

Part I

Deutsche Zusammenfassung

Zusammenfassung

Einleitung

Ausgangspunkt dieser Arbeit war der durch das optische Langzeit-Beobachtungsprogramm von Komet C/1995 O1 (Hale-Bopp) gewonnene Datensatz an Langspalt-Spektren [Rauer *et al.*, 1997, 2002]. Die Beobachtungen wurden im April 1996 aufgenommen und endeten 5 Jahre später im Januar 2001. Sie decken einen heliozentrischen Entfernungsbereich von 4,6-2,8 AE vor dem Perihel und von 2,9-12,8 AE nach dem Perihel ab. Dies war die bisher längste Kampagne in der ein einzelner Komet über einen so großen Bereich heliozentrischer Abstände im optischen Wellenlängenbereich beobachtet wurde. Eine erste Analyse des Datensatz erfolgte mit dem Modell von [Haser and Swings, 1957]. Während dieser Untersuchung ergaben sich eine Reihe von interessanten Fragestellungen. Eine davon wird in dieser Arbeit vertieft behandelt: Die Bildung von C_2 und C_3 in der Koma eines Kometen.

C_2 war das erste Radikal in einer kometaren Koma, das spektroskopisch nachgewiesen wurde. Schon 1864 entdeckte es Giovanni Donati [1864] in Komet Tempel (1864 II) und unabhängig davon in 1867 Sir William Huggins [1867] in Komet Winnecke (1867 II). Beide identifizierten das Radikal durch Vergleich mit dem Spektrum einer Flamme. Sie beobachteten ebenfalls eine Gruppe von Emissionslinien bei 4500 Å, aber diese Gruppe wurde erst mehr als 80 Jahre später durch Douglas [1951] als C_3 Emissionen identifiziert. Über ein Jahrhundert lang konnte kein Elternmolekül von C_2 beobachtet werden. Es wurden in dieser Zeit einige Elternmoleküle in der Literatur diskutiert, hauptsächlich Acetylen (C_2H_2) und Ethan (C_2H_6) für C_2 [Jackson, 1976] und Propadien sowie die isomere Form Methylacetylen (C_3H_4) für C_3 [Stief *et al.*, 1972]. Erst 1996 wurden Emissionen von C_2H_2 und C_2H_6 in der Koma der Kometen Hyakutake und Hale-Bopp beobachtet [Tokunaga *et al.*, 1996; Brooke *et al.*, 1996; Mumma *et al.*, 1996]. Für C_3 ist bis zum heutigen Tage kein Elternmolekül beobachtet worden. Das Hauptziel dieser Arbeit war die Untersuchung der Bildung von C_2 und C_3 in einer kometaren Koma bei großen heliozentrischen Abständen. Hierfür ist ein Modell entwickelt worden, welches auf der Annahme basiert, dass C_2H_2 , C_2H_6 und C_3H_4 die Elternmoleküle von C_2 und C_3 sind. Mit Hilfe dieses Modells können auch für große heliozentrische Abstände $r_h \geq 2.86$ AE Produktionsraten für die Elternmoleküle bestimmt werden, allein auf Basis der optischen Spektroskopie der C_2 und C_3 Radikale. Bisher konnten Produktionsraten für C_2H_2 und C_2H_6 allein durch Beobachtungen im infraroten Wellenlängenbereich und nur bei heliozentrischen Abständen kleiner als 3 AU bestimmt [Dello Russo *et al.*, 2001]. Das hier vorgestellte Modell weitet somit den heliozentrischen Abstandsbereich, über

dem Kohlenwasserstoffe in Kometen untersucht werden können, deutlich aus. Basierend auf den Produktionsraten für C_2H_2 , C_2H_6 und C_3H_4 können Mengenverhältnisse für heliozentrische Abstände $r_h \geq 2.86$ AE bestimmt werden. Von besonderem Interesse ist dabei das Verhältnis zur CO Produktionsrate, weil hieraus Rückschlüsse auf die Volatilität der untersuchten Moleküle möglich sind.

