
Messungen an InSb

Die Lagen der einzelnen Spektrenkomponenten zeigen sich erst in der Veränderung der Spektrenform nach Temperschritten. Sie verlangen ein schrittweises Anfitten der Kurven. Ausgehend vom substitutionellen Sondenplatz können die Defektlinien durch ihr unterschiedliches Ausheilverhalten bei verschiedenen Temperaturen ausfindig gemacht werden. Die große Sondenausbeute der protonenbestrahlten Proben sowie die Annahme relativ großer Quadrupolaufspaltungen ermöglichen diese Untersuchung.

Die Messungen ergeben, dass der Neutrinorückstoß alle Sorten eines intrinsischen Defektes erzeugt: Leerstelle, Zwischengitterplatz, Antistrukturplatz. Zu ihrer Identifizierung tragen Vergleichswerte von Isomerieverschiebungen in anderen III-V Halbleitern bei. Die Tatsache der gleichen Linienintensität von Quadrupolaufspaltungen (Anhang A) erweist die Doublets als Defektsignaturen, die aus einem Ersetzungsstoß hervorgegangen sein müssen.

Ergebnisse

Die Messungen dieses Kapitels wurden von L. Wende durchgeführt. Sie wurden zunächst so ausgewertet und interpretiert wie vorhergehende, vergleichbare Experimente [Wen95]. Im Folgenden wird eine neue Deutung der Spektren vorgestellt. Sie beruht auf einer anderen Auswertung der Spektren, die durch eine bessere Anpassung der Mößbauerlinien an die Messdaten gerechtfertigt wird.

Abbildung 17 stellt den Verlauf der Anteile in der Probe InSb-1096 dar, wie er aus einer Protonenaktivierung mit einer typischen Bestrahlungszeit von 7:45h und einer Verarbeitungszeit von 2:45h folgt. Aus dem Diagramm lassen sich die Sondenanteile in den Spektren der einzelnen Messphasen ablesen, die in den Spektren als Balkendiagramme eingezeichnet sind.

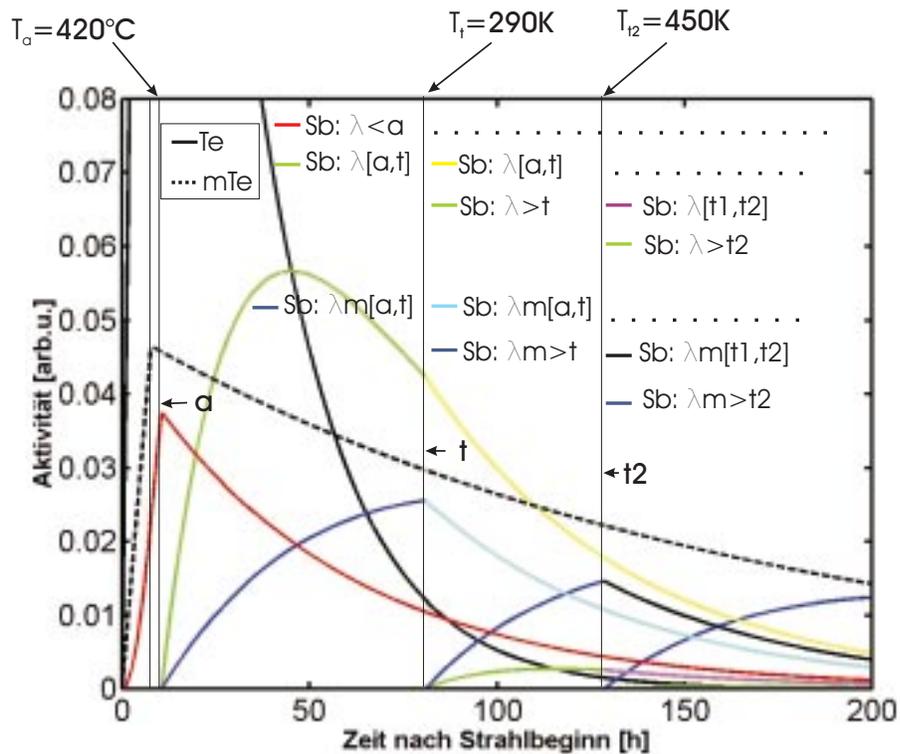


Abbildung 17: InSb-1096 Aktivitäten

a: Ausheilzeitpunkt, t: Temperzeitpunkt, t₂: Zeitpunkt des zweiten Temprens. Die Bestrahlung dauerte 7:45h. Um die Aktivitäten, die vom metastabilen Te-Zustand stammen, zu verdeutlichen, enthält die y-Achse nur den unteren Bereich der Te-Grundzustandsaktivität.

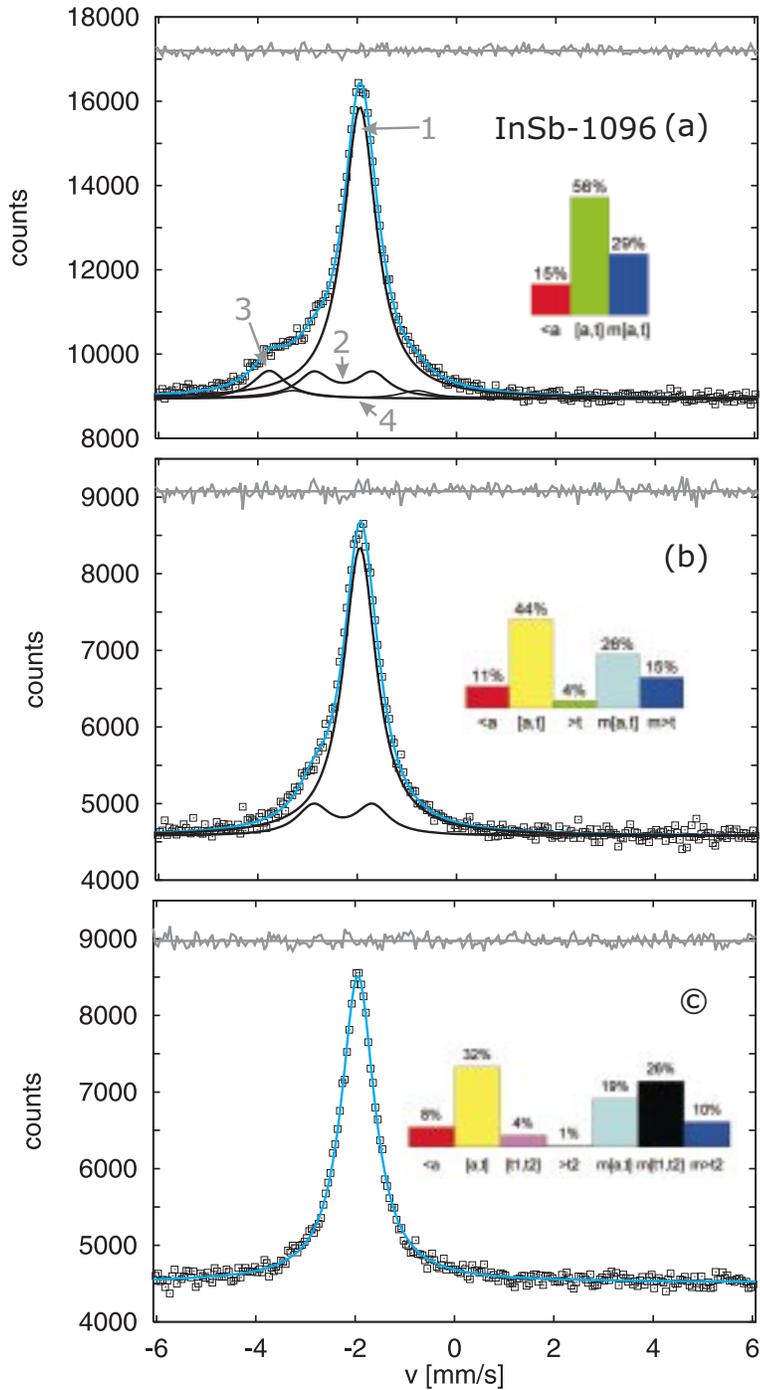


Abbildung 18: (a): Spektrum von ^{119}Sn in InSb nach Ausheilen der Strahlenschäden bei 420° am ^{119}Te
 (b): Spektrum wie (a) nach nochmaligem Ausheilen, bei der Temperatur $T_T = 290\text{K}$
 (c): Spektrum wie (b) nach drittem Ausheilen, bei $T_T = 450\text{K}$
 Die Spektren sind relativ zum Absorber CaSnO_3 aufgenommen worden.

