

Herrn Prof. Dr. Bremer
HEINRICH·HERTZ·INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN·CHARLOTTENBURG

Technischer Bericht Nr. 69

Untersuchungen an einem Ammoniak-Strahl-Maser
mit zwei Resonatoren

von

Dr.-Ing. K. HORE

Berlin
1 9 6 3

H69.

Untersuchungen an einem Ammoniak-Strahl-Maser mit zwei Resonatoren

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden der Aufbau und die Meßergebnisse eines Ammoniak-Strahl-Masers mit zwei Resonatoren beschrieben. Die Untersuchungen dienten hauptsächlich der Feststellung, ob alle aus dem Separator des Ammoniak-Masers austretenden angeregten Moleküle ihre Energie im Strahlungsfeld abgeben. Hierzu wurden zwei Resonatoren so angeordnet, daß sie von einem einzigen Strahl durchquert wurden. Die Untersuchungen ergaben, daß erstens in der Nähe der Resonanz der größte Teil der Moleküle in den Grundzustand übergeht, und zweitens Moleküle in verschiedenen Rotations-Quantenzuständen gleichzeitig separiert werden.

Die physikalischen Grundlagen und die allgemeine Arbeitsweise des Ammoniak-Masers werden nicht beschrieben, da hierüber schon zahlreiche Veröffentlichungen erschienen sind. Eine Auswahl der einschlägigen Literatur ist am Ende dieser Schrift angegeben.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

gez. K. Hore

(Dr.-Ing. K. Hore)

Der Abteilungsleiter

gez. Gundlach

(Prof.Dr.-Ing. F.W. Gundlach)

Der Institutsdirektor

gez. Gundlach

(Prof.Dr.-Ing.F.W.Gundlach)

Berlin-Charlottenburg, den 20. Juni 1963

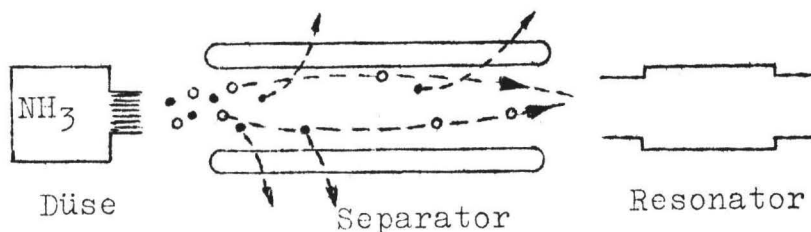


Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Aufbau des Masers mit zwei Resonatoren	2
3. Meßanordnung	2
4. Die verwendeten Resonatoren	4
5. Einfluß der Resonatoröffnung und des Abstandes des Resonators vom Separator	5
6. Abstimmung der beiden Resonatoren auf verschie- dene Inversionslinien (3-3 und 2-2 Inversion)	6
7. Abstimmung der beiden Resonatoren auf die gleiche Inversionslinie (3-3 Inversion)	8
8. Literaturverzeichnis	12

1. Einleitung

In einem Ammoniak-Maser wird der aus einer Düse austretende Ammoniak-Strahl durch ein inhomogenes elektrostatisches Feld geleitet. Das Feld übt zwei Wirkungen auf die Moleküle aus. Erstens: werden die Moleküle durch den quadratischen Stark-Effekt nach ihrer Energielage (höhere und niedrigere Energielage) räumlich getrennt, und zweitens wird auf die Moleküle im höheren Energieniveau (angeregte Moleküle) eine Richtwirkung ausgeübt (Abb.1). Der Ammoniak-Strahl, der nun vorwiegend angeregte Moleküle enthält, durchläuft anschließend den Resonator, in dem die Moleküle unter geeigneten Bedingungen in den Grundzustand übergehen und den Resonator zu Schwingungen auf der Übergangsfrequenz anregen. Da der Strahl den Separator mit einer gewissen Divergenz verläßt, muß der Resonator möglichst dicht hinter dem Separator angeordnet werden. Nur dann ist eine gute Ausnutzung des Strahles möglich und die Zahl der Stöße von Molekülen mit der Resonatorinnenwand kann klein gehalten werden. Anderenfalls lassen sich unter Umständen keine Schwingungen im Resonator anregen.



- Moleküle im höheren Energieniveau
- Moleküle im niedrigeren Energieniveau

Abb. 1

Die Anordnung von zwei Resonatoren hinter dem Separator führt jedoch zu einem großen Abstand zwischen dem Separatorende und der Eingangsöffnung des zweiten Resonators. Der Einfluß dieses Abstandes muß beim Aufbau des Masers berücksichtigt werden.

2. Aufbau des Masers mit zwei Resonatoren

Abb. 2 zeigt die Versuchsanordnung. Der Ammoniakstrahl tritt aus einer Düse von 6 mm Gesamtdurchmesser aus, die zur Erhöhung der Richtwirkung aus etwa 800 Kanälen von je 100 μ Öffnung und 12 mm Länge besteht. Der Strahl durchläuft den 6-poligen Separator von 30 cm Länge und anschließend nacheinander zwei Resonatoren. Die Anordnung ist in ein Vakuumgefäß eingebaut, das durch zwei Öldiffusionspumpen (Leybold DO 501) evakuiert werden kann. Während des Versuches läßt sich ein Vakuum von $3 \cdot 10^{-6}$ Torr aufrechterhalten.

