

## Mikrowellenspektrum und Struktur von Fluortribromsilan und Methyltribromsilan

M. MITZLAFF, R. HOLM und H. HARTMANN

Institut für Physikalische Chemie der Universität Frankfurt a. Main

(Z. Naturforsch. **23 a**, 1819—1821 [1968]; eingegangen am 14. August 1968)

The microwave spectra of  $\text{SiFBr}_3$  and  $\text{CH}_3\text{SiBr}_3$  have been investigated in the region from 30 to 40 GHz. Assuming reasonable values for  $d_{\text{Si-F}}$ ,  $d_{\text{Si-C}}$  and the methyl group a least squares analysis of the rotational constants yields

|                            |                                 |                           |
|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|
|                            | $d_{\text{Si-Br}}$              | $\angle \text{Br-Si-Br}$  |
| $\text{SiFBr}_3$           | $(2,171 \pm 0,001) \text{ \AA}$ | $(111,36 \pm 0,15)^\circ$ |
| $\text{CH}_3\text{SiBr}_3$ | $(2,175 \pm 0,001) \text{ \AA}$ | $(111,09 \pm 0,15)^\circ$ |

A barrier to internal rotation of about 1 kcal/mole is estimated by the intensity method.

In Fortsetzung unserer mikrowellenspektroskopischen Untersuchungen<sup>1-3</sup> an Halogen- und Methyltrihalogenderivaten des Monosilans haben wir das Rotationsspektrum von Fluortribromsilan und Methyltribromsilan vermessen. Dabei stand einmal die Verkürzung des Si-Halogen-Abstandes mit zunehmender Halogenierung des  $\text{SiH}_4$  im Vordergrund. Zum anderen wurde bei Methylchloroform<sup>4</sup> und Methyltrichlorsilan<sup>2</sup> für das leichte und schwere Chlorisotop eine unterschiedliche Aufspaltung des Torsionssatelliten beobachtet. Methyltribromsilan bietet die Möglichkeit festzustellen, ob dieser Effekt auch bei den beiden Bromisotopen auftritt<sup>5</sup>.

## Experimentelles

Fluortribromsilan wurde nach dem Verfahren von SCHMEISSER und JENKNER<sup>6</sup> dargestellt: In mehreren Ansätzen wurden in einem 1 l-Kolben 300 g getrocknetes  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  und 300 g wasserfreies, feingepulvertes  $\text{AlBr}_3$  gut durchmischt, im Ölbad sehr vorsichtig bis auf 280 °C erwärmt und die entstehenden flüchtigen Bestandteile in einer auf -60 °C gekühlten Falle aufgefangen. Aus dem kondensierten Gemisch von  $\text{SiBr}_4$ ,  $\text{SiFBr}_3$  und  $\text{SiF}_2\text{Br}_2$  konnte durch zweimalige fraktionierte Destillation das  $\text{SiFBr}_3$  (Siedepunkt 85 °C) so rein erhalten werden, daß keine Linien des  $\text{SiF}_2\text{Br}_2$  im Spektrum gefunden wurden.

Für die Synthese von Methyltribromsilan ist das Verfahren von ROCHOW<sup>7</sup> im Labormaßstab weniger ge-

eignet als die Vorschrift nach McCUSKER und REILLY<sup>8</sup>: Methylmagnesiumbromid wird in ätherischer Lösung mit  $\text{SiBr}_4$  umgesetzt. Von den beiden entstehenden Schichten wird die untere verworfen und die obere nach Aufarbeiten mit  $\text{CCl}_4$  mehrmals destilliert. Dies geschah mit besonderer Sorgfalt, da die Siedepunkte der Methylbromsilane ziemlich dicht beieinander liegen<sup>8</sup>. Die Probe mit dem Siedebereich von 134 bis 135 °C bei 762 Torr wurde untersucht.

Beide Substanzen sind farblose Flüssigkeiten, die weniger sauerstoff- und wasserempfindlich sind als Tribromsilan. Die Messungen wurden mit einem Stark-Mikrowellenspektrographen mit 20 kHz-Rechteckmodulation bei Feldstärken von 200 bis 400 V/cm im Bereich von 30 bis 40 GHz durchgeführt. Als Strahlungsquelle diente ein Rückwärtswellenoszillator RWO 40 der Firma Siemens AG. Die Frequenzmessung erfolgte mit der Frequenzdekade FD 3 der Firma Schomandl KG, deren Steuerquarz mit der Trägerfrequenz des Senders Droitwich verglichen wird<sup>9</sup>.