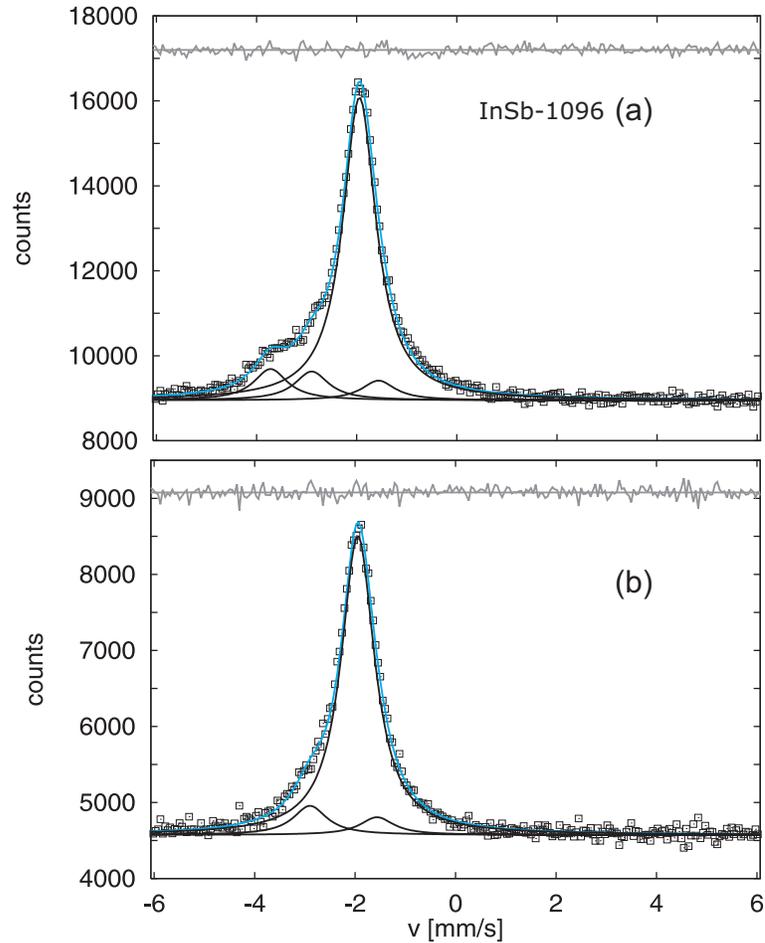


Abbildung 19: Oben: Spektrum wie 18 (a) angepasst unter der Annahme von drei Singletts

Unten: Spektrum wie 18 (b) angepasst unter der Annahme von zwei Singletts

Alle Spektren wurden bei einer Proben­temperatur von 4.2K aufgenommen, wobei sich der Detektor an Raumtemperatur befand. Abbildung 18 zeigt oben ein Spektrum der Probe InSb-1096, das im ersten Messabschnitt aufgenommen worden ist. Vorher ist die Probe durch die Reaktion $^{121}\text{Sb}(p,3n)^{119}\text{Te}$ aktiviert und bei 420°C unter Ar-Atmosphäre ausgeheilt worden. Es wird angenommen, dass durch das Ausheilen sowohl die Te- als auch die Sb-Sondenatome einen substitutionellen Sb-Platz im InSb einnehmen [WAW85]. Wie bereits erläutert, können die ^{119g}Te -Atome (Nomenklatur: [a,t]) beim Zerfall zum Sb durch den erlittenen Rückstoß zum Teil Defekte bilden; die Sb-Atome (<a) verbleiben auf ihren Plätzen, ebenso wie der überwiegende Teil der ^{119m}Te -Atome. Der Anteil defektfähiger Atome beträgt also in

diesem Spektrum 56% ([a,t]). Da sich von diesem Zeitpunkt an die Probe durchgehend auf 4.2K befindet, so dass sie thermisch praktisch nicht aktiviert wird, können die Defektsituationen einerseits sowie die ungestörten Gitterpositionen andererseits am Sn-Mößbaueratom nachgewiesen werden. Dieser letzte Zerfall zum Sn verändert nämlich wegen seiner geringen Rückstoßenergie von nur 1.3 eV die Sondenpositionen nicht mehr.

Erwartungsgemäß besteht das Spektrum Abb.18 sowohl aus einer intensiven Hauptkomponente (1), die mit dem substitutionellen Gitterplatz der Sonde identifiziert werden wird, als auch aus Nebenkomponten, die von Defekt-konfigurationen herrühren. Sichtbarster Hinweis dafür ist der Verlauf der Gesamtlinie, die verglichen mit einer Lorentzkurve auf der linken Seite an ihrem Fuß eindeutig verbreitert ist. Um die Zusammensetzung der Linienform aus den verschiedenen Nebenkomponten (2)-(4) herauszufinden, wird das Verhalten der Komponten nach Temperschritten untersucht. Dazu wurde die Probe 10min lang der Temperatur von 290K ausgesetzt. Anschließend wurde das mittlere Spektrum (b) bei einer Temperatur von 4.2K aufgenommen. Nun sind die Nebenkomponten (3) und (4) verschwunden, und nur die Quadrupolaufspaltung (2) bleibt bestehen. Die Tempertemperatur wurde auf $T_t = 450\text{K}$ erhöht. Erst jetzt verschwindet bei einer Messtemperatur von $T_m = 4.2\text{K}$ auch diese Defektlinie, und es bleibt allein die substitutionelle Hauptlinie übrig (Spektrum (c)).

Es ist klar, dass Spektrum (a) allein keine eindeutige Lösung zur Bestanpassung der Messdaten vorschreibt. Allein die linke Verbreiterung kann nur durch Annahme einer eigenen Lorentzkurve mit hoher Isomeriewerschiebung ($IS \sim 3.7$) erklärt werden. Die anderen Komponten folgen aus (b) und (c), und hieraus ergibt sich das folgende Verfahren zur Anpassung der Spektren. Die Probe im Zustand völliger Defektausheilung, Spektrum (c), legt Lage und Breite der substitutionellen Hauptkomponente für alle drei Spektren fest (s.folgende Tabelle).

InSb-1096 (c)		[118:50h,144:17h]			
Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2}$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	IS [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	ΔQ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	
1	100.0(8)	0.404(5)	1.945(3)	-	

Die Menge der Atome $> t_2$ beträgt hier nur 1%. Das ist genau der Anteil der Sonden, die nach der letzten Temperung noch vom Te zum Sb zerfallen; sie können das Spektrum also praktisch nicht durch Neubildung von Defekten stören.

Da die Breite nur von der natürlichen Energieunschärfe des Niveaus Sn^* und den Materialeigenschaften des Detektors abhängt, gilt sie auch für alle

anderen Linienkomponenten. Angewandt auf Spektrum (b) ergibt sich somit zusätzlich zur Hauptlinie eine Quadrupolaufspaltung (2) als Bestanpassung, wobei hier für (1) nur die Intensität frei gelassen wurde, für (2) Intensität und Lage. Das Ergebnis ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Das Symbol [†] kennzeichnet in ihr, wie auch in den folgenden Tabellen, alle Werte, die vor der Anpassung auf Grund der Kenntnisse aus den vorhergehenden Spektren fixiert werden konnten.