Der Datensatz und die Auswertung mit dem Haser-Modell

Im Rahmen des Hale-Bopp Langzeit-Beobachtungsprogramms wurden hauptsächlich Teleskope der Europäischen Südsternwarte (ESO) genutzt: das VLT (Very Large Telescope) in Paranal (Chile), sowie das 3.6m, das 2.2m und das Danish 1.52m Teleskope, alle in La Silla (Chile). Vor dem Perihel wurden auch einige Beobachtungen am OHP 1.93m Teleskop des Observatoire Haute-Provence (Frankreich) durchgeführt. Bei allen Beobachtungen wurden optische Langspalt-Spektren des Kometen aufgenommen. Die Spektren decken typischerweise einen Wellenlängenbereich von 3800-7600Å und damit die Emissionen der CN, C_3 , C_2 und NH_2 Radikale ab. Langspalt-Spektroskopie erlaubt es, radiale Profile der Emissionen der Radikale aufzunehmen. Wenn es die Instrumentierung des Teleskops erlaubte wurden auch Bilder mit R-, V- und B-Filtern aufgenommen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Bilder nur zur Überprüfung der Spalt-Positionierung genutzt.

Optische Spektroskopie erlaubt es nicht, Elternmoleküle, die vom Nukleus des Kometen sublimieren, direkt zu beobachten. Diese Moleküle zeigen nur Emissionen im Infrarot- oder Radiobereich. In der Koma zerfallen die Elternmoleküle zu Tochterprodukten, von denen eine Reihe Emissionen im optischen Wellenlängenbereich zeigen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Emissionen von CN, C_3 , C_2 und NH_2 studiert. Die Emissionsbanden sind in Abbildung 5.2 auf Seite 46 dargestellt. Alle diese Radikale wurden schon zu Beginn der Beobachtungskampagne bei einem heliozentrischen Abstand von 4.6 AE detektiert. Emissionen von NH_2 konnten bis zu einem heliozentrischen Abstand 4.7 AE nach dem Perihel detektiert werden, C_2 bis 5.0 AE, C_3 bis 7 AE (siehe Abbildung 9.3 auf Seite 71) und CN sogar bis 9.8 AE (siehe Abbildung 9.1 auf Seite 70 und Rauer *et al.* [2002]). Der heliozentrische Abstandsbereich, über dem Tochtermoleküle Aktivität zeigen, ist ein wichtiger Indikator für die Volatilität der Elternmoleküle, da die Temperatur an der Kometenoberfläche maßgeblich vom heliozentrischen Abstand bestimmt wird.

Während mit optischer Spektroskopie nur Tochterprodukte beobachtet werden können, gilt das eigentlich Interesse den Elternmolekülen, die vom Kern des Kometen sublimieren. Um eine Aussage über ihre Produktionsrate machen zu können, ist ein Modell der Zerfallsprozesse in der Koma notwendig. Häufig wird hierfür das Modell von [Haser and Swings, 1957] verwendet. Dieses Modell nimmt eine radialsymmetrische Koma an, in der Gas mit einer festen Geschwindigkeit vom Nukleus abströmt. Elternmoleküle zerfallen durch Photodissoziation in einem einzelnen Schritt zu Tochterprodukten, die dann beobachtet werden. Die Tochterprodukte werden ihrerseits durch Photodissoziation zerstört. Basierend auf diesen vereinfachten Annahmen hat [Haser and Swings, 1957] eine Formel (10.1 auf Seite 73) angegeben, mit

der die Dichte der Tochterprodukte über dem nukleozentrischem Abstand für eine gegebene Produktionsrate der Elternmoleküle bestimmt werden kann. Notwendig hierfür ist die Kenntnis der so genannten Haser-Skalenlänge. Dies ist die Strecke, die ein Moleküle in der Koma zurücklegt, bevor es zerfällt. Geht man davon aus, dass der Zerfall nur durch Photodissoziation geschieht, kann sie bei gegebener Gasgeschwindigkeit aus der Lebensdauer gegen Photodissoziation bestimmt werden. Oft sind die Zerfallsprozesse aber komplexer, so werden z.B. einige der beobachteten Tochterprodukte in einem mehrstufigen Prozess gebildet. Desweiteren können Tochterprodukte beim Zerfall eine zusätzliche Exzess-Geschwindigkeit erhalten. Deshalb ist es korrekter von effektiven Haser-Skalenlängen zu sprechen. Nur in einfachen Fällen lässt sich eine physikalische Interpretation der Skalenlängen geben. Für die hier untersuchten Radikale wurden in der Literatur Haser-Skalenlängen bestimmt [A'Hearn *et al.*, 1995; Fink *et al.*, 1991; Cochran, 1985; Cochran *et al.*, 1992]. Die Bestimmung erfolgte allerdings bisher nur in Kometen mit einem heliozentrischen Abstand kleiner als 2 AE.