Bei -70 °C hatte  $\text{SiFBr}_3$  einen Dampfdruck von etwa  $10^{-1}$  Torr und  $\text{CH}_3\text{SiBr}_3$  einen von etwa  $2 \cdot 10^{-2}$  Torr. Die Intensität der Linien nahm jeweils mit kleiner werdendem  $J$  stark ab. Innerhalb eines Überganges waren die Linien der asymmetrischen Spezies entsprechend der Häufigkeitsverteilung der Bromisotope ungefähr dreimal so intensiv wie die der symmetrischen Spezies.

## Spektren

Die gemessenen Frequenzen sind in Tab. 1 zusammengestellt. Die Genauigkeit der Absorptions-

<sup>1</sup> R. HOLM, M. MITZLAFF u. H. HARTMANN, Z. Naturforsch. **22 a**, 1287 [1967].

<sup>2</sup> M. MITZLAFF, R. HOLM u. H. HARTMANN, Z. Naturforsch. **22 a**, 1415 [1967].

<sup>3</sup> M. MITZLAFF, R. HOLM u. H. HARTMANN, Z. Naturforsch. **23 a**, 65 [1968].

<sup>4</sup> R. HOLM, M. MITZLAFF u. H. HARTMANN, Z. Naturforsch. **23 a**, 307 [1968].

<sup>5</sup> Die zunächst näherliegende Untersuchung von Methylbromoform ließ sich nicht durchführen, da eine Synthese nach J. TAYLOR, J. Chem. Soc. London **1935**, 1519, sowie anderen Methoden nicht gelang.

<sup>6</sup> M. SCHMEISSER u. H. JENKNER, D.B.P. 901 412 und 912 330 [1953].

<sup>7</sup> E. G. ROCHOW, J. Am. Chem. Soc. **67**, 965 [1945].

<sup>8</sup> P. A. McCUSKER u. E. L. REILLY, J. Am. Chem. Soc. **75**, 1583 [1952].

<sup>9</sup> E. F. KOPS, Diplomarbeit, Frankfurt (Main) 1967.

frequenzen der symmetrischen Spezies beträgt  $\pm 0,05$  MHz, die der asymmetrischen Spezies auf Grund der größeren Linienbreite  $\pm 0,3$  MHz. Die asymmetrischen Fälle verhalten sich näherungsweise wie symmetrische Kreisel ( $z_{\text{SiFBr}_3} = 0,93$ ,  $z_{\text{CH}_3\text{SiBr}_3} = 0,94$ ) mit der Rotationskonstanten

$$B' = \frac{1}{2} (A + B);$$

denn die intensivsten Linien eines Überganges liegen so dicht beieinander, daß sie nicht aufgelöst werden können.