Es ist dabei allerdings eine mit flüssiger Luft beschickte Kühlfalle erforderlich, die den Separator zylindrisch umgibt.

Im folgenden wird der im Vorbehälter (Abb. 2) vorhandene Druck als Quellendruck bezeichnet.

3. Meßanordnung

In der Abb. 3 ist die Meßeinrichtung schematisch dargestellt. Die Ausgänge der beiden Resonatoren werden getrennt ausgewertet. Wegen der getrennten Verstärkungswege sind in den späteren Messungen (Abb. 6 und 7) die relativen Amplituden der Resonatoren 1 und 2 nicht miteinander vergleichbar.

Da die vom Ammoniakstrahl-Maser abgegebene Leistung sehr klein ist, wird für die Messungen das Überlagerungsverfahren (Abb. 3) verwendet. Die von den Ammoniak-Molekülen im Resonator abgegebene Energie wird ausgekoppelt und über einen E-H Tuner auf eine Diode (1 N26) gegeben. An der Diode erfolgt die Mischung mit einer um 60 MHz neben der jeweils verwendeten Ammoniak-Linie liegenden Frequenz eines Reflex-Klystrons (2K33). Das Mischprodukt von 60 MHz wird verstärkt, gleichgerichtet und einem Oszillographen zugeführt. Die X-Ablenkung des Oszillographen erfolgt mit einer Frequenz von 50 Hz, mit der auch die Klystronfrequenz moduliert wird. Der Z-F Verstärker besitzt 80 dB Verstärkung und etwa 6 MHz Bandbreite.

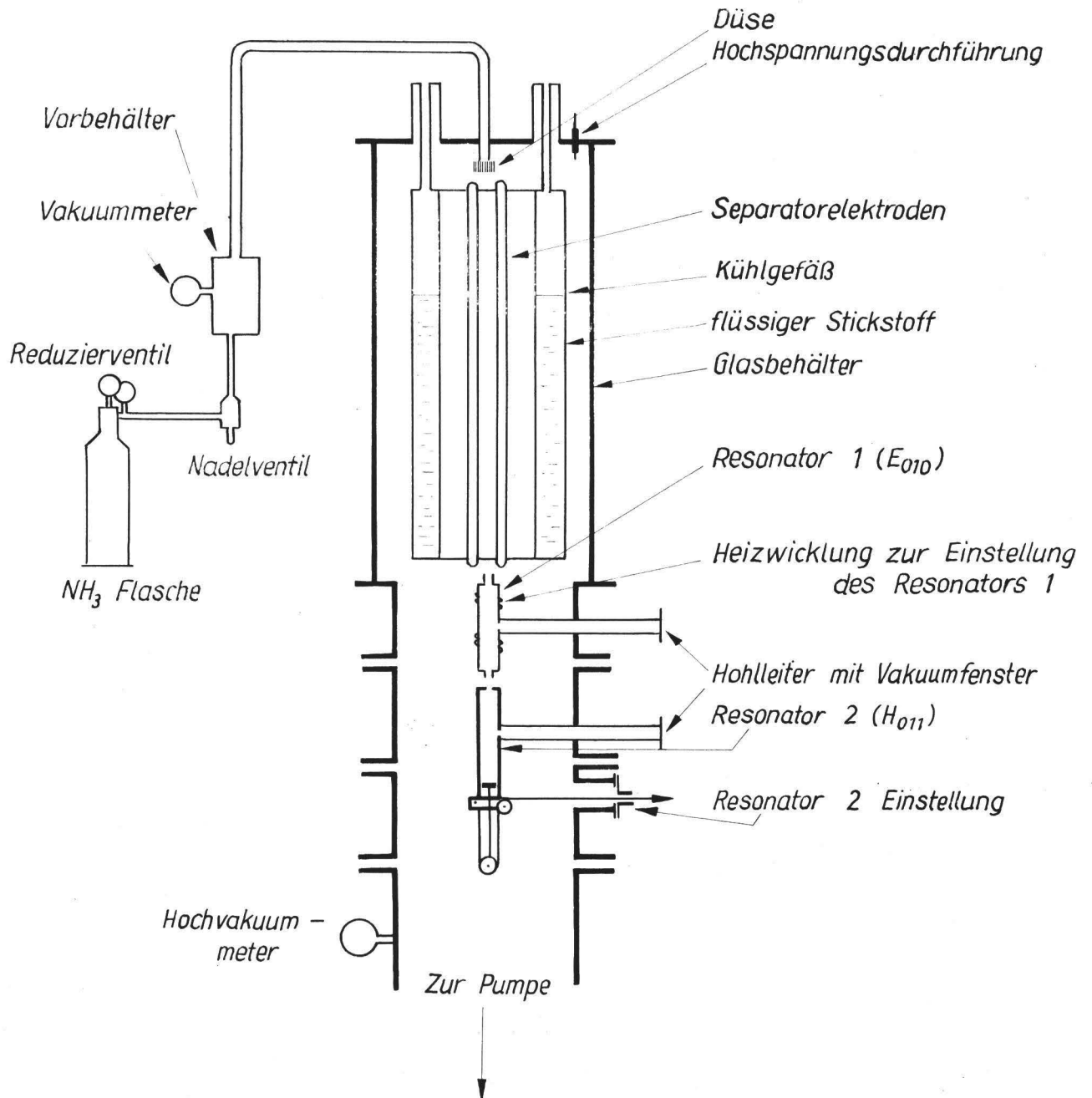


Abb. 2 Aufbau des Masers mit 2 Resonatoren

In den Versuchen war der Resonator 2 auf Resonanz fest eingestellt, während der Resonator 1 durch Erwärmung verstellt wurde.

