

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

**Untersuchungen über die Explosionsgrenzen brennbarer
Gase und Dämpfe**

Eitner, Paul

München, 1902

Untersuchungen über die Explosionsgrenzen brennbarer Gase und
Dämpfe

[urn:nbn:de:bsz:31-270244](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-270244)

Untersuchungen

über die

Explosionsgrenzen brennbarer Gase und Dämpfe.

Die Vorgänge, welche sich in den Flammen brennender Gase abspielen, sind schon sehr häufig Gegenstand eingehender Untersuchungen gewesen. Doch obgleich sich die namhaftesten Experimentatoren mit dieser Materie befaßt haben, ist gleichwohl unsere Kenntnis derselben noch lückenhaft. Es liegt das zum Teil an der Kompliziertheit der Reaktionen, zum Teil und namentlich daran, daß die Reaktionsgeschwindigkeiten in den brennenden Gasen außerordentlich groß sind, so daß es schwer hält, einzelne Phasen der Prozesse herauszugreifen und sie dem Studium zu unterwerfen. Das gilt ebenso für brennende Gasstrahlen (Flammen im gewöhnlichen Sinne des Wortes), wie für explodierende Gasmischungen.

Will man mit dem Experiment an die Erforschung derartiger Probleme herantreten, so müssen die Versuchsbedingungen zunächst so einfach als möglich gewählt werden. Bevor man daher das Studium der Leuchtgasflammen und ähnlicher kompliziert zusammengesetzter brennender Gasgemische beginnen kann, müssen die Erscheinungen an einfachen reinen Gasen beobachtet und diskutiert werden.

Verhältnismäßig einfach sind die Vorgänge bei der Verbrennung von Wasserstoff und Kohlenoxydgas, da beide wesentlich nur je ein Verbrennungsprodukt liefern: Wasserdampf bzw. Kohlensäure. Erheblich verwickelter sind die Erscheinungen bei den Kohlenwasserstoffen, wie Methan,

Äthylen, Acetylen, Pentan, Benzin, Benzol und bei Stoffen wie Alkohol und Äther; denn hier entsteht im Verlauf der Verbrennung eine ganze Reihe verschiedener Produkte, die sich in den hohen Temperaturen gegenseitig beeinflussen. Jedenfalls am verwickeltsten sind die Vorgänge beim Leuchtgas und allen den Gasen, die beim Verbrennen der gewöhnlichen Heiz- und Beleuchtungsmaterialien entstehen. Denn bei diesen liegen Gemische der oben genannten Gase vor, deren Zusammensetzung sich in der Flamme mit fortschreitender Verbrennung stetig ändert. Die Beurteilung der Vorgänge in solchen Flammen setzt daher die Kenntnis der an den einfachen Gasen zu beobachtenden Erscheinungen voraus.

Läfst man einen Gasstrom aus einer Öffnung in die Luft austreten, so entsteht ein Gasstrahl¹⁾, in dessen Umgrenzungszone eine fortwährende Mischung zwischen Gas und Luft eintritt, die um so tiefergreifend ist, je weiter der Gasstrahl fortschreitet. Das gilt sowohl für das kalte wie für das brennende Gas. Es ist daher ohne weiteres einleuchtend, dafs in brennenden Gasstrahlen die chemische Zusammensetzung des Gemisches sich von Punkt zu Punkt ändert und nur an ein und derselben Stelle einigermaßen konstant sein wird.

Anders liegen die Verhältnisse, wenn man das brennbare Gas vor der Entzündung in seiner ganzen Masse mit der zur Verbrennung erforderlichen Menge Luft oder Sauerstoff mischt und einen weiteren Zutritt von Luft bzw. Sauerstoff dadurch verhütet, dafs man das Gemisch in völlig geschlossenen Räumen zur Entzündung bringt. Die Verbrennung verläuft dann rasch als Explosion durch die ganze Gasmasse, überall unter den gleichen Bedingungen, die beliebig gewählt werden können. Der Explosionsversuch greift also die an einem bestimmten Punkte eines brennenden Gasstrahls sich abspielenden Vorgänge heraus und macht dieselben dem Studium zugänglich. Aus diesem Grunde werden zweckmäfsig die Verbrennungsercheinungen der Gase, soweit möglich, an explodierenden Gasmischungen beobachtet.