|  | $J \rightarrow J'$ | $f_{\text{gem}}$ | $B'$    |
|--|--------------------|------------------|---------|
| SiFBr <sub>3</sub> <sup>81</sup>                                 | 18 → 19            | 31352,000        | 825,053 |
|  | 19 → 20            | 33001,340        | 825,034 |
|  | 20 → 21            | 34651,150        | 825,027 |
|  | 21 → 22            | 36300,485        | 825,011 |
|  | 22 → 23            | 37950,384        | 825,008 |
|  | 23 → 24            | 39600,400        | 825,008 |
| SiFBr <sup>79</sup> Br <sub>2</sub> <sup>81</sup>                | 18 → 19            | 31575,040        | 830,92  |
|  | 19 → 20            | 33234,920        | 830,87  |
|  | 20 → 21            | 34897,025        | 830,88  |
|  | 21 → 22            | 36558,005        | 830,86  |
|  | 23 → 24            | 39882,200        | 830,88  |
| SiFBr <sub>2</sub> <sup>79</sup> Br <sup>81</sup>                | 18 → 19            | 31802,500        | 836,91  |
|  | 19 → 20            | 33474,280        | 836,86  |
|  | 20 → 21            | 35147,760        | 836,85  |
|  | 21 → 22            | 36821,630        | 836,86  |
|  | 22 → 23            | 38494,005        | 836,83  |
|  | 23 → 24            | 40170,800        | 836,89  |
| SiFBr <sub>3</sub> <sup>79</sup>                                 | 18 → 19            | 32034,380        | 843,010 |
|  | 19 → 20            | 33719,420        | 842,986 |
|  | 20 → 21            | 35404,620        | 842,967 |
|  | 21 → 22            | 37090,435        | 842,964 |
|  | 22 → 23            | 38775,000        | 842,935 |
|  | 23 → 24            | 40458,320        | 842,882 |
| CH <sub>3</sub> SiBr <sub>3</sub> <sup>81</sup>                  | 18 → 19            | 30605,462        | 805,407 |
|  | 19 → 20            | 32216,008        | 805,400 |
|  | 20 → 21            | 33826,550        | 805,394 |
|  | 21 → 22            | 35437,236        | 805,392 |
|  | 22 → 23            | 37047,512        | 805,381 |
|  | 23 → 24            | 38657,922        | 805,373 |
| CH <sub>3</sub> SiBr <sup>79</sup> Br <sub>2</sub> <sup>81</sup> | 18 → 19            | 30816,874        | 810,97  |
|  | 19 → 20            | 32437,450        | 810,94  |
|  | 20 → 21            | 34057,620        | 810,90  |
| CH <sub>3</sub> SiBr <sub>2</sub> <sup>79</sup> Br <sup>81</sup> | 18 → 19            | 31032,400        | 816,64  |
|  | 19 → 20            | 32665,012        | 816,63  |
|  | 20 → 21            | 34205,620        | 816,56  |
| CH <sub>3</sub> SiBr <sub>3</sub> <sup>79</sup>                  | 18 → 19            | 31252,040        | 822,422 |
|  | 19 → 20            | 32896,450        | 822,411 |
|  | 20 → 21            | 34541,005        | 822,405 |
|  | 21 → 22            | 36185,604        | 822,400 |
|  | 22 → 23            | 37830,198        | 822,396 |
|  | 23 → 24            | 39474,480        | 822,385 |
|  | 24 → 25            | 41119,122        | 822,382 |

Tab. 1. Absorptionsfrequenzen von Fluortribromsilan und Methyltribromsilan (alle Angaben in MHz).

Ohne Berücksichtigung einer Verschiebung des Linienmaximums durch Quadrupoleffekte erhält man das Spektrum der symmetrischen Spezies aus der Formel

$$f = 2 B_0 (J + 1) - 4 D_J (J + 1)^3 - 2 D_{\text{JK}} (J + 1) K^2$$

mit der Rotationskonstanten des Schwingungsgrundzustandes  $B_0$  und mit den Zentrifugalaufweitungskonstanten  $D_J$  und  $D_{\text{JK}}$ . Vernachlässigt man den Term mit  $D_{\text{JK}}$ , so ergibt sich aus den Frequenzen in Tab. 1:

|   | $B_0$ [MHz] | $D_J$ [kHz] |
|---|-------------|-------------|
| SiFBr <sub>3</sub> <sup>79</sup>                | 843,165     | 0,110       |
| SiFBr <sub>3</sub> <sup>81</sup>                | 825,093     | 0,075       |
| CH <sub>3</sub> SiBr <sub>3</sub> <sup>79</sup> | 822,473     | 0,078       |
| CH <sub>3</sub> SiBr <sub>3</sub> <sup>81</sup> | 805,463     | 0,078       |

Bei den Rotationslinien der symmetrischen Fälle konnte bis  $J=25$  wie bei Tribromsilan<sup>3</sup> keine K-Aufspaltung aufgelöst werden. Jedoch zeigten diese Linien mit wachsendem  $J$  eine immer stärker ausgeprägte Unsymmetrie durch einen steileren Anstieg auf der Seite tieferer Frequenzen. Der flachere Abfall auf der Seite höherer Frequenzen läßt auf eine negative Konstante  $D_{\text{JK}}$  schließen, deren Betrag sich folgendermaßen aus der Linienbreite abschätzen läßt: Für symmetrische Kreisel mit nahezu gleich großem Trägheitsmoment bezüglich der drei Hauptträgheitsachsen ist die Besetzungsdichte der einzelnen K-Niveaus bei gegebener Temperatur fast gleich. Die Linienintensität nimmt proportional  $[1 - K^2 / (J + 1)^2]$  ab. Daraus folgt, daß für den Übergang  $J=24 \rightarrow 25$  bei CH<sub>3</sub>SiBr<sub>3</sub><sup>79</sup> die Linie für  $K=18$  etwa halb so intensiv ist wie die für  $K=0$ . Aus einer gemessenen halben Halbwertsbreite von 1 MHz ergibt sich somit