InSb-1096 (b)		[74:05h,117:28h]		
Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2}$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	IS [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	ΔQ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
1	83(1)	0.404 [†]	1.945 [†]	-
2	17(1)	0.404 [†]	2.28(3)	1.18(6)

44% der Sonden gehören zu der Menge $[a, t]$; das heißt 44% der Sonden war bei der Temperung im Sb-Zustand, ist nach der Implantationsausheilung zum Sb zerfallen und stammt vom Te-Grundzustand. Mit anderen Worten hat dieser Teil der Sonden nach dem energetisch hohen Rückstoßprozess keine Ausheilung, sondern nur die Temperung erfahren, so dass das Spektrum die Temperaturstabilität bei $T_t = 290\text{K}$ der Defekte wiedergibt. Weiterhin sind nur 4% der Sonden noch nach dem Tempern von ⁹Te zum Sb zerfallen ($>t$), sie können also auch hier das Spektrum nur geringfügig durch Neubildung von Defekten stören. Die übrigen Sondenklassen tragen zur substitutionellen Hauptlinie bei. Es ist also berechtigt, in diesem Spektrum eine allein durch die Temperung veränderte Defektsituation im Kristall anzunehmen, und sie ergibt nur ein Dublett als bis zu 290K stabil.

Spektrum (a) schließlich liefert mit den Komponenten (3) und (4) die günstigste Anpassung an die Daten. Darin enthalten sind zu 13% Sonden, die bei Implantationsausheilung als Sb vorlagen ($<a$), zu 29% Sonden, die bei der Implantationsausheilung als ^{119m}Te vorlagen (m) und zu 58% Sonden, die bei der Implantationsausheilung als ^{119g}Te vorlagen ($[a, t]$); folglich tragen mindestens 42% der Sonden zur substitutionellen Hauptlinie bei, 58% jedoch *können* durch den Neutrinorückstoß Defekte gebildet haben und darum zu den Defektlinien beitragen. Spektrum (a) enthält also das Maximum defektfähiger Atome. Die folgende Tabelle listet die gefundenen Parameterwerte auf.

InSb-1096 (a)		[51:45h,70:00h]		
Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2}$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	IS [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	ΔQ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
1	75.8(7)	0.404 [†]	1.945 [†]	-
2	12.0(1.0)	0.404 [†]	2.28 [†]	1.18 [†]
3	7.3(4)	0.404 [†]	3.77(3)	-
4	4.1(6)	0.404 [†]	2.05(6)	2.5(1)

In jedem Spektrum ist oben ein Differenzspektrum mit eingetragen; für jeden Geschwindigkeitswert zeigt es die Differenz von Messwert und Kurvenwert des aktuellen Fit als Abweichung von einer verschobenen Nulllinie (Kurven in grauer Farbe). Das Auswerteverfahren konnte alle Parameter der Spektren durch eine konsistente Bestanpassung finden. Entscheidend dafür war die Auswertung des Spektrums (b) mit der Annahme eines Dubletts. Daraus folgte neben dem offensichtlichen Singlett (3) das zweite Dublett (4).

In der bisherigen Interpretation wurde jede Quadrupolaufspaltung ausgeschlossen, die größer ist als ~ 0.5 [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]. Das hat dazu geführt, die Spektren mit drei Singletts oder Einzellinien anzupassen, deren Breite lediglich durch die Annahme einer kleinen Aufspaltung variierte [Wen95]. Abbildung 19 veranschaulicht die Wirkung dieses Vorgehens auf die vorliegenden Spektren. Aus dem Spektrum der ausgeheilten Probe wird wieder die Hauptlinie für den substitutionellen Platz übernommen (Abb.18(c)). Zusätzlich zu ihr werden diesmal in (b) zwei Einzellinien angenommen, die sich unter der Bedingung der χ^2 -Minimierung auf Positionen links und rechts der Hauptlinie bewegen. Die Gesamtkurve passt sich ebenso gut an die Daten an wie bei der anderen Auswertung. Nun werden diese drei Komponenten in die Anpassung von Spektrum (a) eingebracht, wobei nur deren Intensität frei gelassen wurde und nur eine zusätzliche Einzellinie zugelassen wird. Die Minimierungsbedingung erzwingt damit ein Singlett bei einer Isomerieverschiebung von ~ 3.75 [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$], genau wie bei der anderen Auswertung in Abbildung 18. Nun passt dieser Fit schlechter zu den Daten, und das liegt an der rechten Flanke der Hauptlinie: in Abbildung 19(a) müsste noch ein Singlett bei $IS \sim 1$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$] hinzugefügt werden, um eine so gute Anpassung wie in Abbildung 18(a) zu erreichen; abgesehen von den χ^2 -Werten beider Fits lässt sich das besonders deutlich an dem Differenzspektrum ablesen, wo nun rechts vom Hauptmaximum die Kurve systematisch tiefer verläuft als die Daten, wohingegen bei der anderen Auswertung die Differenz fast verschwindet oder zumindest statistisch um die Null schwankt. Ein Experiment derselben Art zeigt Abbildung 20. Die Probe InSb-1194 wurde auch hier in der Reaktion $^{121}\text{Sb}(p,3n)^{119}\text{Te}$ aktiviert und anschließend bei 420°C unter Ar-Atmosphäre ausgeheilt. Probengeo-

metrie, Messgeometrie und Messtemperatur waren ebenfalls identisch. Das Experiment unterscheidet sich lediglich in den Zeiten von Bestrahlung, Ausheilungen und Messzeiten, was in der Bestimmung der einzelnen Sondenanteile in den Spektren zusammengefasst werden kann. Die Balkendiagramme in jedem Spektrum zeigen, dass die Sondenanteile bis auf wenige Prozent mit denen des ersten Experimentes übereinstimmen. Das Experiment unterscheidet sich vor allem in den Temperaturen der Temperungen, die hier bei $T_t = 226\text{K}$ und bei $T_{t2} = 438\text{K}$ lagen. Die Spektren können darum die Aussagen über die Temperaturstabilität der Defekte aus dem ersten Experiment ergänzen. Dasselbe Verfahren wie oben hat auch hier die verschiedenen Linienkomponenten identifiziert. Das Spektrum InSb-1194 (c) zeigt ein reines Singlett, die Probe ist demnach bereits bei 438K vollständig ausgeheilt. Die damit gewonnene Hauptlinie (1) stimmt in den Parametern mit der der Probe InSb-1096 gut überein; der Unterschied von $\sim 0.05 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$ in IS kann leicht mit der Ungenauigkeit des Mößbauerantriebes erklärt werden. So schwankt die maximale Geschwindigkeit des Antriebs zwischen den Experimenten um $\Delta v \sim 0.06 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$ laut Laserkalibration, trotz gleichbleibender Einstellung. Die Hauptlinie wird wieder mit dem substitutionellen Platz identifiziert.

InSb-1194 (c)		[11:19h,21:06h]			
Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2} \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$	IS $\left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$	$\Delta Q \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$	
1	100.0(5)	0.440(3)	2.004(2)	-	

Die Breite wird für alle folgenden Linien übernommen, und die Lage der substitutionellen Hauptlinie festgehalten. Damit ergibt das Spektrum (b) die Quadrupolaufspaltung (2) zusätzlich zur Hauptlinie. Auch ihre Parameter (s.Tabelle) stimmen in etwa mit denen der Probe InSb-1096 überein, und sie lässt deswegen auf die gleiche Defektsituation schließen.

InSb-1194 (b)		[65:06h,77:02h]			
Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2} \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$	IS $\left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$	$\Delta Q \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$	
1	89.5(5)	0.440 [†]	2.004 [†]	-	
2	10.5(5)	0.440 [†]	2.37(2)	1.20(4)	

Spektrum (a) endlich liefert die beiden restlichen Komponenten, das Singlett mit $IS \sim 3.7 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$ (3) und eine weitere Quadrupolaufspaltung mit geringerer Intensität (4).