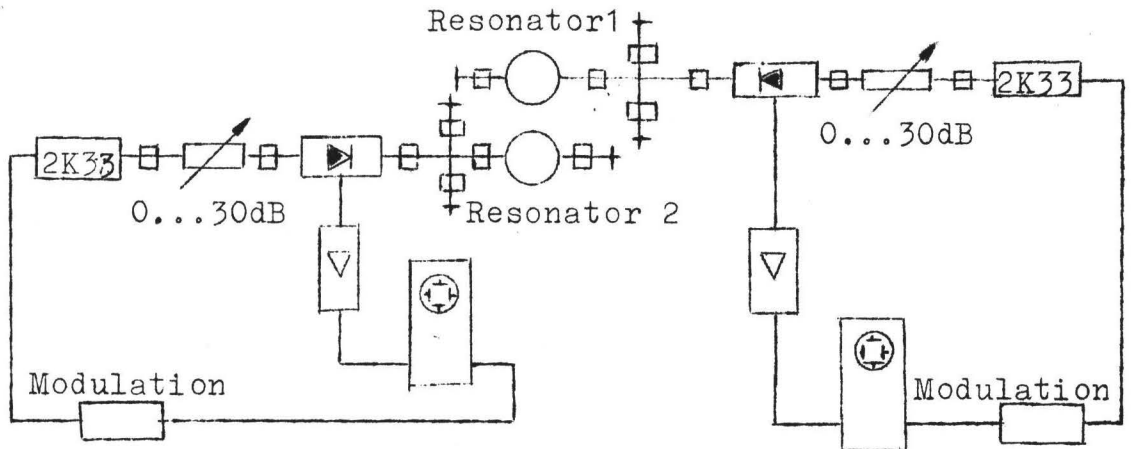


Abb. 3: Meßanordnung für den Aufbau mit zwei Resonatoren

4. Die verwendeten Resonatoren

Es wurden folgende Resonatoren angefertigt; sie waren kreiszylindrisch und hatten eine versilberte Innenwand:

- A. E_{010} -Resonator für die Ammoniak-Linie $J=K=3$ mit der Inversionsfrequenz, $f = 23870$ MHz
- B. Ein zweiter E_{010} -Resonator für die gleiche Ammoniak-Linie
- C. E_{010} -Resonator für die Linie $J=K=2$, $f = 23722$ MHz
- D. H_{011} -Resonator für die Linie $J=K=3$
 J, K geben die Rotationsquantenzahlen an.

Resonator A: Der Resonator war aus Messing und besaß einen Durchmesser von 9,59 mm und eine Länge von 130 mm. Die berechnete unbelastete Güte dieses Resonators war $11 \cdot 10^3$ und die gemessene belastete Güte etwa $6 \cdot 10^3$. Da bei der E_{010} -Resonanz die Frequenz von der Länge des Resonators unabhängig ist, erfolgte die Frequenzabstimmung durch Änderung des Durchmessers mittels Erwärmung.

Zu diesem Zweck wurde der Resonator mit einer Heizwicklung umgeben. Konstantan-Manganin Thermolemente dienten zur Temperatur-Messung. Etwa 1,5 Watt Heizleistung wurde zur Abstimmung des Resonators gebraucht. Zur Wärmeisolierung wurde der Hohlleiter aus V2A-Stahl hergestellt. Der Resonator war an beiden Enden durch "Cut-off"-Stücke mit einem Öffnungsdurchmesser von 8,4 mm abgeschlossen.

Resonator B: Dieser Resonator hatte eine Länge von 90 mm. Sonst entsprach er Resonator A.

Resonator C: Dieser Resonator entsprach ebenfalls Resonator A. Er hatte jedoch einen durch die Resonanzfrequenz bedingten größeren Durchmesser von 9,65 mm bei einer Länge von 90 mm.

Resonator D: Der H_{011} -Resonator für die $J=K=3$ Linie bestand aus Invar-Stahl, hatte 15,354 mm Durchmesser und 120 mm Länge. An einem Ende besaß der Resonator ein Loch von 9,5 mm Durchmesser, das als Eingang für die aus dem Separator austretenden Moleküle diente. Der Resonator war mit einem Kolben abstimmbar. Das kleine D/L Verhältnis (D = Durchmesser, L = Länge) bei diesem Resonator begrenzte seinen Einstellbereich, da sonst Störungen durch andere Schwingungsmoden aufgetreten wären. Der Durchmesser des Koppelloches betrug 2,5 mm. Die berechnete unbelastete Güte dieses Resonators war $17 \cdot 10^3$ und die gemessene belastete Güte $7,5 \cdot 10^3$.