Mit Hilfe des Formalismus von Haser wurden Profile der Säuledichte der Radikale durch Integration entlang der Sichtlinie durch die Koma bestimmt. Diese wurden dann mit den Beobachtungen verglichen und die modellierten Profile durch Variation der Parameter Produktionsrate des Elternmoleküls und der effektiven Haser-Skalenlängen angepasst. Bei den großen heliozentrischen Abständen die in dieser Arbeit untersucht wurden zeigte sich, dass der Zerfall der Tochterprodukte ausserhalb des Sichtfeldes des Spektrographen statt findet. Damit war eine Bestimmung der effektiven Haser-Skalenlängen für die Tochterprodukte nicht möglich. Für die Modellierung wurde der Wert auf unendlich gesetzt, basierend auf der Annahme, dass die Tochterprodukte im Blickfeld nicht zerfallen. Die Gültigkeit dieser Annahme wurde durch Tests bestätigt, die Abweichungen waren klein wie in Tabelle 10.2 zu sehen.

In dieser Arbeit konnten erstmalig effektive Haser-Skalenlängen für einen Kometen mit einem heliozentrischen Abstand $r_h \geq 3$ AE direkt bestimmt werden. Die Abhängigkeit der effektiven Haser-Skalenlängen vom heliozentrischen Abstand erlaubt Rückschlüsse auf die Zerfallsprozesse. Für reine Photodissoziation sollte die Skalenlänge wie der solare Fluß, also mit dem Quadrat des heliozentrischen Abstandes variieren. Zieht man noch in Betracht, dass die Gasgeschwindigkeit in der Koma selbst eine Abhängigkeit vom heliozentrischen Abstand zeigt [Biver *et al.*, 1997], ergibt sich für die effektiven Haser-Skalenlängen $l \sim r_h^2 \cdot r_h^{-0.41} = r_h^{1.59}$. Die Ergebnisse für die effektiven Haser-Skalenlängen sind in Tabelle 10.3 auf Seite 79 und in Abbildung 10.2 auf Seite 81 zusammengefasst. Mit diesen Skalenlängen wurden Produktionsraten für alle beobachteten Radikale bestimmt (siehe Tabelle 10.4 auf Seite 85 und Abbildung 10.4 auf Seite 86).

Für NH_2 deutet die effektive Haser Skalenlänge und deren Abhängigkeit vom heliozentrischen Abstand auf die Bildung in einem einstufigen Prozess aus einem einzelnen Elternmolekül hin. Diese Ergebnisse wären konsistent mit der Annahme, dass NH_3 das Elternmolekül ist (siehe hierzu auch Rauer *et al.* [2002]).

Für CN weisen die effektive Haser-Skalenlänge und deren Abhängigkeit vom heliozentrischen Abstand ebenfalls auf die Bildung in einem einstufigen Prozess hin. Hierbei muss allerdings zusätzlich angenommen werden, dass das Tochtermolekül CN bei der Dissoziation des Elternmoleküls zusätzliche Exzess-Energie erhält. Dies ist konsistent mit der Bildung von CN aus HCN als dem dominanten Elternmolekül durch Photodissoziation. Rauer *et al.* [2002]

bestätigen diesen Zusammenhang durch Vergleich der CN Produktionsraten mit HCN Produktionsraten, die von Biver *et al.* [1997] gemessen wurden. Eine detaillierte Diskussion zur Bildung von CN in der Koma findet sich in Rauer *et al.* [2002].

Die Entwicklung der Haser-Skalenlängen für C_2 und C_3 über dem heliozentrischen Abstand schließen für diese Moleküle die Bildung durch direkte Photodissoziation eines einzelnen Elternmoleküls aus. Aus diesem Grund ist für die Untersuchung der Bildung dieser Moleküle ein komplexeres Modell als das Haser-Modell notwendig. Da die Grundannahmen des Haser-Modells nicht gelten, müssen die Produktionsraten, die für C_2 und C_3 bestimmt wurden, mit Vorsicht betrachtet werden. Die Werte erlauben aber in jedem Fall einen Vergleich mit Resultaten in der Literatur, die ebenfalls mit dem Haser-Modell ermittelt wurden. Ein Beispiel hierfür ist die taxonomische Klassifizierung von Kometen nach A'Hearn *et al.* [1995]. Mit den in dieser Arbeit ermittelten Produktionsraten ordnet sich Komet Hale-Bopp bei den 'normalen' Kometen ein.