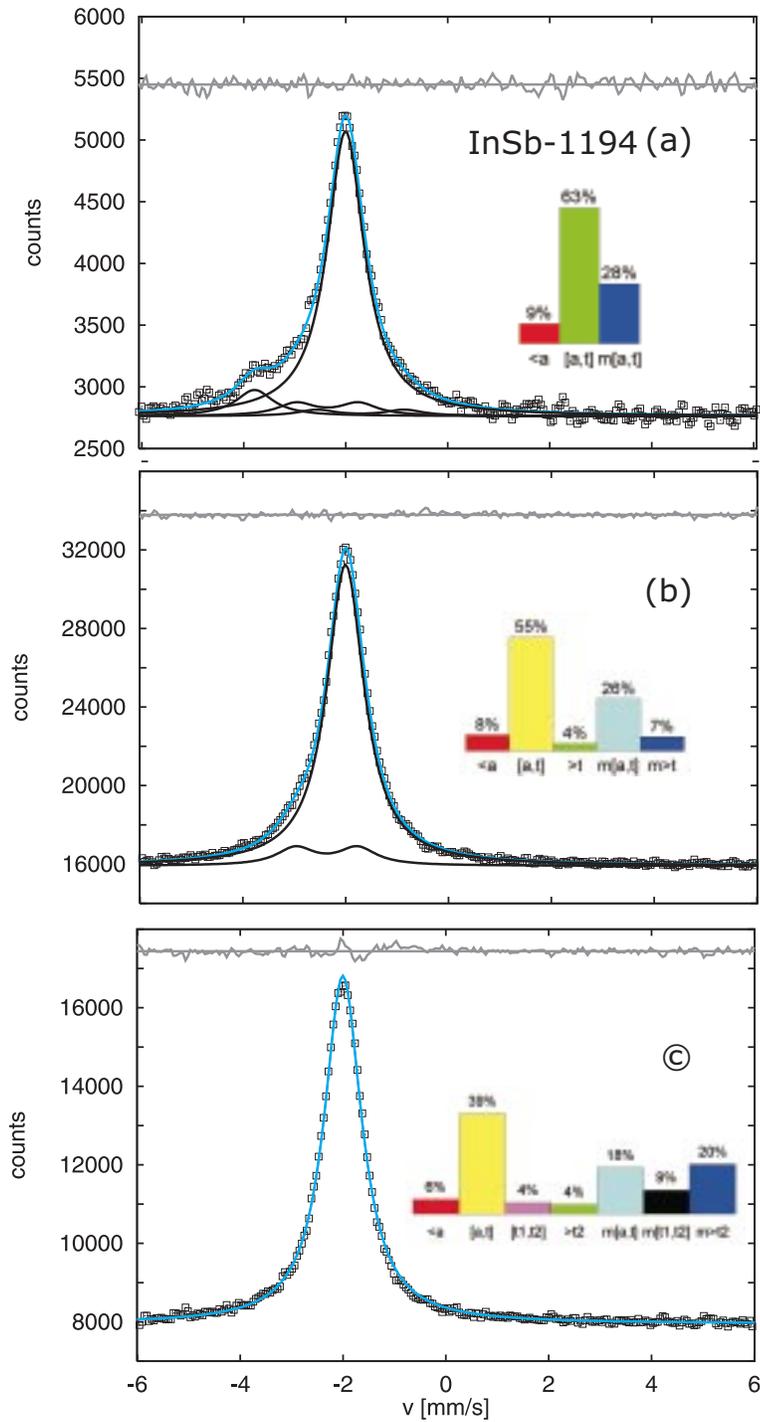


Abbildung 20: (a): Spektrum von ^{119}Sn in InSb nach Ausheilen der Strahlenschäden bei $T_a = 420^\circ$ am ^{119}Te
 (b): Spektrum wie (a) nach nochmaligem Ausheilen, bei der Temperatur $T_t = 226\text{K}$
 (c): Spektrum wie (b) nach drittem Ausheilen, bei $T_{t2} = 438\text{K}$
 Die Spektren sind relativ zum Absorber CaSnO_3 aufgenommen worden.

InSb-1194 (a)		[56:14h,57:59h]		
Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2}$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	IS [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	ΔQ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
1	81.6(1.8)	0.440 [†]	2.004 [†]	-
2	7.(2.)	0.440 [†]	2.37 [†]	1.20 [†]
3	7.5(7)	0.440 [†]	3.79(5)	-
4	3.5(6)	0.440 [†]	1.71(18)	1.7(3)

Auch die Parameter des Singletts korrespondieren offensichtlich mit denen der Probe InSb-1096, die Aufspaltung des Dubletts weicht etwas ab; sie ist eben auf Grund der geringen Intensität und der Intensitätsüberdeckung durch die anderen Linien nicht eindeutig zu bestimmen. Festzuhalten bleibt, dass die Linien (3) und (4) schon bei der Temperatur $T_i = 226\text{K}$ ausheilen, wie das Spektrum (b) zeigt.

Ein weiteres Experiment gleicher Art ist in den Spektren 21 (a)-(c) abgebildet. Die Sondenanteile in den Spektren entsprechen wieder bis auf wenige Prozent denen der beiden ersten Experimente. Die Spektren erlauben a priori keine so deutliche Identifikation der Komponenten wie die vorherigen. Zunächst einmal ist die Probe ein zweites Mal ausgeheilt worden ($T_i = 420^\circ\text{C}$), dann allerdings noch mit Elektronen 5h lang bestrahlt worden und anschließend noch für $5\frac{1}{2}\text{h}$ bei Raumtemperatur gelagert worden, bevor das Spektrum Abbildung 21(c) aufgenommen worden ist.

InSb-0894 (c)		[109:10h:,119:10h]		
Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2}$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	IS [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	ΔQ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
1	100(1)	0.413(7)	1.988(4)	-

Zwar betrug zur Messzeit der Anteil der noch defektfähigen Sonden in diesem Spektrum ($>t$) nur 1%, die durch e^- -Beschuss erzeugten Leerstellen könnten aber bei Raumtemperatur mit einem Teil der Sonden rekombiniert sein und das Normlinienprofil (1) verändert haben. Dennoch wurde die ermittelte Linienbreite und -lage in Abb. 21(b) übernommen.