¹⁾ Vgl. Bunte, Über Verbrennungsvorgänge bei Gasen. Journ. f. Gasbel. 1900, S. 529 u. ff.

Was nun diese Erscheinungen selbst im einzelnen betrifft, so lassen sich dieselben an Hand der Anschauungen definieren, die allgemein für das Zustandekommen einer Gasverbrennung gelten.¹⁾

Wird ein entzündliches Gemenge von brennbarem Gas mit Sauerstoff oder Luft an einer Stelle rasch auf immer höhere Temperaturen erhitzt, so findet hier bei einer bestimmten Temperaturgrenze, der sog. Entzündungstemperatur, eine sehr schnell verlaufende Vereinigung der brennbaren Gasteile mit Sauerstoff statt. Das in der erhitzten Gaszone enthaltene Gasgemenge entzündet sich und verbrennt. Dabei wird eine bestimmte Wärmemenge frei, die Verbrennungswärme, die zunächst den Verbrennungsprodukten eine hohe Temperatur erteilt, die Verbrennungstemperatur. Werden hierbei durch Wärmeübertragung von der brennenden Gaszone auch die benachbarten Gasteile auf die Entzündungstemperatur erhitzt, so kommen auch diese zur Verbrennung und die Entzündung pflanzt sich fort. Diese Wärmeübertragung von der brennenden Gasschicht zur benachbarten erfordert Zeit. Dementsprechend schreitet die Entzündung mit einer gewissen meßbaren Geschwindigkeit fort, die man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Explosion nennt. Geschieht endlich die explosive Verbrennung in einem geschlossenen Gefäß, so üben die durch die Verbrennungswärme ausgedehnten Gase während der Dauer der Verbrennung einen Druck auf die Gefäßwände aus. Die Höhe des Explosionsdruckes kann als Maß für die Heftigkeit der Explosion gelten, wenn die Entzündung durch die ganze Gasmasse nahezu gleichzeitig bewirkt wird. Bunsen²⁾ nennt das hierbei auftretende Druckmaximum die »Explosivität« des Gasgemisches.

¹⁾ Vgl. Bunsen, Gasometrische Methoden. 2. Aufl. S. 306 u. ff. Ferner: Recherches expérimentales et théoriques sur la combustion des Mélanges gazeux explosifs par M. M. Mallard et Le Chatelier (Ann. des Mines 1883).

²⁾ Gasometr. Methoden. 2. Aufl. S. 331.

Aber bekanntlich lassen sich nicht alle Gemische von brennbarem Gas mit Luft oder Sauerstoff zur Entzündung bringen. Eine explosive Verbrennung ist nur möglich, wenn sich die Menge des brennbaren Gases in der Mischung innerhalb ganz bestimmter, von der Natur der Gemengteile und anderen Einflüssen abhängiger Grenzen bewegt. Diese Grenzen heißen die Explosionsgrenzen des betreffenden Gases, und zwar ist der niedrigste Prozentgehalt an brennbarem Gas, bei welchem die Mischung noch explodiert, die untere, der höchste Prozentgehalt die obere Explosionsgrenze.

Alle die oben genannten Beziehungen sind schon wiederholt experimentell geprüft worden und sollen im Verlauf dieser Arbeit an geeigneter Stelle diskutiert werden.

Die Kenntnis der Explosionsgrenzen bildet die Grundlage für alle Explosionsversuche. Es mögen diese daher an erster Stelle besprochen werden.

Explosionsgrenzen.

Bevor in die Behandlung des experimentellen Materials eingetreten wird, welches den Gegenstand dieser Arbeit bildet, möge hier zunächst noch eine exakte Definition des oben kurz angedeuteten Begriffs der Explosionsgrenzen Platz finden und eine Zusammenstellung der wichtigsten bisher auf diesem Gebiete veröffentlichten Arbeiten gegeben werden.