Die Analyse der Bildung von C_2 und C_3

Das Hauptziel dieser Arbeit war die Untersuchung der Bildung von C_2 und C_3 in einer kometaren Koma bei großen heliozentrischen Abständen. Zu diesem Zweck wurde ein chemisches Modell entwickelt, das die Entstehung dieser Radikale aus C_2H_2 , C_2H_6 und C_3H_4 als Elternmoleküle erklären kann. Das Modell wurde mit Hilfe der radialen Dichteprofile von C_2 und C_3 , die im Rahmen der Hale-Bopp Langzeit-Beobachtungsprogramms aufgenommen wurden, entwickelt. Grundlage für das Modell war das von W. Huebner und D. Boice über mehr als zwei Jahrzehnte entwickelte ComChem-Modell. Diese Entwicklung wird durch eine Reihe von Publikationen dokumentiert, unter anderem Giguere and Huebner [1978], Boice *et al.* [1986, 1998], Huebner *et al.* [1987] und Schmidt *et al.* [1988]. Es handelt sich um ein hydrodynamisches Multifluid-Modell zur Beschreibung des Gasflusses in der Koma eines Kometen. Wie im Modell von Haser wird eine radialsymmetrische Koma angenommen. Unter dieser Annahme wird eine eindimensional neutrale Koma simuliert mit einer detaillierten Behandlung der Photo- und Gasphasen-Chemie. Besonderes Augenmerk wurde auf die selbst-konsistente Beschreibung der Dynamik und Chemie in der Koma gelegt. Die Gasdynamik und die chemischen Reaktionen werden als gekoppeltes System modelliert. Die Dynamik und das Chemienetzwerk werden detaillierter in Kapitel 12 ab Seite 105 beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Modell angepasst und im Bereich der Chemie der Kohlenwasserstoffe deutlich erweitert.

Das Modell enthält das derzeit umfangreichste Reaktionsnetzwerk zur Bildung von C_2 und C_3 in einer kometaren Koma. Eine detaillierte Diskussion der Chemie der möglichen Elternmoleküle von C_2 und C_3 wird in den Kapiteln 11.1 und 11.2 präsentiert. So wurden neben Photodissoziation auch Dissoziation durch Elektronenimpakt berücksichtigt, sowie eine Reihe von weiteren Reaktionstypen, die allerdings, wie sich während der Arbeit zeigte, nur eine untergeordnete Rolle spielen (siehe Anhang E). Mit Hilfe des Modells wurden in einer Vorwärtsrechnung radiale Profile der Säuledichte für C_2 und C_3 berechnet. Diese wurden mit den beobachteten Profilen verglichen und die Modell-Parameter wurden vari-

