Bestimmung von Nullstellen mit Tabellenkalkulation in Anwendung des Newton'schen Näherungsverfahrens

Christian Strutz[*]

Einleitung

Fast unbemerkt hat in den letzten Jahrzehnten eine Revolution der Computertechnik stattgefunden. War es noch vor zwanzig Jahren ein Privileg, einen Personal Computer (PC) zu besitzen, der mit einer Festplatte mit 20-30 Megabyte Speicherkapazität ausgestattet war, so ist es heute nichts besonderes mehr, einen hochfrequenten PC mit 20-30 Gigabyte auf der Festplatte zu haben. In vielen Büros und Haushalten befinden sich deshalb ungeahnt riesige Computer-kapazitäten, die wir für unsere eigene Kreativität nutzen könnten.

Der vorliegende Beitrag will zeigen, dass jeder Anwender eines zeitgemäßen Personal Computers, der über ein Programm mit Tabellenkalkulation (z.B. EXCEL) verfügt, ohne Programmier- und Zeitaufwand mit höchster Genauigkeit das Newton'sche Verfahren der Nullstellen-Approximation einsetzen kann, wie dies früher, vor etwa 30 Jahren, nur den Rechenzentren vorbehalten war.

Somit ist es heute jedem, besonders aber Studenten der Kollegstufe möglich, ein durchschaubares System einer automatisierten Kurvendiskussion höherer Polynome selbst zu entwickeln. Denn wichtiger als das Ergebnis ist für den denkenden Menschen der Weg dorthin.

Soft- und Hardware

Die Entwicklung und Anwendung der Algorithmen erfolgte in LOTUS 1-2-3, Version 2.3 (1988). Da die übrigen Programme mit Tabellenkalkuation die Konzeption von LOTUS zur Basis haben, besteht der Vorteil, dass die einmal in LOTUS geschriebenen Formeln für EXCEL jeder Version kompatibel sind.

Die **C**entral **P**rocessing **U**nit (CPU) war ein Pentium 100 MHz Prozessor mit 8 Megabyte **R**andom **A**ccess **M**emory (RAM). Zum Zeitvergleich wurde auch ein 486er Laptop Computer verwendet. Mit beiden Systemen wurde das erstellte Spreadsheet auch von einer Diskette aus gelesen: in keiner der 4 Varianten zeigte sich ein wahrnehmbarer Unterschied in der Rechnergeschwin-digkeit, d.h. der Zeitunterschied zwischen Dateneingabe und -ausgabe war geringer als eine Sekunde.

Das Newton'sche Verfahren der Nullstellen-Approximation

Für Lösungen, d.h. Wurzeln oder Nullstellen, von Gleichungen höheren Grades als des dritten kommt nach Kühlein (1942)[1] zunächst nur das zeichnerische Verfahren, ausgehend von einer graphischen Darstellung einer Funktion, in Betracht. Wegen der geringen Genauigkeit von Zeichnungen ist es aber notwendig, die aus dem Graph abgelesenen Werte der Nullstellen zu korrigieren. Ein sehr wirksames Verfahren hierfür hat, wie es Kühlein in seinem Repetitorium beschreibt, Isaac Newton entwickelt.