Die Hohlleiter waren bei jedem Resonator mit einem vakuumdichten Glimmerfenster versehen.

5. Einfluß der Resonatoröffnung und des Abstandes des Resonators vom Separator

Bei den ersten Versuchen wurde als Resonator 1 der Resonator A und für Resonator 2 der Resonator D verwendet. In diesem Aufbau wurde bei Abstimmung auf die Ammoniakfrequenz im Resonator 1 eine Schwingung beobachtet. Im Resonator 2 ließ sich dagegen keine Schwingung erregen, auch nicht als der Resonator 1 verstimmt wurde. Durch den Einbau des Resonators 1 betrug der Abstand zwischen Separator und Resonator 2 etwa 140 mm. Wie bereits im Abschnitt 1 dargelegt

wurde, ist dieser große Abstand die Ursache dafür, daß der Resonator 2 sich nicht zu Schwingungen anregen ließ. Der Einfluß des Abstandes wurde daher genauer untersucht.

Der Resonator 1 wurde entfernt und der Abstand zwischen Separator und Resonator 2 erst auf 130 mm und dann auf 90 mm eingestellt. In beiden Fällen ließen sich Schwingungen anregen. Die Meßkurven (Abb.4) zeigen jedoch, daß die Amplitude der Schwingung mit wachsender Entfernung des Resonators vom Separator abnimmt.

Weiterhin wurde bei einer konstanten Entfernung von 90 mm zwischen Resonator und Separator die Strahleingangsöffnung des Resonators verändert. Die in Abb.5 dargestellten Ergebnisse zeigen, daß mit kleiner werdendem Öffnungsdurchmesser die Schwingungsamplitude abnimmt.

Die Meßergebnisse lassen sich leicht deuten. Der Ammoniakstrahl tritt divergent aus dem Separator aus. Je weiter die Öffnung des Resonators vom Ende des Separators entfernt ist und je kleiner der Öffnungsdurchmesser ist, umso weniger Moleküle gelangen in den Resonator. Der Resonator braucht jedoch zum Anschwingen eine bestimmte Anzahl von angeregten Molekülen. Daher wurde bei einem größeren Abstand zwischen Resonator und Separator, sowie bei kleineren Resonatoröffnungen ein höherer Quellendruck benötigt. Ein höherer Quellendruck aber verschlechtert seinerseits erstens die Richtwirkung der Düse und zweitens das Vakuum im Maser-Behälter. Beides führt zu einer Abnahme der Schwingungsamplitude und schließlich bei sehr ungünstigen Abmessungen dazu, daß eine Anregung von Schwingungen nicht mehr möglich ist. Dies war der Anlaß, statt des Resonators A die kürzeren Resonatoren B und C für den Resonator 1 zu verwenden.

6. Abstimmung der beiden Resonatoren auf verschiedene Inversionslinien (3-3 und 2-2 Inversion)

Als Resonator 1 diente Resonator C, für den Resonator 2 wurde der Resonator D verwendet. Zum Anschwingen brauchte der Resonator 2 gegenüber einer Anordnung direkt hinter dem Separator etwa doppelt soviel Moleküle. Die Messungen wurden bei den Quellendrücken von 2 und 4 Torr durchgeführt. Der Resonator 2 wurde fest auf die 3-3-Inversion abgestimmt, Resonator 1 wurde durch Erwärmung langsam auf die 2-2-Inversion abgestimmt und dann weiter verstimmt.