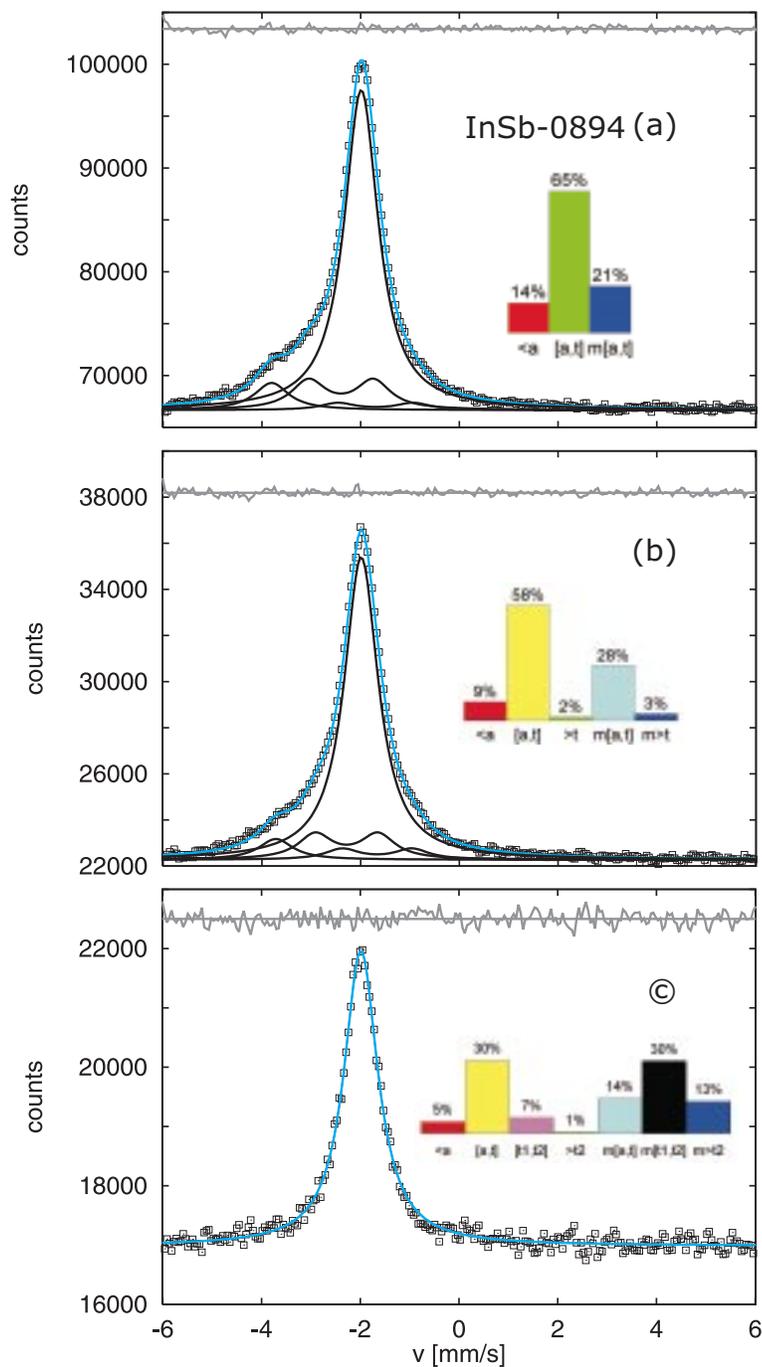


Abbildung 21: Messung InSb0894

(a): Spektrum von ^{119}Sn in InSb nach Ausheilen der Strahlenschäden bei $T_a = 420^\circ$

(b): Spektrum wie (a) nach nochmaligem Ausheilen, bei der Temperatur $T_t = 120\text{K}$

(c): Spektrum wie (b) nach drittem Ausheilen, bei $T_{t2} = 420^\circ\text{C}$, anschließender e^- -Bestrahlung und Temperung bei RT

Die Spektren sind relativ zum Absorber CaSnO_3 aufgenommen worden.

InSb-0894 (b)		[26:40h,31:42h]		
Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2}$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	IS [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	ΔQ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
1	76.7(1)	0.413 [†]	1.988 [†]	-
2	12.7(1)	0.413 [†]	2.28(3)	1.27(6)
3	5.3(3)	0.413 [†]	3.72(5)	-
4	5.3(8)	0.413 [†]	1.67(6)	1.4(1)

Dieses Spektrum legt offen, dass nicht nur die Linie (2), sondern auch die Linien (3) und (4) bei der Temperatur $T_t = 120\text{K}$ noch stabil sind. Die Linien ergaben sich unter Freilassung aller Parameter außer der Normbreite und der Lage von Hauptlinie (1). Ganz analog ist Spektrum Abb.21(a) angepasst worden; die gute Übereinstimmung der Parameterwerte weist auf unveränderte Defektsituationen in beiden Spektren hin (vgl. Tabellen).

InSb-0894 (a)		[4:43h,23:18h]		
Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2}$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	IS [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	ΔQ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
1	76.4(9)	0.413 [†]	1.988 [†]	-
2	13.8(8)	0.413 [†]	2.40(4)	1.31(4)
3	6.4(3)	0.413 [†]	3.80(3)	-
4	3.3(8)	0.413 [†]	1.70(13)	1.5(3)

Ein weiteres Beispiel für das Auswerteverfahren gibt die Messung InSb-0596 in Abbildung 22(a)-(c). Anders als in den übrigen Experimenten wurde hier die Probe nach der Aktivierung für 42:50h bei Raumtemperatur gelagert; sichtbarste Auswirkung davon ist der hohe Anteil von $< a$, also der Atome, die bereits bei Ausheilung als Sb vorlagen, und dem entsprechend geringen Anteil von $[a, t]$, also der defektfähigen Atome. Darin liegt der Grund, dass im Spektrum (a) die Intensität der Defektlinien relativ gering ist, und vermutlich auch, dass die Defektlinie (3) kaum noch erscheint, ebenso wie Defektlinie (4). Anders auch als in den übrigen Experimenten wurde hier die Probe dreimal hintereinander bei $T_a \sim 420^\circ\text{C}$ ausgeheilt. Die Temperaturstabilität bei einer mittleren Temperatur wurde nicht untersucht. Entsprechend enthält das Spektrum (a) die Defektkomponente (2) und eventuell noch (3) und (4), während sie nach einer weiteren Ausheilung in Spektrum (b) vollständig verschwunden ist; auf Grund des Zeitverhaltens der Kernumwandlung befinden sich in diesem Spektrum nur noch ca. 1% Sonden, die noch ^{99}Te sind ($>t$). Dieser Anteil hat noch weiter abgenommen, als Spektrum (c) aufgenommen worden ist ($>t \sim 1\%$). Demnach hat es dieselbe Einlinienform

wie Spektrum (b). Die Parameter der Hauptlinie (1) gingen in Spektrum (a) in der beschriebenen Weise ein; auch hier ergaben sich als Bestanpassung Linienkomponenten, die denen der anderen Messungen entsprechen, von denen die Linien (3) und (4) wegen ihrer geringen Intensität jedoch nur ungenau zu bestimmen sind.

InSb-0596 (c) [69:11h,98:00h]

Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2}$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	IS [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	ΔQ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
1	100(1)	0.387(5)	1.953(4)	-

InSb-0596 (b) [46:40h,63:54h]

Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2}$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	IS [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	ΔQ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
1	100(1)	0.386(5)	1.944(3)	-

InSb-0596 (a) [21:20h,45:00h]

Linie	A[%]	$\frac{\Gamma}{2}$ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	IS [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	ΔQ [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
1	85.8(9)	0.387 [†]	1.944 [†]	-
2	10.4(1.4)	0.387 [†]	2.36(5)	1.35(8)
3	2.1(5)	0.387 [†]	4.23(11)	-
4	1.6(1.1)	0.387 [†]	1.79(19)	1.7(4)