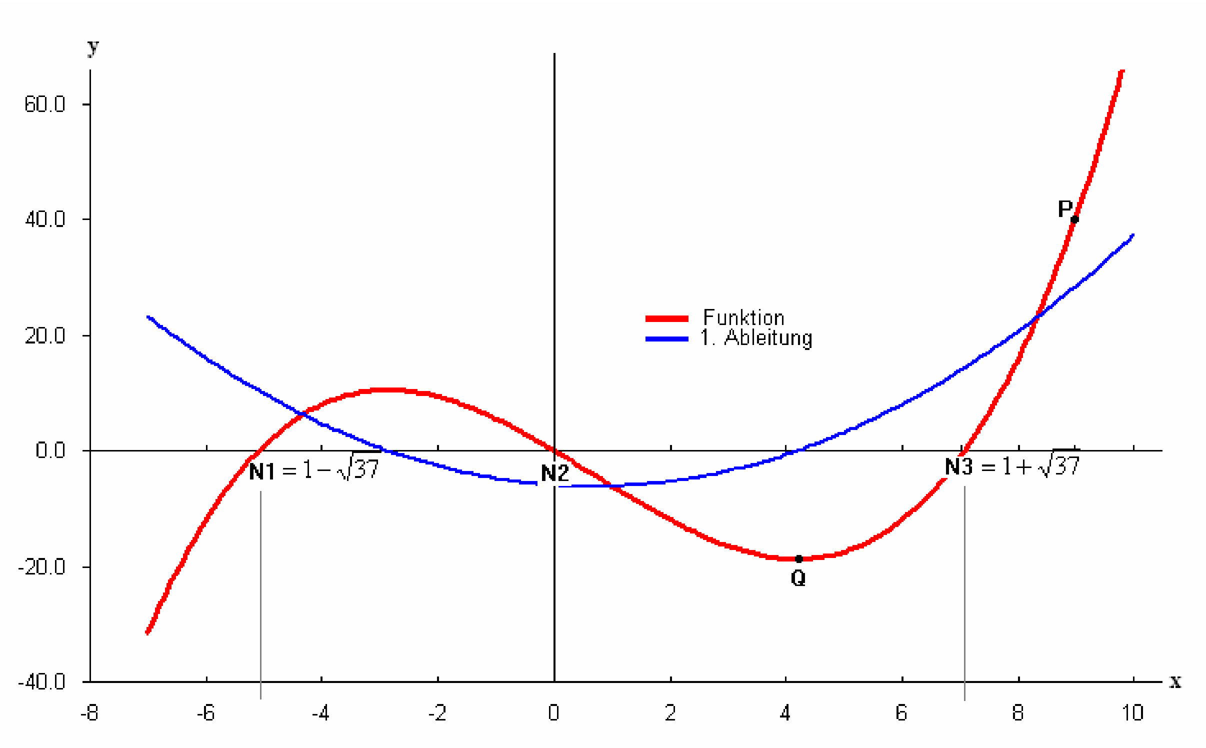
Als Beispiel verwenden wir das auch mit einfachen Mitteln zu lösende Polynom 3. Grades
$y = x^3/6 - x^2/3 - 6x$, dessen Graph und erste Ableitung in der Abbildung 1 zu sehen ist.

[*] **Dr. Christian Strutz, Steigstraße 26, D-88131 Lindau, Germany. Tel&Fax ..49 8382 977583 eMail Strutz_Christian@t-online.de**