Unter »Explosionsgrenzen« einer Gasmischung versteht man diejenigen Prozentgehalte an brennbarem Gase in der Mischung, bei welchen gerade noch eine explosive Verbrennung stattfinden kann, und bei welchen die Explosionsfähigkeit aufhört, sobald das im Überschufs in der Mischung vorhandene Gas um ein geringes vermehrt wird. Die »untere Explosionsgrenze« bezeichnet die geringste Menge an brennbarem Gase, welche die Mischung noch explosionsfähig macht; die »obere Explosionsgrenze« bezeichnet das Maximum des brennbaren Gases, welches die Mischung enthalten kann, ohne ihre Explosionsfähigkeit einzubüßen. Das Intervall zwischen der unteren und der oberen Explosionsgrenze enthält alle die Gaszusammensetzungen, bei denen eine Explosion möglich ist, und heißt »Explosionsbereich«.

Litteratur.

Das Studium der Gase ist schon im Anfang des vorigen Jahrhunderts ein beliebtes Arbeitsgebiet der Chemiker und Physiker gewesen, und die grundlegenden Arbeiten, auf denen sich unsere Kenntnis der Gasgesetze aufbaut, stammen aus jener Zeit. Besonderes Interesse mußten natürlich die explosiven Verbrennungen von Gasgemischen in Anspruch nehmen, und sehr bald finden wir auch Angaben über Explosionsgrenzen, allerdings nicht unter dieser Bezeichnung und auch in anderer Form, als obige Definition verlangt.

So berichtet z. B. H. Davy¹⁾ in seiner klassischen Arbeit »Untersuchungen über die Flamme«, daß 1 Maß Knallgas ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$) sich nicht mehr durch den elektrischen Funken entzünden läßt, wenn es gemischt ist mit $\frac{1}{2}$ Maß ölbildendem Gas (Äthylen) oder $\frac{5}{6}$ Maß Fluorsiliciumgas, mit 1 Maß Sumpfgas oder 2 Maß Schwefelwasserstoffgas oder 2 Maß Salzsäuregas, mit 8 Maß Wasserstoff, mit 9 Maß Sauerstoff, mit 11 Maß Stickoxydulgas. Ähnliche Angaben machen Humboldt und Gay-Lussac²⁾ und auch W. Henry.³⁾ Für eine Reihe von Gasen gibt Turner⁴⁾ Grenzzahlen, zwischen denen die Explosionsfähigkeit von Wasserstoffknallgas aufhört, und erkennt, daß die durch den Gaszusatz bewirkte Erniedrigung der Verbrennungstemperatur nicht die einzige Ursache der Explosionsverhinderung ist. Auch Regnault und Reiset⁵⁾ geben für Wasserstoffknallgas einige Explosionsgrenzen.

Bunsen⁶⁾ fand bei der Ausarbeitung seiner gasanalytischen Methoden, daß Wasserstoffknallgas bei successivem Zusatz von Sauerstoff seine Explosionsfähigkeit verliert, sobald der Knallgasgehalt der Mischung auf 8,72% herabsinkt, wäh-

¹⁾ Philosophical Transactions 1817, S. 59.

²⁾ Gilberts Annalen der Physik 20, 49.

³⁾ Annals of Philosophy 25, 426.

⁴⁾ The Edinburgh philosophical Journal 12, 311.

⁵⁾ Ann. Chem. u. Pharm. 59, 208.

⁶⁾ Bunsen, Gasometrische Methoden, 2. Aufl., S. 336.

rend bei einem Knallgasgehalt von 9,66% die Mischung noch explodierbar ist. Ähnliche Verhältnisse ergaben sich beim Zusatz von Kohlensäure zum Wasserstoffknallgas, nur lag hier die Grenze der Explodierbarkeit viel höher, nämlich zwischen 25,79% und 26,18% Knallgas. Der auslöschende Einfluss der Kohlensäure ist also viel beträchtlicher als der des Sauerstoffs.

Während bisher hauptsächlich das Wasserstoffknallgas zu den Versuchen über Explosionsgrenzen gedient hatte, begegnen wir später bei Frankland¹⁾ einer vereinzelt Bestimmung für das Londoner Leuchtgas in Gemischen desselben mit Luft.

Interessante Studien über den Einfluss der Funkenstärke auf die Entzündung explosiver Knallgasluftmischungen veröffentlichte Herwig²⁾ in seiner Arbeit »über Wirkungen des Induktionsfunkens«. Es wird dabei die häufig bei Explosionen in geschlossenen Gefäßen zu beobachtende Erscheinung erörtert, daß die Verbrennung nur einen Teil des ganzen Gemisches durchläuft. Besonders wichtig sind die Versuche, aus denen sich ergibt, daß unter bestimmten Umständen die Explosionsfähigkeit eines Gemisches mit steigendem Druck zunimmt, mit sinkendem Druck dagegen vermindert wird.