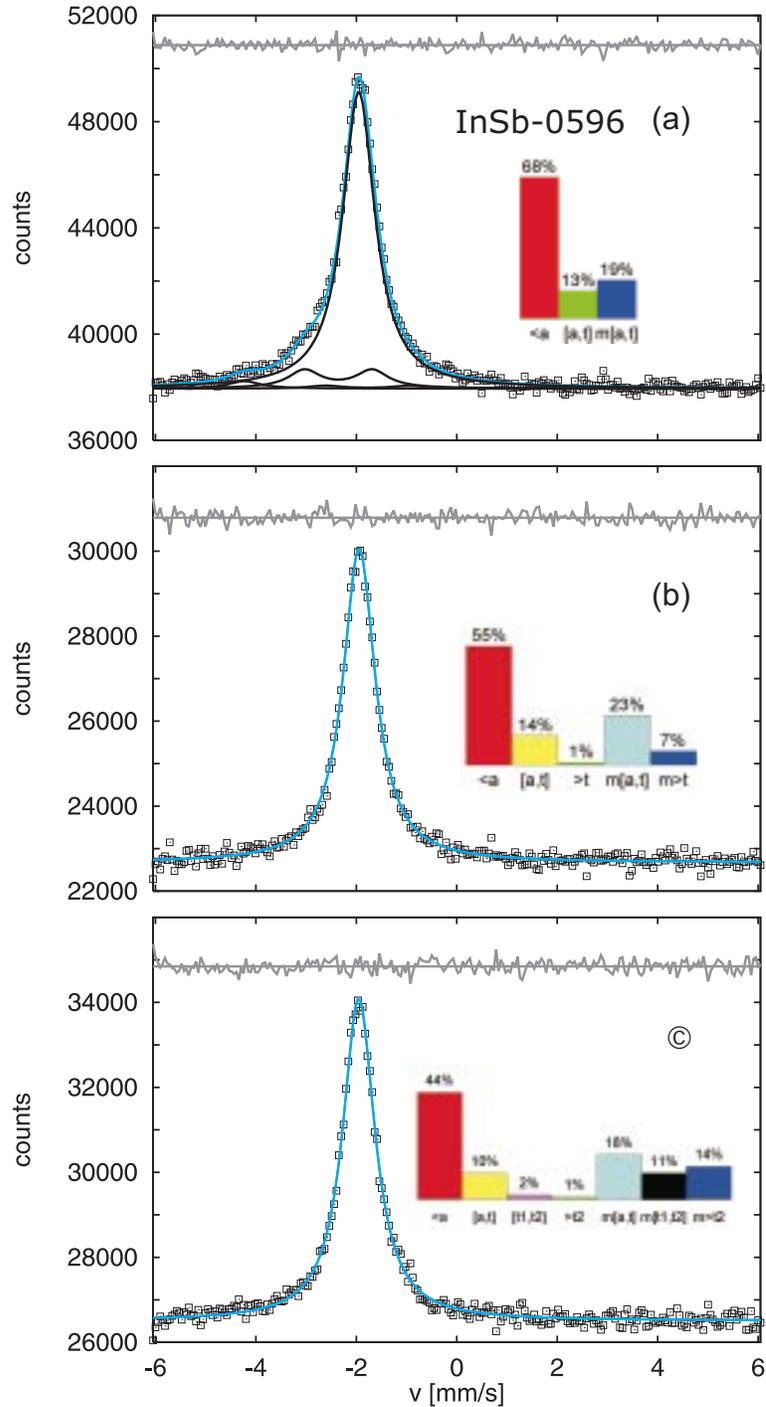


Abbildung 22: Messung InSb0596

(a): Spektrum von ^{119}Sn in InSb nach Ausheilen der Strahlenschäden bei $T_a = 420^\circ$

(b): Spektrum wie (a) nach nochmaligem Ausheilen, bei der Temperatur $T_t = 420^\circ\text{C}$

(c): Spektrum wie (b) nach drittem Ausheilen, bei $T_{t2} = 418^\circ\text{C}$

Die Spektren sind relativ zum Absorber CaSnO_3 aufgenommen worden.

Interpretation

Es ist erwiesen, dass die Defektkomponenten in den Messungen an InSb vom Neutrinorückstoßprozess stammen [Wen95]:

- ① Die zeitliche Veränderung der Komponentenintensitäten verhält sich direkt proportional der Anzahl der Zerfälle $^{119g}\text{Te} \rightarrow ^{119}\text{Sb}$.
- ② Messungen in späten Zeitintervallen, in denen praktisch kein Te vom Grundzustand her mehr zerfiel, sondern nur noch vom metastabilen ($^{119m}\text{Te} \rightarrow ^{119}\text{Sb}$), besaßen kaum noch Defektlinien. Dieser Zerfall löst nämlich zu einem neunfach kleineren Teil Rückstöße aus, die oberhalb der Schwellenenergie zur Defekterzeugung ($E_d \sim 6\text{eV}$) liegen. Die Defektlinien sind also keine Folge eines unzureichenden Ausheilverhaltens des Te im InSb.

Auf Grund der großen Datenmenge konnte L. Wende aus ① und ② sogar die Proportionalitätsfaktoren für die beiden Zerfallsmoden bestimmen, mit anderen Worten die Defekterzeugungswahrscheinlichkeiten der Rückstoßenergien $E_r = 12\text{eV}$ und $E_r = 20\text{eV}$ hinsichtlich der Defektlinien (2) und (3), die er beide als Einzellinien deutete. (vgl. Abb.19(a) s.[Wen95]Kap.5.2).

Nach dieser bisherigen Deutung entsprechen die Linien folgenden Gitterpositionen der Sonde

- ① substitutioneller Platz Sn_{Sb} auf Grund von $IS = 1.98 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$ [WPD83] und Temperstabilität bis mindestens $T_a = 420^\circ\text{C}$.
- ② *isoliert* interstitieller Platz Sn_i , das heißt in Entfernung von anderen Defekten. Argument dafür ist die Isomerieverschiebung von $IS = 2.98 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$, die in etwa dem Wert in Edelgasen entspricht, also einer abgesättigten Bindungssituation, sowie einer Bandstrukturrechnung [Wen95]. Der Defekt ist stabil bis zum Temperaturintervall [392K, 440K].
- ③ interstitieller Platz mit einer Leerstelle als nächstem Nachbarn $\text{Sn}_i - \text{V}_{\text{Sb}}$, das heißt die Sonde ist Teil eines nahen Frenkelpaares. Wichtigstes Argument dafür ist die leichte Ausheilbarkeit in einem Temperaturintervall [120K, 177K].

Die auffällige Tatsache, dass dieser Defekt gegenüber (2) eine noch größere Isomerieverschiebung ($IS = 3.77 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$) aufweist, wird damit erklärt, dass wegen des dangling-bond in Richtung der Leerstelle die $5p$ -Elektronen etwas vom Kern wegbewegt sind und darum die s-Elektronen weniger abschirmen als im Fall (2); daraus ergibt sich effektiv eine etwas größere Elektronendichte am Kern, das Sn-Atom nimmt stärkeren Sn^{2+} -Charakter an, das eine Isomerieverschiebung von $4.7 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$ hat.

In Kapitel 5.4 seiner Arbeit weist Wende bereits darauf hin, dass bei (p,3n)-aktivierten Proben sich in seiner Anpassung die Breite der Hauptlinie (1) ändert, sobald die Probe einer Temperung unterzogen worden ist, die die Defektlinien (2) und (3) ausheilt. Er kann einerseits als Ursache messtechnisch bedingte Vibrationen ausschließen, die von Vakuumpumpen hervorgerufen werden können. Weiterhin kann er eine veränderte Cosinusverschmierung auf Grund der veränderten Verteilung der Sondenaktivität bei p-Bestrahlung gegenüber der HI-Bestrahlung ebenfalls ausschließen. Er vermutet darum eine weitere Defektkomponente (4), die durch den Rückstoßprozess $^{119g}\text{Te} \rightarrow ^{119}\text{Sb}$ entstanden ist, und zwar eine Einzellinie mit $IS = 1.57 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$. Damit kann allen Komponenten eine gleiche und konstant bleibende Breite zugeordnet werden.

Allerdings bietet sich für die Komponente (4) keine plausible Zuordnung zu einer bestimmten Defektconfiguration an. Die von ihm vorgeschlagene Situation $\text{Sn}_{\text{In}}\text{-V}_{\text{Sb}}$, die nur durch einen Ersetzungsstoßprozess erzeugt worden sein kann, passt nicht zur verminderten Isomeriewerschiebung relativ zum substitutionellen Platz Sn_{Sb} , da ein dangling-bond zur Leerstelle die Kontaktelektronendichte eigentlich erhöhen müsste.

Diese Unstimmigkeit hat die neue Auswertung der Daten veranlasst. Ausgangspunkt dafür war die Beobachtung, dass die hypothetische Linie (4) korreliert mit Linie (2) ausheilt, das heißt genau im gleichen Temperaturintervall [392K, 440K]. Eine noch genauere Analyse der Linienform zeigt, dass die Linie (4) nur zum Teil mit (2) ausheilt; zum anderen Teil heilt sie mit (3) aus, das heißt bereits im Temperaturintervall [83K, 177K]. Abb.19 verdeutlicht dieses Verhalten im Vergleich zwischen dem Spektrum (a), aufgenommen nach $T_t = 290\text{K}$, und (b), aufgenommen nach $T_t = 450\text{K}$ unter Verwendung von Einzellinien.