$$D_{\text{JK}} \approx -0,06 \text{ kHz.}$$

Bei Fluortribromsilan trat die Unsymmetrie weniger stark in Erscheinung, so daß sich bei einer halben Halbwertsbreite von 0,6 MHz des Überganges  $J=22 \rightarrow 23$  für  $K=16$  errechnet:

$$D_{\text{JK}} \approx -0,04 \text{ kHz.}$$

Die Übergänge der symmetrischen Spezies zeigen, wie schon auf Grund der leicht anregbaren Si-Br-Valenz- und Deformationsschwingungen zu erwarten ist, eine komplizierte Schwingungsfeinstruktur. Der bei Methyltribromsilan auf der Seite tieferer Frequenzen im Vergleich zu Tribromsilan<sup>3</sup> und Fluor-

tribromsilan zusätzlich auftretende intensive Satellit läßt sich der Torsion der  $\text{CH}_3$ - gegen die  $\text{SiBr}_3$ -Gruppe zuschreiben. Er hat eine Rotationskonstante von 804,8 MHz für  $\text{CH}_3\text{SiBr}_3^{81}$  bzw. 821,8 MHz für  $\text{CH}_3\text{SiBr}_3^{79}$  und ist wie bei Methylchloroform<sup>4</sup> und Methyltrichlorsilan<sup>2</sup> in zwei Linien aufgespalten, die bei  $J=19 \rightarrow 20$  einen Abstand von 6,5 MHz haben. Die Größe der Aufspaltung ist im Unterschied zu den Chlorverbindungen für beide Bromisotope gleich. Aus dem Intensitätsverhältnis der Rotationslinien im Torsionsgrundzustand zu den beiden Linien im ersten angeregten Torsionszustand läßt sich das Hinderungspotential zu

$$V_3 \approx 1 \text{ kcal/mol}$$

abschätzen.

### Struktur

Absorptionslinien für  $\text{Si}^{29,30}$ -Spezies konnten nicht einwandfrei identifiziert werden. Da Fluor nicht durch ein Isotop ersetzbar ist und kein deuteriertes und  $\text{C}^{13}$ -angereichertes Methyltribromsilan zur Verfügung stand, ist eine Strukturbestimmung nach der Methode von Kraitchman unmöglich. Auch für eine vollständige Bestimmung der  $r_0$ -Struktur reicht die Anzahl der gemessenen Rotationskonstanten nicht aus. Daher wurden die Werte  $d_{\text{Si-F}}$  mit 1,56 Å,  $d_{\text{Si-C}}$  mit 1,90 Å und für die Methylgruppe die Parameter von Methan ( $d_{\text{C-H}} = 1,093 \text{ Å}$ ,  $\sphericalangle \text{H-C-H} = 109,35^\circ$ ) angesetzt. Die beste Anpassung an die gemessenen Rotationskonstanten ergab sich dann mit den in Tab. 2, Spalten 1 und 3, angegebenen Daten. Die mit den angeführten Strukturparametern berechneten Rotationskonstanten sind den gemessenen in Tab. 3 gegenübergestellt. Bei den asymmetrischen Fällen ist eine bessere Übereinstimmung nicht zu erwarten, da die angegebenen Rotationskonstanten nur eine grobe Näherung zur Beschreibung des Spektrums darstellen.