Abbildung 1
Darstellung der Funktionen

$$y = \frac{1}{6} \cdot x^3 - \frac{1}{3} \cdot x^2 - 6x$$

$$y' = \frac{1}{2} \cdot x^2 - \frac{2}{3} \cdot x - 6$$

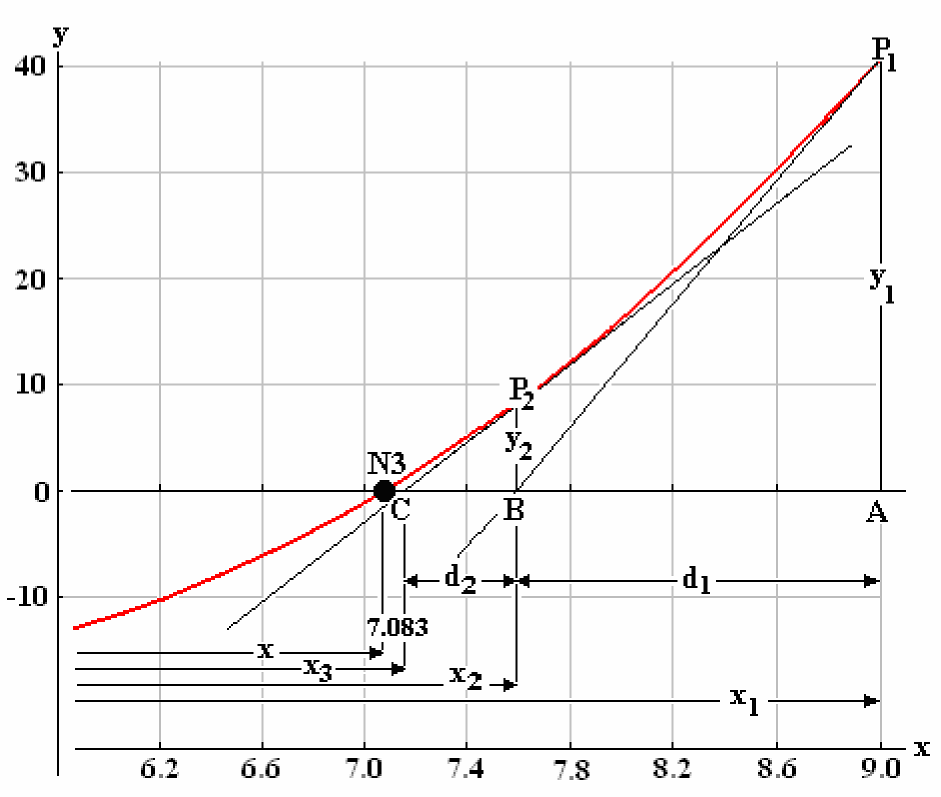


Der Verlauf der Kurve zeigt eine Nullstelle **N1** in der Nähe des Abszissenwertes -6, ein relatives Maximum etwa bei -3, entsprechend einer Nullstelle der ersten Ableitung, eine zweite Nullstelle **N2** im Nullpunkt, ein relatives Minimum zwischen 4 und 5 und eine dritte Nullstelle **N3** in der Nähe von 7. Aus der Abbildung entnehmen wir, dass die Ordinate des Punktes P positiv, die des Punktes Q negativ ist. Also befindet sich die Nullstelle **N3** zwischen P und Q.

Zur genaueren Untersuchung der Nullstelle **N3** fertigen wir eine Detailzeichnung an (Abbildung 2).

Abbildung 2
Detail der Funktion

$$y = \frac{1}{6} \cdot x^3 - \frac{1}{3} \cdot x^2 - 6x$$



In P_1(9; 40.5) zeichnen wir an die Kurve die Tangente P_1B mit der Steigung y' = 28.5.
Die Steigung der Tangente in diesem Punkt finden wir einerseits geometrisch durch das Streckenverhältnis AP_1/AB, andererseits algebraisch durch die erste Ableitung der Funktion in dem Punkt P_1.

$$y_1^| = \frac{AP_1}{AB} = \frac{y_1}{d_1}$$

$$d_1 = AB = \frac{AP_1}{y_1^|}.$$

Die Auflösung dieser Gleichung nach d_1 zeigt, daß der Abstand zwischen den Punkten A und B gleich dem Quotienten zwischen dem Ordinatenwert und der Steigung in dem Punkt P_1 ist.

$$d_1 = \frac{y_1}{y_1^|}$$

Subtrahieren wir die Strecke d_1 von x_1, so erhalten wir den Abszissenwert x_2,

$$x_2 \quad = \quad x_1 - d_1 \quad = \quad x_1 - \frac{y_1}{y_1^{|}}$$

der schon erheblich näher an der gesuchten Nullstelle **N3** liegt als x_1.
Senkrecht über B befindet sich der Schnittpunkt P_2 mit den Koordinaten $(x_2;y_2)$, an den wir wiederum zur weiteren Näherung eine Tangente legen und so weiter...

$$x_3 \quad = \quad x_2 - d_2 \quad = \quad x_1 - \frac{y_2}{y_2^{|}}$$

$$x_4 \quad = \quad x_3 - d_3 \quad = \quad x_3 - \frac{y_3}{y_3^{|}}$$

$$x_5 \quad = \quad x_4 - d_4 \quad = \quad x_4 - \frac{y_4}{y_4^{|}}$$

Diesen wiederholten Vorgang, Iteration genannt, können wir - theoretisch - beliebig lang fortsetzen, je nach dem, auf wie viele Kommastellen genau wir die Nullstelle schätzen wollen.
Wir sehen: Entscheidend ist der Abstand d, der sich aus dem Quotienten y(x)/y'(x) errechnet. Der Zähler y(x) wird immer kleiner und strebt gegen Null, während der Nenner y'(x) im Laufe der Iterationen den Wert der Steigung der Tangente an die Nullstelle der Funktion annimmt. Fazit: Wenn der Abstand d zu Null geschrumpft ist, haben wir die Nullstelle gefunden!
Wenn wir bedenken, daß die x-Werte der Maxima und Minima ebenfalls Nullstellen der 1. Ableitung und die Wendepunkte Nullstellen der 2. Ableitung sind, so erschließt sich uns mit der NEWTONschen Approximation fast die gesamte Kurvendiskussion einer Gleichung höheren Grades.