Dagegen erklärt die Annahme einer Quadrupolaufspaltung anstatt der Einzellinien (2) und (4) zum einen das korrelierte Ausheilen, zum anderen liegt damit die Isomeriewerschiebung dieser Linie bei $\sim 2.3 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$, was physikalisch eher zu erklären ist. Messungen zum Beispiel von Sn in Si zeigen eine Komponente mit $IS = 2.33 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$, die als $\text{Sn}_{\text{Si}} - \text{V}$ Paar identifiziert werden [VFL⁺96] konnte. Diese Überlegung legt die Annahme eines weiteren Dubletts nahe, jetzt Dublett (4) genannt. Es hat weniger Intensität und muss, um die Linienverbreiterung zu bewirken, weit in die rechte Flanke des Peaks hineinragen; wenn dieses Dublett bereits bei tiefen Temperaturen ausheilt [83K, 177K], ist damit auch die Linienverbreiterung der Messungen vor dem Tempern erklärt, also in Abb.19 in Spektrum (a) gegenüber (b). Die linke Schulter des Dubletts müsste weit links liegen, damit seine Isomeriewerschiebung größer als $\sim 1.98 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$ wird. Diese Größe der Aufspaltung

ist leider aus den Daten wegen der Überlagerung durch die anderen Linien nicht eindeutig zu entnehmen, kann jedoch ungefähr bestimmt werden (s. Spektren).

Eine notwendige Bedingung dieser Argumentation liegt in dem Intensitätsverhältnis der beiden Linien einer Quadrupolaufspaltung; wie in Anhang A belegt wird, beträgt das Intensitätsverhältnis bei der gegebenen Probengeometrie genau 1:1. Voraussetzung dafür ist die gleichmäßige Verteilung der EFGs in die vier tetraedrisch orientierten Raumrichtungen der Zinkblendestruktur. Die kann aber angenommen werden, wenn man bedenkt, dass ein EFG mit einer Isomerieverschiebung $IS(2) \in [2.28, 2.37] \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$ beziehungsweise $IS(4) \in [1.71, 2.05] \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$ ohnehin nur durch eine Konfiguration Gitterplatz-Leerstelle erzeugt werden kann. Die Isomerieverschiebung weist nämlich auf einen Gitterplatz der Sonde hin, die Quadrupolaufspaltung auf eine lokale Gitterverzerrung, die im InSb nur eine Leerstelle als nächster Nachbar hervorrufen kann. Ein solcher EFG richtet sich aber gerade in Richtung der Bindungorbitale des Gitters aus.

Nach dieser Interpretation lauten also die Zuordnungen der Linien

- ① substitutioneller Platz Sn_{Sb}

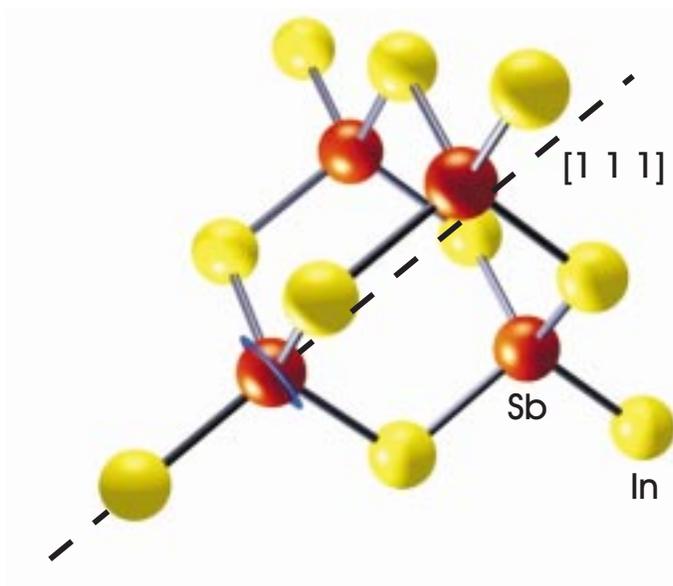


Abbildung 23: Strukturelle Deutung von ①

- ② $\text{Sn}_{\text{Sb}}\text{-V}_{\text{In}}$. Die Isomerieverschiebung $IS(2) \in [2.28, 2.37] \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$ fordert eine substitutionelle Position der Sonde, die Quadrupolaufspal-

tung eine Gitterverzerrung auf Grund einer benachbarten Leerstelle. Die Defektstabilität bis [392K, 440K] legt die Eigengitterposition nahe, das heißt zum Temperzeitpunkt befand sich die Sonde auf einem Sb-Platz und zerfällt daraufhin zum Sn. Das erklärt auch die gegenüber der substitutionellen Position leicht erhöhte Isomerieverschiebung mit $\Delta IS \sim 0.4 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$, da ein dangling-bond in Richtung Leerstelle die $5p$ -Elektronen von der Sonde etwas entfernt, womit die s -Elektronen weniger abgeschirmt sind und ihre Dichte gegenüber der in rein kovalenter Bindung erhöht wird.

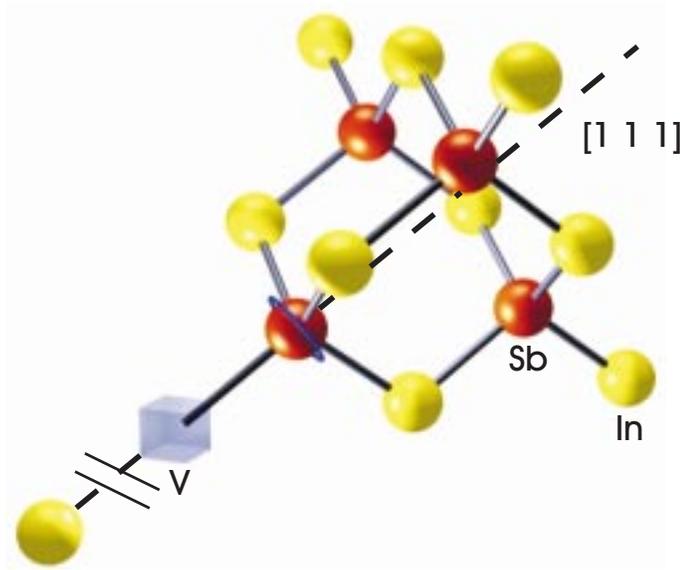


Abbildung 24: Strukturelle Deutung von ②

- ③ Sn_i. Die große Isomerieverschiebung $IS(3) \sim 3.8 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$ bedeutet eine erhöhte s -Elektronendichte, die nur von einer interstitiellen Sondenposition stammen kann. Hier nimmt die Sonde gerade divalenten Charakter an (vgl. Abb.7). Gegenüber der reinen Sn²⁺-Situation ($IS(\text{Sn}^{2+}) = 4.7 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$) ist die Isomerieverschiebung etwas erniedrigt; das sogenannte freie Sn mit der Elektronenkonfiguration $4d^{10}5s^25p^2$ hat die Isomerieverschiebung $IS = 3.2 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$ [BDS65] und kommt damit dem vorliegenden Wert am nächsten.

Da in ② offenbar bereits eine benachbarte Leerstelle zu einer merklichen Quadrupolaufspaltung führt, kann sich in der vorliegenden Situation die Sonde nicht in unmittelbarer Nachbarschaft der Leerstelle befinden. Alle Sn-Atome werden sich in mindestens übernächster Nachbar-

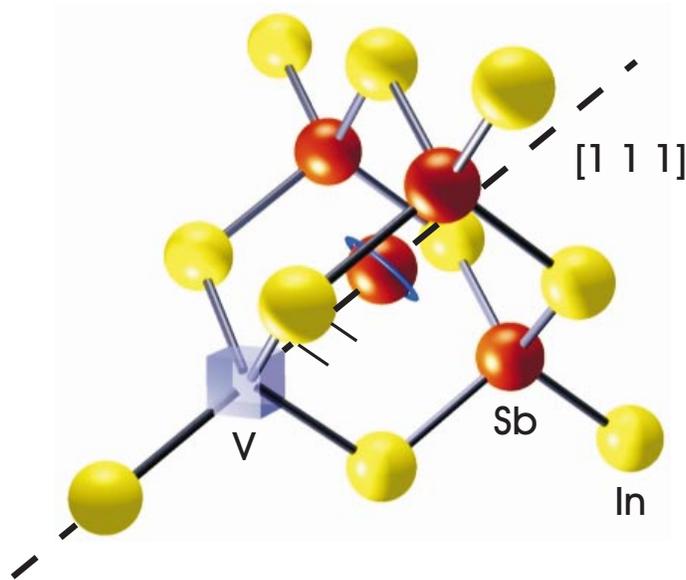


Abbildung 25: Strukturelle Deutung von ③

schaft befinden und sämtlich sogenannte isoliert interstitielle Positionen einnehmen. Nahe Frenkelpaare bilden sich überhaupt nicht oder sind bereits bei 4.2K instabil.