|   | Gemessen <sup>a</sup> | Berechnet <sup>b</sup> |
|---|-----------------------|------------------------|
| $\text{SiFBr}_3^{79}$                         | 843,165               | 843,150                |
| $\text{SiFBr}_2^{79}\text{Br}^{81}$           | 836,86                | 837,16                 |
| $\text{SiFBr}^{79}\text{Br}_2^{81}$           | 830,88                | 831,12                 |
| $\text{SiFBr}_3^{81}$                         | 825,093               | 825,109                |
| $\text{CH}_3\text{SiBr}_3^{79}$               | 822,473               | 822,540                |
| $\text{CH}_3\text{SiBr}_2^{79}\text{Br}^{81}$ | 816,62                | 816,88                 |
| $\text{CH}_3\text{SiBr}^{79}\text{Br}_2^{81}$ | 810,94                | 811,08                 |
| $\text{CH}_3\text{SiBr}_3^{81}$               | 805,463               | 805,359                |

Tab. 3. Vergleich der gemessenen und berechneten Rotationskonstanten [MHz] von Fluortribromsilan und Methyltribromsilan.

<sup>a</sup> Bei den symmetrischen Spezies sind die  $B_0$ -Werte, bei den asymmetrischen die Mittelwerte aus der  $B'$ -Spalte (ohne  $D_J$ -Korrektur!) der Tab. 1 aufgenommen worden.

<sup>b</sup> mit den Parametern:

| $\text{SiFBr}_3$                                 | $\text{CH}_3\text{SiBr}_3$                       |
|--|--|
| $d_{\text{Si-F}} = 1,5607 \text{ Å}$             | $d_{\text{C-H}} = 1,093 \text{ Å}$               |
| $d_{\text{Si-Br}} = 2,1706 \text{ Å}$            | $d_{\text{Si-C}} = 1,90 \text{ Å}$               |
| $\sphericalangle \text{Br-Si-Br} = 111,36^\circ$ | $d_{\text{Si-Br}} = 2,17495 \text{ Å}$           |
|  | $\sphericalangle \text{H-C-H} = 109,39^\circ$    |
|  | $\sphericalangle \text{Br-Si-Br} = 111,09^\circ$ |

Die Struktur der  $\text{SiBr}_3$ -Gruppe ist bei Tribromsilan und Fluortribromsilan im Rahmen der Meßgenauigkeit gleich. Eine weitere Verkürzung des Si-Br-Abstandes beim Ersatz von Wasserstoff durch Fluor hat nicht stattgefunden. Im Falle der entsprechenden Chlorverbindungen war dagegen eine geringe Verkürzung des Si-Cl-Abstandes wahrscheinlich<sup>1,2</sup>. Bei Methyltribromsilan ist  $d_{\text{Si-Br}}$  etwas länger als bei Fluortribromsilan, aber auch hier trat eine deutliche Verkürzung gegenüber Trimethylbromsilan<sup>11</sup> [ $d_{\text{Si-Br}} = (2,24 \pm 0,02) \text{ Å}$ ] auf.

Wir danken Herrn Professor Dr. V. FREISE für seine Unterstützung und Herrn Privatdozenten Dr. K. HENSEN für seine Beratung bei der Herstellung der Substanzen. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sind wir für die großzügige Bereitstellung von Personal- und Sachmitteln zu besonderem Dank verpflichtet. — Ein Teil der Rechnungen wurde im DRZ, Darmstadt, ausgeführt.

|                              | $\text{SiFBr}_3$          | $\text{SiHBr}_3^3$        | $\text{CH}_3\text{SiBr}_3$ | $\text{CH}_3\text{SiBr}_3^{10}$ |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| $d_{\text{Si-Br}}[\text{Å}]$ | $2,171 \pm 0,001$         | $2,170 \pm 0,001$         | $2,175 \pm 0,001$          | $2,17 \pm 0,02^a$               |
| $\text{Br-Si-Br}$            | $(111,36 \pm 0,15)^\circ$ | $(111,36 \pm 0,25)^\circ$ | $(111,09 \pm 0,15)^\circ$  | $109^\circ 28'^a$               |

Tab. 2. Die  $\text{SiBr}_3$ -Pyramide bei verschiedenen Tribromderivaten des Monosilans. <sup>a</sup> Daten aus Elektronenbeugung an Gasen.

<sup>11</sup> J. F. OLLOM, A. A. SINISGALLI, H. W. REXROAD u. R. C. GUNTON, J. Chem. Phys. **24**, 487 [1956].

<sup>10</sup> K. YAMASAKI, A. KOTERA, M. YOKOI u. M. IWASAKI, J. Chem. Phys. **17**, 1355 [1949].