%$
Oberer Heizwert	$Ho_{Rei} = 8525 \text{ WE}$	$= Ho_{Rei} \cdot \frac{100-A_{tr}}{100} \text{ WE}$	$= Ho_{Rei} \cdot \frac{100-H_2O_{Ro}-A_{Ro}}{100} \text{ WE}$
Unterer Heizwert	$Hu_{Rei} = 8219 \text{ WE}$	$= Hu_{Rei} \cdot \frac{100-A_{tr}}{100} \text{ WE}$	$= Hu_{Rei} \cdot \frac{100-H_2O_{Ro}-A_{Ro}}{100} - 6 \cdot H_2O_{Ro} \text{ WE}$

Beispiel: Gegeben: $H_2O_{Ro} = 5,80 \%$; $Asche_{Ro} = 13,02 \%$
 $Asche_{tr} = 13,82 \%$
 und die obigen Werte für Reinkohle.

	Gesucht für Trockene Kohle	Gesucht für Rohkohle
Wasser	--	5,80 %
Asche	13,82 %	13,02 %
flücht. Best- teile	$= 30,45 \cdot \frac{100-13,82}{100} = 26,24 \%$	$= 30,45 \cdot \frac{100-5,80-13,02}{100} = 24,72 \%$
Oberer Heizwert	$= 8525 \cdot \frac{100-13,82}{100} = 7347 \text{ WE}$	$= 8525 \cdot \frac{100-5,80-13,02}{100} = 6921 \text{ WE}$
Unterer Heizwert	$= 8219 \cdot \frac{100-13,82}{100} = 7083 \text{ WE}$	$= 8219 \cdot \frac{100-5,80-13,02}{100} - 6 \cdot 5,80 = 6637 \text{ WE}$

In obigen Formeln bedeutet:

H_2O_{Ro}			Wassergehalt in der Rohkohle
A_{Ro}	A_{tr}		Asche in der Roh- und trockenen Kohle
$fl.B_{Ro}$	$fl.B_{tr}$	$fl.B_{Rei}$	Gehalt an fl. Bestd. in Roh-, trockener- und Reinkohle
Ho_{Ro}	Ho_{tr}	Ho_{Rei}	Oberer Heizwert " " " "
Hu_{Ro}	Hu_{tr}	Hu_{Rei}	Unterer Heizwert " " " "

Die obige Kohle liefert demnach folgende Analysenzahlen:

	Rohkohle	trockene Kohle	Reinkohle
Wasser	5,80 %	--	--
Asche	13,02 %	13,82 %	--
flüchtige Bestdteile	24,72 %	26,24 %	30,45 %
Oberer Heizwert	6921 WE	7347 WE	8525 WE
Unterer Heizwert	6637 WE	7083 WE	8219 WE