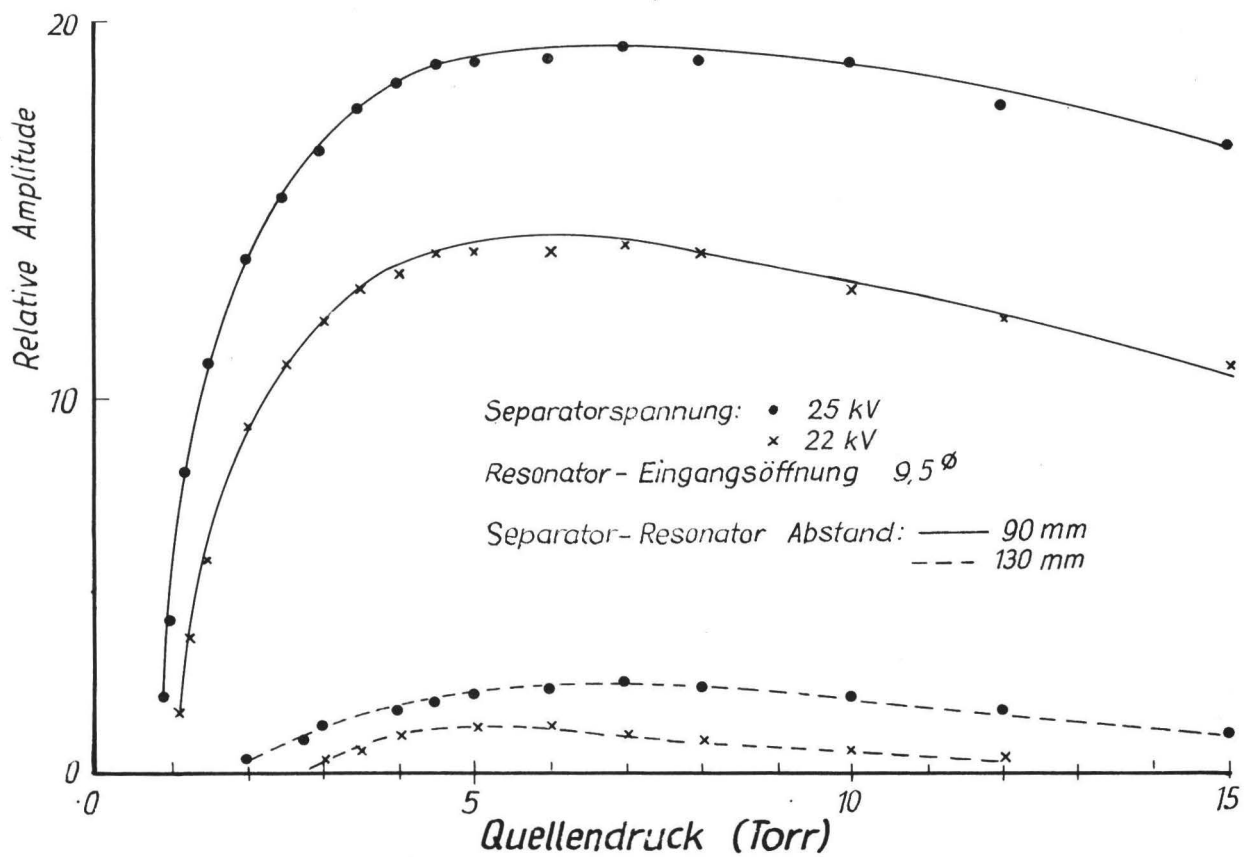


Abb 4 Relative Amplitude in Abhängigkeit vom Quellendruck für verschiedene Abstände Separator - Resonator

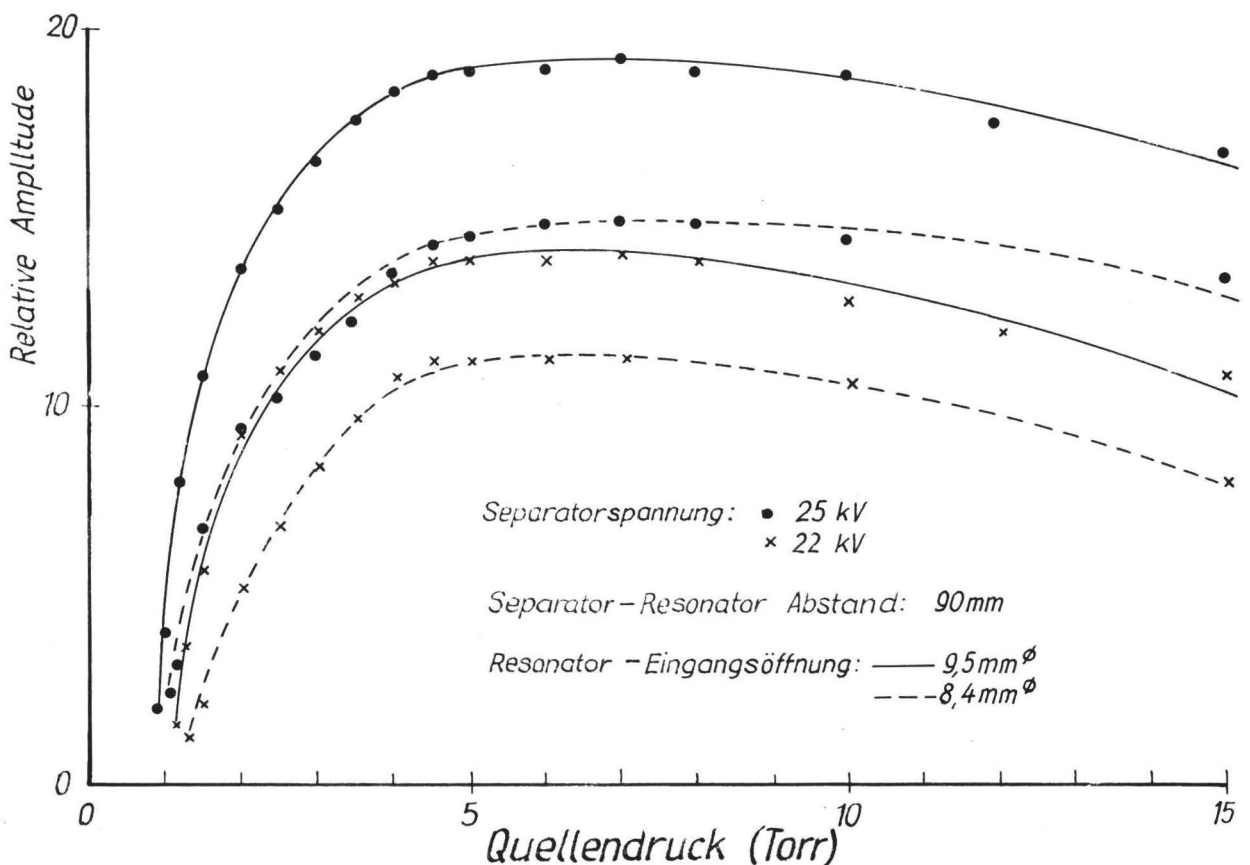


Abb. 5 Relative Amplitude in Abhängigkeit vom Quellendruck für verschiedene Resonator - Eingangsöffnungen