Sehr umfangreiche und bedeutungsvolle Versuche über die unvollständige Verbrennung von Gasen und Gasgemischen mit einer unzureichenden Menge von Sauerstoff (oder Stickoxydul) hat E. v. Meyer³⁾ zur Ermittlung von Affinitätsgrößen angestellt und hat dabei unter anderm auch die oberen Explosionsgrenzen⁴⁾ von Gemischen aus Kohlenwasserstoffen und Sauerstoff bestimmt.

¹⁾ Frankland, On the Igniting Point of Coal Gas. Experimental recherches, S. 536.

²⁾ Pogg. Ann. 148, S. 44 (1873).

³⁾ E. v. Meyer, Über die unvollkommene Verbrennung von Gasen und Gasgemischen etc. Journ. für prakt. Chemie, Bd. 10, S. 237 ff.

⁴⁾ ibid. S. 330 ff.

Im Jahre 1875 hat Mallard¹⁾ Untersuchungen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verbrennung in explosiven Gasgemischen veröffentlicht, aus denen durch Extrapolation diejenigen Gaszusammensetzungen bestimmt werden können, bei welchen diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleich Null wird. Diese Punkte müssen den Explosionsgrenzen der betreffenden Gasmischungen entsprechen. Es ist dies eine eigenartige indirekte Methode zur Ermittlung dieser Konstanten.

Ein Jahr später (1876) veröffentlichte A. Wagner²⁾ seine Versuche zur »Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gemengen brennbarer Gase mit Sauerstoff oder Luft«. Er erörtert zunächst an der Hand vergleichender Bestimmungen den Einfluss des Entzündungsmittels auf die Höhe der Versuchsergebnisse und kommt zu dem Schluss, dass ein zum Abschmelzen erhitzter feiner Platindraht der Anwendung von Induktionsfunken vorzuziehen sei. Es werden dann die Explosionsgrenzen einiger Gase in Mischung mit Sauerstoff bzw. mit Luft festgestellt und dabei auch Leuchtgas-Luftgemische untersucht. Ein Abschnitt beschäftigt sich mit der unvollständigen Verbrennung von Methan-Sauerstoffgemengen unter Mitwirkung des glühenden Platindrahtes, ein anderer mit der auslöschenden Wirkung der Kohlensäure und des Stickstoffs in solchen Explosionsgemischen.

Versuche über die Entzündlichkeit von Grubengas-Luftmischungen haben Lehmann und Wüllner³⁾ im Auftrage der Preussischen Schlagwetterkommission ausgeführt. Es handelte sich dabei wesentlich um die Bestimmung der Entzündungstemperaturen solcher Gemische, bzw. um die Ermittlung der zur Einleitung der Verbrennung erforderlichen Umstände. Bezüglich des Explosionsbereiches ergab sich, dass Gemenge aus Grubengas und Luft im Mischungsverhältnis

¹⁾ Annales des Mines 1875, S. 355. Vgl. Journ. f. Gasbel. 1881, S. 60, »Über explosive Mischungen von Leuchtgas mit Luft.«

²⁾ Wagner, Bayer. Industrie und Gewerbeblatt 1876, S. 186.

³⁾ Berichte der preufs. Schlagwetterkommission. Berlin 1886, Bd. 3, S. 193.

1:16 bis 1:7 explosive Eigenschaften zeigten, was den Explosionsgrenzen 5,9 und 12,5 entsprechen würde.

In einer Arbeit »Über Erscheinungen beim Verbrennen von Gasgemischen« hat Dr. Broockmann¹⁾ Beobachtungen über unvollkommene Verbrennungen und über die Entzündlichkeit von Grubengas-Luftmischungen besprochen und dabei auch einige angenähert bestimmte Explosionsgrenzen angegeben.

Etwas ein Jahr später (1890) veröffentlichten Bunte und Roszkowski²⁾ sehr eingehende Versuche »Über die Einwirkung der Temperatur auf die Explosionsgrenzen brennbarer Gasgemische«. In den Kreis der Untersuchung sind Gemische von Wasserstoff, Kohlenoxyd, Methan und Leuchtgas mit Sauerstoff, Luft und einem Gemenge von 21% Sauerstoff mit 79% Kohlensäure gezogen und die Bestimmungen bei 15°, 100°, 200° und 300° C. ausgeführt. Eine Versuchsreihe mit Gasen, die durch Phosphorpentoxyd getrocknet waren, bildet den Schluss der Arbeit.