Nullstellen-Approximation mittels Tabellenkalkulation
Voraussetzung für diese Serie von Berechnungen ist es, dass, ausgehend von einem Anfangswert X, der sich in der Nähe der Nullstelle befindet, der jeweils folgende Schätzwert mit Hilfe des vorausgehenden Abszissenwertes berechnet wird.
Für die diese Art der Berechnungen ist die Tabellenkalkulation bestens geeignet, denn wir können mathematische Beziehungen zwischen einzelnen Zellen mit den Koordinaten A,B,C...(Spalte) |1,2,3...(Zeile) herstellen. Das einfachste Beispiel einer Iteration ist die senkrechte Zahlenreihe 1,2,3..., wie wir sie für die Erstellung einer Grafik brauchen.
Zu beachten ist, dass in den Zellen nur die berechneten Werte zu sehen sind. Die Formeln, nach denen diese Werte berechnet werden, sind nur im oberen Display des Bildschirms sichtbar.

	Anzeige	
	Spalte	
Zeile	A	Formel
1	1	
2	2	=A1+1
3	3	=A2+1
4	4	=A3+1

Der Vorteil der Tabellenkalkulation besteht darin, dass, wie in dem gezeigten Beispiel, wir die Formel *=A1+1* nur einmal in der Zelle A2 eingeben müssen, um sie dann entlang der Spalte A herunterzukopieren. Der relative Bezug auf die nächstobere Zelle hat zur Folge, dass die Berechnung der Formel erst dann erfolgt, wenn die Berechnung des nächstoberen Wertes abgeschlossen ist. Genau dieses Verfahren brauchen wir für die Approximation von Nullstellen.
Wir erstellen ein Spreadsheet zur iterativen Bestimmung von Nullstellen in Polynomen bis zum 7. Grad, in welchem sich die Koeffizienten A bis H als absolute Referenzen befinden. In den Formeln hat das $-Zeichen vor den Koeffizienten die Wirkung, dass sie beim Herunterkopieren immer gleich bleiben. Für unser Beispiel sieht das so aus:

			Exponent				
7	6	5	4	3	2	1	0
			Koeffizient				
A	B	C	D	E	F	G	H
0	0	0	0	0.1666667	-0.3333333	-6	0

Die Formel für die Nullstellen einer Funktion hat dann folgendes Aussehen:

```
=X-($A*X^7+$B*X^6+$C*X^5+$D*X^4+$E*X^3+$F*X^2+$G*X+$H)/(7*$A*X^6+6*$B*X^5+5*$C*X^4-
```
...,

was nichts anderes bedeutet als $x_2 = x_1 - y_1/y'_1$. "X" ist der Name für einen frei zu wählenden Abszissenwert (seed value). In der Folge, entlang der Spalte, bezieht sich aber das X jeweils auf den berechneten Abszissenwert der nächstoberen Zelle. Dabei ist zu bedenken, dass pro Zelle 11 Potenzierungen, 14 Multiplikationen und 16 Additionen abgelaufen sein müssen, bevor der Wert der nächsten, darunter gelegenen Zelle berechnet wird. So können wir beliebig viele - in unserem Beispiel 50 - Iterationen herunterkopieren. Die Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt dieser Iterationen.

Tabelle 1
Ausschnitt aus der Werte- und Iterationstabelle

X	Y	Y'	Y"	Nullstelle	Extrema	Wendep.
9.0	40.5	28.5	8.3	7.578947368	5.58	0.666666667
8.6	29.8	25.2	7.9	7.129771748	4.38972863	0.666666667
8.2	20.3	22.2	7.5	7.083248357	4.199462399	0.666666667
7.8	12.0	19.2	7.1	7.082762583	4.194338802	0.666666667
7.4	4.9	16.4	6.7	7.08276253	4.194335081	0.666666667
7.0	-1.2	13.8	6.3	7.08276253	4.194335081	0.666666667

Das Beispiel zeigt, dass bei einem seed value *X = 9* bereits 5 Iterationen ausreichen, um die x-Werte der Nullstelle *N3*, des relativen Minimums und des Wendepunktes mit einer Stellengenauigkeit von 9 Stellen nach dem Komma zu schätzen.
Die Wertetabelle mit den Überschriften X,Y,Y' und Y" dient zur graphischen Darstellung der Funktion und deren erster und zweiter Ableitung im Bereich -10 bis +10. So können wir sehen, wo sich in etwa die Nullstellen befinden (Abb.1), um einen in der Nähe befindlichen x-Wert als seed value einzugeben.