- ④ $\text{Sn}_{\text{In}}-\text{V}_{\text{Sb}}$. Genau wie bei ② fordert die Isomerieverschiebung $IS(2) \in [1.71, 2.05] \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ eine substitutionelle Position der Sonde, die Quadrupolaufspaltung eine Gitterverzerrung auf Grund einer benachbarten Leerstelle. Die leichte Ausheilbarkeit bei bereits $T_t \in [83\text{K}, 177\text{K}]$ entspricht eher der Antigitterposition, das heißt zum Tempern befand sich die Sonde auf einem In-Platz und kann leicht den benachbarten V_{Sb} -Platz einnehmen.

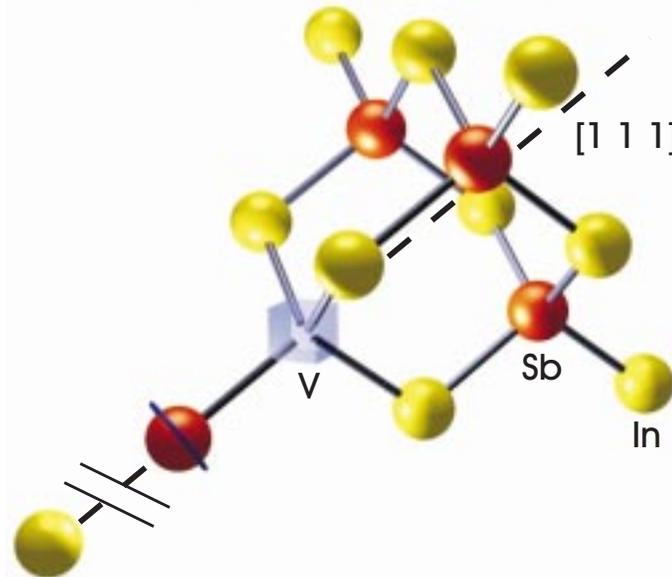


Abbildung 26: Strukturelle Deutung von ④

Weil sämtliche Defektsituationen vom Neutrinorückstoßprozess herrühren, können sie dynamisch folgendermaßen erklärt werden:

- ① die Rückstoßenergie reicht nicht aus, dass die Sonde das lokale Potentialminimum des Gitterplatzes verlässt
- ② der Rückstoß erfolgt in einem kleinen Winkel relativ zur Bindungsorbitalrichtung, so dass das benachbarte In-Atom von seinem Platz ins Zwischengitter verdrängt wird, die Sonde aber wegen der ungefähren Massengleichheit von In und Sb auf den eigenen Gitterplatz zurückfällt. Damit hat sie in einer Richtung eine Leerstelle als Nächsternachbar erzeugt. Wegen der hohen Ausheiltemperatur dieses Effektes befindet sich das verdrängte Atom so weit entfernt von der Leerstelle, dass eine rekombinierte Ausheilung ausgeschlossen ist und die Leerstelle/das Sondenatom selbst wandert.
- ③ der Rückstoß erfolgt in großem Winkel relativ zur Bindungsrichtung, so dass die Sonde in einen interstitiellen Platz in $[1\ 1\ 1]$ -Richtung oder $[1\ 1\ 1]$ -äquivalenter Richtung wandert; wegen der Abwesenheit eines merklichen Feldgradienten wird sich die Sonde auf einem kubisch-kooordinierten Platz hinreichend weit entfernt von der Leerstelle befinden, jedoch noch innerhalb der elektrostatischen Reichweite der Leer-

stelle, um rekombiniert im tiefen Temperaturintervall [120K, 170K] auszuheilen.

- ④ der Rückstoß erfolgt in mittlerem Winkel (zwischen ② und ③) relativ zur Bindungsrichtung, so dass die Sonde das benachbarte In-Atom ins Zwischengitter verdrängt, dessen Platz einnimmt und eine Leerstelle am Sb-Ort hinterlässt.

Jeder Tempersschritt ändert die Gesamtzahl der Sonden innerhalb der Probe nicht. Wird daher eine Defektlinie ausgeheilt, kommt deren Intensität den anderen Linien zu. Das Verhalten der Linienintensitäten vor und nach einer Temperung kann also Auskunft über die Wanderung eines Defektes geben. Das Kapitel *Zeitverhalten der Intensität* erläutert die Normierungen, die nötig sind, um in den Spektren die verschiedenen Anteile der Sonden zu berücksichtigen.

Die neue Deutung der Linienkomponenten als Situationen ① - ④ erfährt somit eine weitere Bestätigung in dem Verhalten der Linienintensitäten. Beim unteren Tempersschritt, im Temperaturbereich $T_t \in [120\text{K}, 177\text{K}]$, verschwindet neben der Einzellinie (3) auch die Quadrupolaufspaltung (4). Nach der Deutung der Einzellinie als interstitieller Defekt ①, wird bei diesem Aktivierungsprozess die Sonde vermutlich auf einen substitutionellen Sb-Platz wandern, das heißt rekombiniert ausheilen. Somit wandelt sich Linie (3) in (1) um. Die Deutung des Dubletts (4) jedoch als Defektsituation ④, das heißt als $\text{Sn}_{\text{In}}\text{-V}_{\text{Sb}}$ Paar, legt nahe, dass sich bei diesem Prozess die Sonde, die sich in diesem Moment noch im Sb Zustand befindet, vom In-Platz einfach auf den benachbarten, freien Sb-Platz bewegt. Das Ergebnis wäre ein $\text{Sn}_{\text{Sb}}\text{-V}_{\text{In}}$ Paar, also die Defektsituation ②. Somit wandelt sich ④ in ② um.

Tatsächlich entsprechen die Messergebnisse der Erwartung. Im Spektrum InSb-1096(a) (vergleiche Abb.18 und zugehörige Tabellenwerte) beträgt der Intensitätsanteil von Linie (1) etwa 76%, von Linie (3) 7%. Im Spektrum InSb-1096(b), das heißt nach dem ersten Tempersschritt, ist Linie (3) ausgeheilt, die Intensität der Linie (1) beträgt nun 83%, also genau die Summe. Entsprechend verhalten sich die Linien (4) und (2): ihre Intensitäten in Spektrum InSb-1096(a), 4% und 12%, ergeben in der Summe, innerhalb der Fehlergrenzen, genau die Intensität der Linie (2) nach der Temperung, nämlich 17% (siehe InSb-1096(b)).

Eine Prüfung der Spektren InSb-1194(a) und (b) bestätigt ebenfalls die Deutung. Die Summe der Intensitäten von Linie (1) und (3) aus InSb-1194(a), 82% und 8%, ist gleich der Intensität von Linie (1) in InSb-1194(b), 90%. Ebenso ergeben die Intensitäten der Linien (2) und (4) aus InSb-1194(a), 7% und 4%, zusammen die Intensität von Linie (2) in InSb-1194(b), nämlich 11%. Die beiden übrigen Experimente können keinen Hinweis über das

Intensitätsverhalten geben, da hierbei die Temperschritte so gewählt worden sind, dass die Linie (2) zugleich mit (3) und (4) ausheilte.

Die genaue Auswertung der Linienintensitäten setzt eigentlich die Kenntnis der Debye-Waller-Faktoren jeder Defektsituation voraus. Von ihnen ist jedoch nur bekannt, dass sie kleiner sein müssen als der Debye-Waller-Faktor des regulären Gitterplatzes. Aus dem Vergleich der Intensitätsanteile lässt sich aber schließen, dass sich ihre Werte nur unwesentlich voneinander unterscheiden können.