F. Clowes³⁾ bestimmte die Explosionsgrenzen einiger Gasgemische, indem er die Zündung mit einer Flamme bewerkstelligte. Die von ihm gefundenen Explosionsbereiche sind vielfach größer als die bisher ermittelten, was wohl auf die Eigenart seiner Versuchsanordnung zurückzuführen sein wird.

Eine Untersuchung über die Verbrennungserscheinungen bei Acetylen veröffentlichte Le Chatelier⁴⁾ im Jahre 1895. Er bestimmte die Explosionsgrenzen dieses Gases in Mischungen mit Luft und mit Sauerstoff und zeigte, welchen großen Einfluß die Weite des Explosionsgefäßes auf die Resultate ausübt. In einer besonderen Versuchsreihe sind die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Verbrennung in explosiven Acetylenluftgemischen verschiedener Zusammensetzung ermittelt, und auch die Entzündungstemperatur ist bestimmt. Dieselbe liegt hiernach bei 480° C.

¹⁾ Dr. Broockmann. Vgl. Journ. f. Gasbel. 1889, S. 189.

²⁾ Vgl. Journ. f. Gasbel. 1890, S. 491, 524, 535, 553.

³⁾ F. Clowes, Journ. Soc. Chem. Ind. 14, 1024 und 15, 418.

⁴⁾ Compt. rend. 121, S. 1144.

F. Emich¹⁾ ermittelte die Länge der Induktionsfunken, die zur Entzündung dünner Wasserstoff-Knallgasschichten eben ausreichen. Er bringt diese Längen in Beziehung zu der Entzündlichkeit der Gasgemische und findet, daß Zusatz von inerten Gasen zum Gemisch die Entzündlichkeit herabsetzt. Bei Sauerstoffzusatz tritt zunächst eine Erhöhung der Entzündlichkeit ein, bis das Verhältnis von Wasserstoff zu Sauerstoff 1:1 geworden ist. Ein weiterer Zusatz von Sauerstoff wirkt dann wieder auslöschend.

In neuerer Zeit hat Le Chatelier²⁾ eine Methode zur Bestimmung der Entzündlichkeitsgrenzen angegeben und hat gezeigt, daß zwischen den Explosionsgrenzen einzelner Gase und der ihres Gemisches eine einfache numerische Beziehung besteht. In Gemeinschaft mit Boudouard³⁾ hat er dann den Einfluß von Druck und Temperatur sowie der Weite des Explosionsgefäßes auf die Resultate ermittelt und weiter die Explosionsgrenzen für eine größere Anzahl von Gasen und Dämpfen in Mischung mit Luft bestimmt.

Aus der neuesten Zeit ist noch ein kurzer Bericht über einen von K. Kubierschky⁴⁾ gehaltenen Vortrag zu erwähnen, welcher »Über Explosionen von Mischungen brennbarer Dämpfe bezw. Nebel mit Luft« betitelt ist. Der Verfasser gibt eine Methode zur Bestimmung der Explosionsgrenzen, die derjenigen von Le Chatelier und Boudouard ähnlich ist, und beschreibt unter anderm einige interessante Explosionsversuche mit hochsiedenden Kohlenwasserstoffen bezw. Gemischen aus Nebeln brennbarer Körper mit Luft.

Schließlich seien noch die Arbeiten von S. Tanatar⁵⁾ erwähnt, die sich mit der unvollkommenen Verbrennung von Gemischen aus Wasserstoffknallgas und Kohlenwasserstoffen beschäftigen. Dieselben schliessen sich an die oben citierten Untersuchungen von E. v. Meyer an.

¹⁾ F. Emich, Mitteilungen aus dem chem. Laboratorium der K. K. Hochschule Graz 1896.

²⁾ Ann. des Mines Serie 8, Bd. 19, S. 388.

³⁾ Compt. rend. 1898, I. Sem., S. 1344 u. 1510.

⁴⁾ Zeitschr. f. angew. Chem. 1901, S. 129.