Die Eingabe dieses x-Wertes sowie die ermittelten Abszissen- und die vom Computer berechneten Ordinatenwerte projezieren wir schließlich auf eine optisch gefällige Tabelle. So entsteht - wie bei anderen Programmen - der Eindruck, dass zwischen der Eingabe einer Zahl und der Ausgabe der Ergebnisse nur ein Tastendruck liegt (Tab.2).

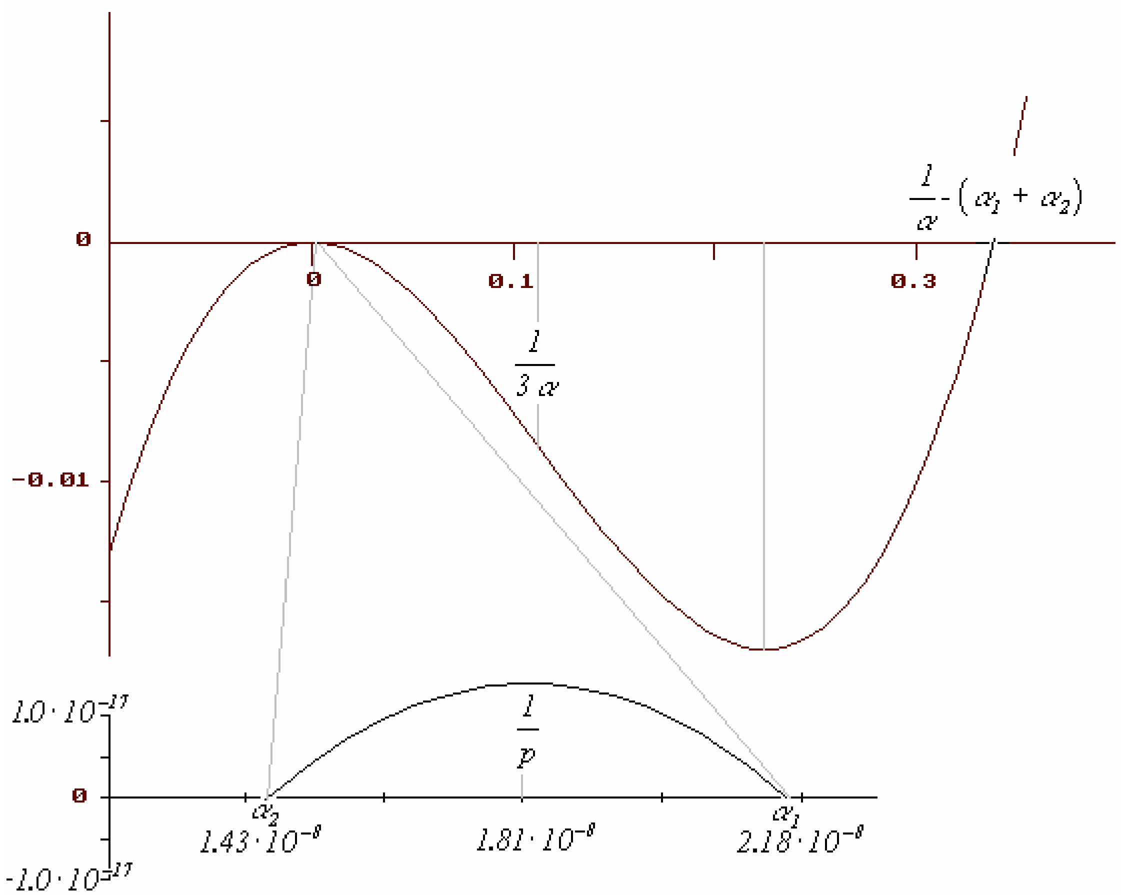
Tabelle 2
Darstellung von Ein- und Ausgabe

	XY-Wert	Nullstelle	Minimum	Wendepunkt
x	**9**	7.0827625	4.1943351	0.6666667
y	40.5000000	0.0000000	-18.7320566	-4.0987654

Wir aber können jetzt abschätzen, wie viele Rechenschritte dazwischen liegen, obwohl sie unser Computer in weitaus weniger als einer Sekunde erledigt.