Die Schwingungsamplituden beider Resonatoren wurden dabei gleichzeitig gemessen (Abb.6). Es kam in beiden Resonatoren eine gleichzeitige Schwingung zustande. Eine Änderung der Schwingungsamplitude des Resonators 2 war beim Anschwingen des Resonators 1 nicht zu beobachten. Die Moleküle im höheren Energieniveau der verschiedenen Zustände ($J=K=3$, $J=K=2$) werden im Separator gleichzeitig aussortiert. Die auf Moleküle verschiedener Zustände ausgeübte Kraft des Separators ist jedoch verschieden. Im Resonator 1 geben nur die sich im $J=K=2$ Zustand befindenden Moleküle ihre Energie ab, wobei die angeregten Moleküle im Zustand $J=K=3$ unbeeinflusst weiterfliegen und erst im Resonator 2 emittieren.

7. Abstimmung der beiden Resonatoren auf die gleiche Inversionslinie (3-3 Inversion)

Gegenüber den in Abschnitt 6 beschriebenen Messungen wurde nur der Resonator 1 verändert, für den der auf die 3-3 Inversion abstimmbare Resonator B verwendet wurde. Das Meßverfahren war das gleiche. Im allgemeinen konnten beide Resonatoren nicht gleichzeitig zum Schwingen erregt werden. Eine gleichzeitige Schwingung war nur möglich, wenn der Resonator 1 etwa 5 MHz, gegenüber der 3-3 Inversion verstimmt war (Abb. 7). Näherte sich die Abstimmung des Resonators 1 der Frequenz der Ammoniaklinie, so hörte die Schwingung im Resonator 2 allmählich auf, d.h. in diesem Falle wurde im Resonator 1 der größte Teil der Moleküle zur Emission angeregt. Die Erklärung hierfür liegt darin, daß die Übergangswahrscheinlichkeit am größten ist, wenn die Resonatorfrequenz mit der Ammoniaklinie übereinstimmt. Mit zunehmender Verstimmung des Resonators 1 wird die Übergangswahrscheinlichkeit geringer, infolgedessen durchlaufen immer mehr angeregte Moleküle den Resonator 1, ohne zu emittieren bis ihre Zahl ausreicht, den Resonator 2 zum Schwingen zu bringen.

In der Abb. 7 fällt auf, daß die Steigung der Kurven für den Resonator 1 bei Amplitudenzunahme kleiner ist als die Steigung der Kurven bei Amplitudenabnahme für den Resonator 2. Die Energiezunahme bei Resonator 1 ist also kleiner als deren Abnahme im Resonator 2.