⁵⁾ Zeitschr. f. phys. Chem. XXXV, S. 340 u. XXXVI. S. 225.

Ziele und Einteilung der Arbeit.

Vergleicht man die von den genannten Forschern erhaltenen Resultate, so ergibt sich zunächst bei vielen eine gute Übereinstimmung, trotz der Verschiedenheit der Versuchsbedingungen, so daß der Schluß zulässig erscheint, daß die Explosionsgrenzen ganz bestimmte, von der Natur der Gase abhängige Konstanten sind. Aber auch manche recht beträchtliche Abweichungen kommen vor, die einer Aufklärung bedürfen.

Es ergab sich daher zunächst die Aufgabe, das vorhandene Material experimentell zu prüfen und möglichst zu vermehren, um eine sichere Grundlage für Versuche über die Änderung des Explosionsbereiches durch inerte Gase und für theoretische Betrachtungen über die Abhängigkeit der Explosionsgrenzen von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Gasgemenge zu schaffen. In Rücksicht auf das praktische Interesse wurde die Untersuchung vorerst auf das Studium der Explosionen von Gemischen brennbarer Gase und Dämpfe mit Luft beschränkt.

Die Arbeit gliedert sich demnach in drei Abschnitte, von denen der erste Explosionsversuche mit Gemischen aus brennbaren Gasen und Dämpfen mit Luft behandelt, der zweite Untersuchungen über die Wirkung verschiedener inerten Gase auf die Weite des Explosionsbereiches wiedergibt und der dritte eine theoretische Bearbeitung der gewonnenen Resultate enthält.

Im ersten Abschnitt ist zunächst eine Beschreibung der Versuchseinrichtung und der Ausführung der Versuche gegeben. Daran schließt sich die Versuchsergebnisse, die mit den früher von andern Forschern ermittelten Zahlen zusammengestellt eine Übersicht über das vorhandene Material liefern. Versuche in Gefäßen verschiedener Weite zeigen den Einfluß der Gefäßweite auf die Höhe der Resultate. An geeigneter Stelle ist die Gültigkeit der von Le Chatelier gegebenen Beziehung zwischen der Explosionsgrenze eines Gemisches brennbarer Gase und den einzelnen Explosionsgrenzen derselben nachgewiesen und dieser Satz verallgemeinert.

Der zweite Abschnitt zeigt zunächst den Einfluss der Kohlensäure auf die Weite der Explosionsbereiche, wenn dieselbe den Sauerstoff der Verbrennungsluft ersetzt oder dem Gemisch zugesetzt wird. In gleicher Weise wird dann der Einfluss des Wasserdampfes untersucht, und schliesslich sind die Explosionsgrenzen verschiedener Knallgase in Gemischen mit inerten Gasen dargestellt. Das Material ist benutzt, um die Gültigkeit des Le Chatelierschen Gesetzes in seiner allgemeinsten Form nachzuweisen.

Im dritten Abschnitt sind zunächst die Bedingungen für das Zustandekommen einer fortschreitenden Verbrennung in explosiblen Gasgemengen erörtert und in einer Gleichung zusammengefasst, die an den Explosionsgrenzen erfüllt sein muss, die also einen mathematischen Ausdruck für die Explosionsgrenzen darstellt. Dann sind die einzelnen Konstanten der Gleichung, die Verbrennungswärme, die Wärmekapazität und die Entzündungstemperatur der Gase einer Besprechung unterzogen, und ferner die Ergebnisse des ersten Abschnittes benützt, um die Verbrennungstemperaturen an den Explosionsgrenzen zu berechnen, die dann zur Unterscheidung von den anderweitig bestimmten »Entzündungstemperaturen« als »Explosionstemperaturen« definiert sind. Eine Besprechung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verbrennung bildet den Schluss der Arbeit.

Vor der Widergabe der experimentellen Ergebnisse habe ich noch einer Pflicht der Dankbarkeit gegen die Herren Dr. H. Trautwein und W. Bucerius zu genügen, deren schätzenswerter Mitarbeit ich mich bei der Ausführung der umfangreichen und zeitraubenden Untersuchungen zu erfreuen hatte. Es sei mir gestattet, den beiden Herren für ihre thatkräftige und eifrige Unterstützung an dieser Stelle nochmals meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.