Anwendungsbeispiel
Um zu sehen, wie wirksam die Newton'sche Methode der Nullstellen-Approximation ist, untersuchen wir das Polynom dritten Grades $y = 2.953x^3 - x^2 + 3.613{*}10^{-8}x - 3.126{*}10^{-16}$, dessen graphische Darstellung in Abbildung 3 erscheint.

Abbildung 3
Darstellung der Funktion
$$y = 2.953x^3 - x^2 + 3.613\cdot 10^{-8}x - 3.126\cdot 10^{-16}$$



Es handelt sich bei dieser Gleichung um die Formel,

$$y = \alpha \cdot x^3 - x^2 + \frac{\alpha}{B^2} \cdot x + \frac{2A}{B^2} \quad ;$$

mit $\alpha = 2GM/c^2 = 2.953$ km; $B^2 = GM{\cdot}p = 7.37{\cdot}10^{18}$ km^4/s^2 ; $A = -GM/2a = -1150$ km^2/s^2 ;
Große Halbachse $a = 7.58{\cdot}10^7$ km; Latus Rectum $p = 5.54.10^7$ km; Perihel $r_1 = 4.59.10^7$ km

die Einstein (1915)[2] verwendet hat, um die Periheldrehung des Merkur zu berechnen. Wie wir der Abbildung 3 entnehmen, hat die Funktion ein relatives Maximum nahe dem Null-punkt, wobei die Kurve die x-Achse von unten her zu berühren scheint, einen Wendepunkt in der Nähe von 0.1, ein Minimum in der Gegend von 0.2 und eine Nullstelle bei 0.3 .
Zur Bestätigung unserer Beobachtung geben wir als Anfangswert $X = 0$ ein und stellen zu unserem Erstaunen fest, dass uns das Programm eine Nullstelle *N1* bei $x = 1.435*10^{-8}$ ausweist. Das Maximum befindet sich bei *1.8067*10*$^{-8}$ und der Wendepunkt bei *0.1129.* Selbst wenn wir den *X*-Wert unsinnig stark verändern, z.B. auf -10 000 000, bedarf es nur einiger weniger Iterationsschritte mehr, um wieder bei den selben Werten zu landen.
Da sich offenbar das Maximum oberhalb der x-Achse befindet, der Wendepunkt aber unterhalb der x-Achse steht, bedeutet dies, dass es eine zweite Nullstelle zwischen dem Maximum und dem Wendepunkt geben muss. Wir geben also als weiteren Anfangswert den x-Wert des Wendepunktes ein und treffen - in der Tat - auf die Nullstelle *N2* bei *2.1786*10*$^{-8}$. Erst eine 10-millionenfache Vergrößerung der ursprünglichen Skala zeigt uns graphisch dieses Detail (Abb. 3 unten). Wie sich herausstellt, handelt es sich bei den beiden Nullstellen *N1* und *N2* um die Kehrwerte des maximalen *(α_1)* und minimalen *(α_2)* Abstandes des Planeten Merkur von der Sonne.

N1= α_1	=	0.000000014347201
N2 = α_2	=	0.000000021786496
$\alpha_1 + \alpha_2$	=	0.000000036133698
N3 =1/α	=	0.338611119842462
1/α-($\alpha_1 + \alpha_2$)	=	0.338611083708765

Die genau iterierten Werte verdeutlichen, dass *N3*, der x-Wert der dritten Nullstelle, nach Vieta der Gleichung

$$N3 = x_3 = \frac{1}{\alpha} - \left(\alpha_1 + \alpha_2\right)$$

genügt. Dies bedeutet aber auch, dass die Newton'sche Methode nicht nur den Augenschein bestätigt, sondern so genau ist, dass sie uns sogar eine ultramikroskopische Untersuchung einer Funktion liefert.

Literatur

[1] Theo Kühlein, 1942: Differential-Rechnung I. Mentor Repetitorien Bd. 58. Berlin.
[2] Albert Einstein, 1915: Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der Allgemeinen Relativitätstheorie. Sitzgsber.d.preuß. Akad.d.Wiss. 1915, 831-839.