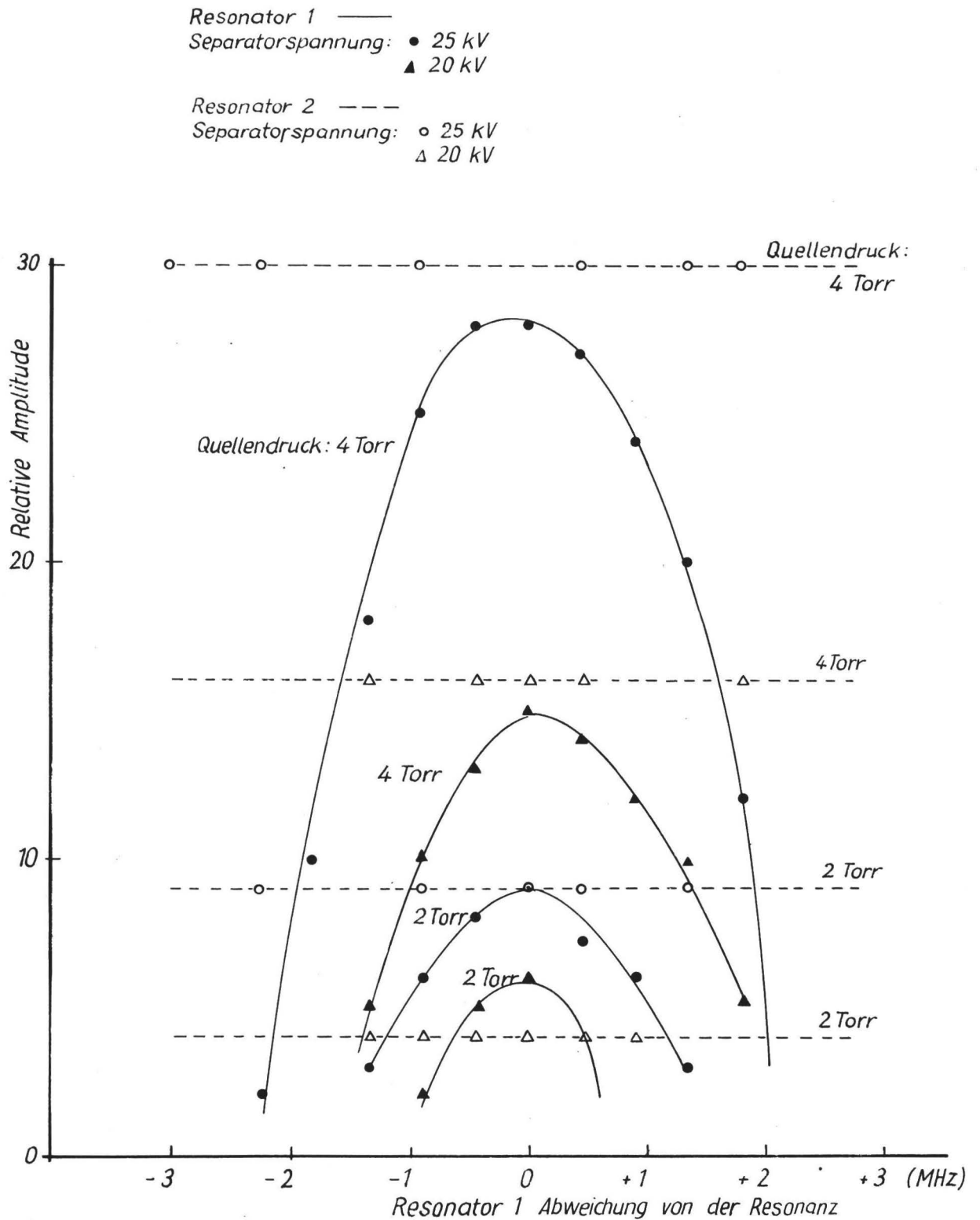


Abb. 6 Abhängigkeit der relativen Amplitude von der Einstellung des Resonators 1 im Aufbau mit zwei Resonatoren.
 (Res. 1: E_{010} , $(J,K)=(2,2)$ Linie, Res. 2: H_{011} , $(J,K)=(3,3)$ Linie)

Die Amplituden der beiden Kurvenscharen sind untereinander nicht vergleichbar.

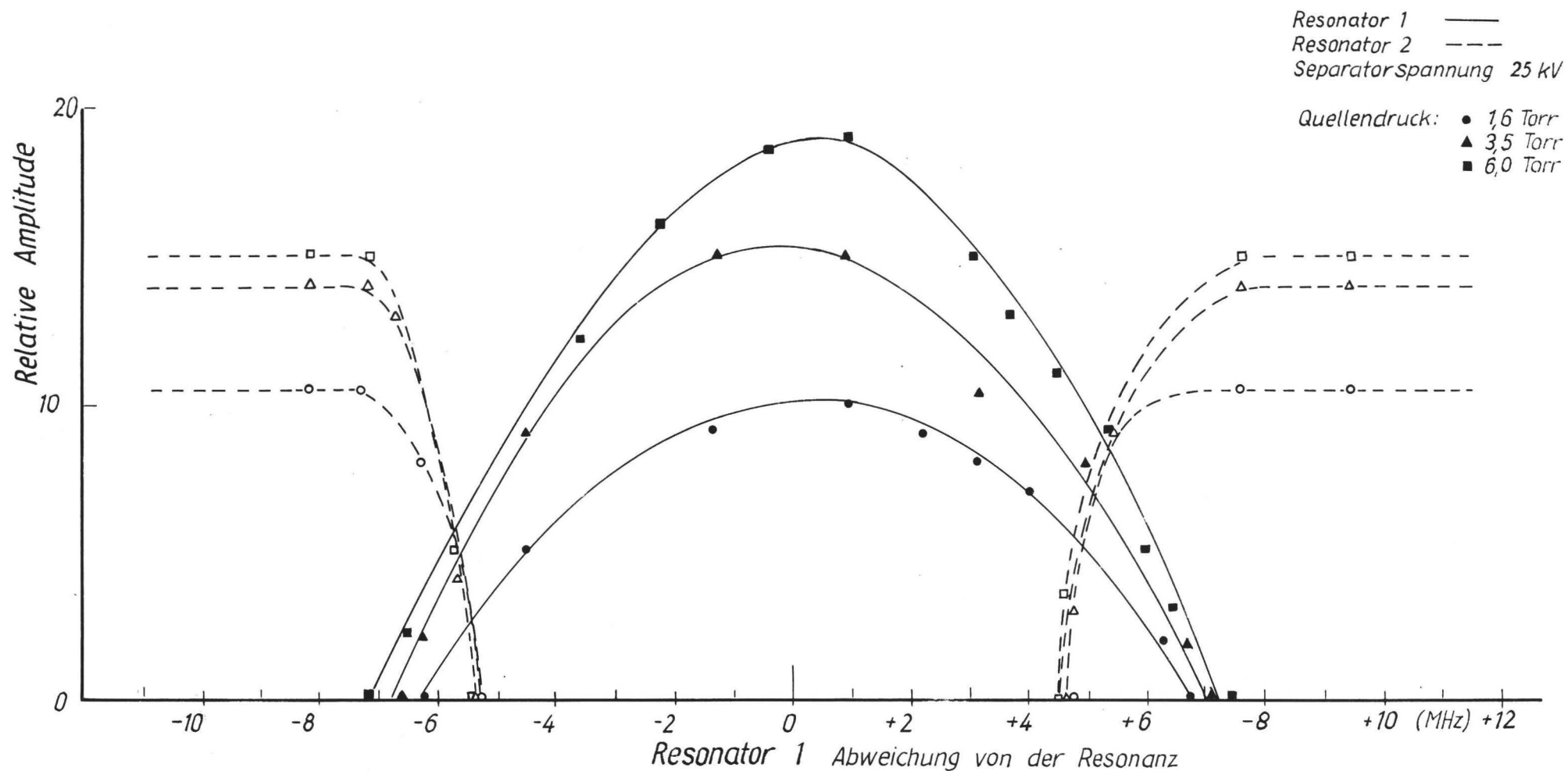


Abb. 7 Abhängigkeit der relativen Amplitude von der Einstellung des Resonators 1 im Aufbau mit zwei Resonatoren (Res. 1: $E_{010}(J,K) = (3,3)$ Linie Res. 2: $H_{011}(J,K) = (3,3)$ Linie) Die Amplituden der beiden Kurvenscharen sind untereinander nicht vergleichbar.

Man kann dieses Verhalten dadurch erklären, daß beim Anschwingen des Resonators 1 ein Teil der angeregten Moleküle schon in diesem Resonator in den Grundzustand übergeht. Dies bedeutet, daß sie Energiequanten im Resonator 1 abgeben, die sie sonst vor dem Anschwingen von Resonator 1 im Resonator 2 abgegeben hätten. Der Resonator 2 verliert also nicht nur diese Energiequanten, sondern sogar die doppelte Menge pro Zeiteinheit, weil die bereits im Resonator 1 emittierenden Moleküle als Moleküle im niedrigeren Energiezustand in den Resonator 2 gelangen und dort wieder Energiequanten absorbieren. So ist für jedes Quantum Energiezunahme im Resonator 1 ein effektiver Energieverlust von zwei Quanten im Resonator 2 verbunden, woraus sich die Verschiedenheit der Steigung der Kurven erklärt.

8. Literaturverzeichnis

I. Zusammenfassende Untersuchungen, die die Arbeitsweise und die weitere Entwicklung des Ammoniak-Strahl-Masers zeigen.

A. Allgemeine Untersuchungen

- /1/ J.P. GORDON Phys. Rev. 99 (1955) 1264
H.J. ZEIGER,
C.H. TOWNES
- /2/ K. SHIMODA Phys. Rev. 102 (1956) 1308
T.G. WANG,
C.H. TOWNES
- /3/ J. HELMER Journ. Appl. Phys. 28 (1957) 212
- /4/ K. SHIMODA Journ. Phys. Soc. Japan 12 (1957) 1006
- /5/ K. SHIMODA Journ. Phys. Soc. Japan 13 (1958) 939
- /6/ F.S. BARNES Proc. IRE 47 (1959) 2085
- /7/ A.M.J. MITCHELL, Electronic Techn. 37 (1960) 136
K.G. ROOTES,
G. PHILLIPS
- /8/ K. SHIMODA IRE-Transact. I-11 (1962) 195

B. Verwendung der 3-3 Inversion von $N^{15}H_3$

- /9/ J. DE PRINS IRE-Transact. I-11 (1962) 200
- /10/ W.W. NIKITIN Radiotechn. i Elektr. 8 (1963) 153

C. Verwendung der 3-2 Inversion von $N^{14}H_3$

- /11/ K. SHIMODA Journ. Phys. Soc. Japan 16 (1961) 2270
- /12/ N.G. BASOV, Radiotechn. i Elektr. 6 (1961) 1020
I.V. CHEREMISKIN,
G.M. STRAKHOVSKY
- /13/ Y. SABURI, IRE-Transact. I-11 (1962) 204
M. KOBZYASHI,
Y. YASUDA,
K. HARADA

II. Arbeiten, in denen ebenfalls zwei Resonatoren hintereinander angeordnet wurden.

- /14/ W.H. HIGA Rev. Sci. Instr. 28 (1957) 726
- /15/ W.H. WELLS Journ. Appl. Phys. 29 (1958) 714
- /16/ E.M. BELENOFF, Radiotechn. i Elektr. 8 (1963) 158
A.N. ORAEWSKIJ

III. Untersuchungen der Funktion von Düsen und Separatoren (vergl. I.A.)

- | | | |
|------|--|----------------------------------|
| /17/ | K.G. GÜNTHER | Zeitschr.angew.Phys.9 (1957)550 |
| /18/ | J.A. GORDMAINE,
T.C. WANG | Quantum Electronics 1 (1959) 67 |
| /19/ | J.C. HELMER,
F.B. JACOBUS,
P.A. STURROCK | Journ.Appl.Phys.31 (1960) 458 |
| /20/ | G. BECKER | Zeitschr.angew.Phys.13 (1961)59 |
| /21/ | G. BECKER | Zeitschr.angew.Phys.15 (1963)281 |