iert bis sich eine Übereinstimmung ergab. Das hierfür verwendete Iterationsschema ist im Detail in Kapitel 15 beschrieben. Das ComChem Modell bietet eine detaillierte Ausgabe der Zwischenergebnisse des Reaktionsnetzwerkes, und erlaubt somit ein Studium der Chemie in der kometaren Koma in Abhängigkeit vom nukleozentrischen Abstand (siehe Anhang D). Durch den großen Bereich von heliozentrischen Abständen über dem Beobachtungen der radialen Profile von C_2 und C_3 vorliegen konnte die Entwicklung der Chemie in Abhängigkeit vom heliozentrischen Abstand untersucht werden. Die Abbildungen 16.9 und 16.9 auf den Seiten 154 und 154 zeigen die gute Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Profilen für die Säuledichte von C_2 und C_3 . Die gute Übereinstimmung zeigt, dass das Modell in der Lage ist, die Entstehung von C_2 und C_3 über den gesamten heliozentrischen Abstandsbereich von 2.86 AE bis 4.74 AE korrekt wieder zu geben. Für die heliozentrischen Abstände, die in dieser Arbeit untersucht wurden, zeigt sich, dass C_2H_2 das dominante Elternmolekül von C_2 ist. Es bildet C_2 durch Photodissoziation und Dissoziation durch Elektronenimpakt auf direktem Weg und über C_2H als Zwischenprodukt. C_2H_6 hat als Elternmolekül nur eine untergeordnete Bedeutung, da dieses Molekül hauptsächlich zur Produktion von CH_3 und CH_4 beiträgt. Die beobachteten Säulendichte-Profile von C_3 lassen sich unter der Annahme von C_3H_4 als Elternmolekül erklären. Es ist nicht möglich zwischen den isomeren Formen Propadien und Methylacetylen zu unterscheiden, da beide C_3 über das selbe Zwischenprodukt C_3H_2 bilden. C_3 wird durch Photodissoziation und Dissoziation durch Elektronenimpakt gebildet. Obwohl das Reaktionsnetzwerk bereits eine gute Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Profilen liefert, ist es immer noch als vorläufig zu betrachten. Für die Photodissoziation von C_3H_2 und C_3 mussten die Reaktionsraten im Rahmen dieser Arbeit, durch Anpassung an die beobachteten Profile, bestimmt werden. Die Reaktionswege für die Dissoziation von Propadien und Methylacetylen durch Elektronenimpakt sind größtenteils noch unbekannt. Sie wurden in dieser Arbeit durch eine hypothetische Reaktion ersetzt, die eine direkte Dissoziation von C_3H_4 zu C_3 beschreibt. Aufgrund all dieser Schwierigkeiten haben die Ergebnisse für C_3 und C_3H_4 nicht die gleiche Qualität wie die Ergebnisse für C_2 und seine Elternmoleküle. Dennoch stellt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Reaktionsnetzwerk für die Bildung von C_3 einen deutlichen Fortschritt dar. Während bisherige Arbeiten größtenteils die Bildung von C_3 sehr vereinfacht durch direkte Photodissoziation von C_3H_4 erklärt haben, enthält dieses Netzwerk eine detaillierte Behandlung der Photodissoziationsreaktionen sowie eine vereinfachte Behandlung der Elektronenimpakt-Dissoziationsreaktionen, unter Berücksichtigung der möglichen Zwischenprodukte.

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell erlaubt die Bestimmung von Produktionsraten für C_2H_2 , C_2H_6 und C_3H_4 aus den Beobachtungen der Tochterprodukte C_2 und C_3 im optischen Wellenlängenbereich. Wie Abbildung 17.1 auf Seite 158 zeigt, sind die so ermittelten Produktionsraten für C_2H_2 und C_2H_6 in sehr guter Übereinstimmung mit Werten die Dello Russo *et al.* [2001] aus direkten Beobachtungen dieser Moleküle im infraroten Wellenlängenbereich bei heliozentrischen Abständen kleiner als 3 AE bestimmt hat. Die Produktionsraten für C_3H_4 sind konsistent mit dem oberen Limit für die Produktionsrate von Propadien, das von Crovisier [2000] in Messungen während des Perihels bestimmt wurde. Bisher konnten Produktionsraten für C_2H_2 , C_2H_6 und C_3H_4 nur aus direkten Beobachtungen dieser Moleküle im

infraroten Wellenlängenbereich bestimmt werden. Diese Technik ist auf sehr helle Kometen und damit auch auf kleine heliozentrische Abstände beschränkt. C_3H_4 konnte bisher noch bei keinem Kometen detektiert werden. Dagegen wurden C_2 und C_3 in einer großen Zahl von Kometen und über einen weiten Bereich von heliozentrischen Abständen beobachtet. Mit dem hier vorgestellten Modell ist es möglich, die Produktionsraten von C_2H_2 , C_2H_6 und C_3H_4 über dem gleichen Bereich von heliozentrischen Abständen zu bestimmen. Es ermöglicht eine systematische Studie der Kohlenwasserstoffe in Kometen, einschließlich kurz-periodischer Kometen, die üblicherweise nicht hell genug werden um eine direkte Beobachtung dieser Moleküle durch Infrarot-Beobachtungen zu ermöglichen.

Aus den Produktionsraten für C_2H_2 , C_2H_6 und C_3H_4 wurden erstmalig Mengenverhältnisse relativ zu H_2O und CO für große heliozentrische Abstände bestimmt. Es zeigt sich, dass das Mengenverhältnis von C_2H_2 zu CO mit 0.02 ± 0.004 etwa dem Verhältnis in dichten molekularen Wolken entspricht, während das C_2H_6 zu CO Verhältnis mit 0.03 ± 0.01 eine deutliche Anreicherung in Komet Hale-Bopp zeigt. CO ist ein sehr volatiles Molekül mit einer Sublimationstemperatur von etwa 24K. Da das Verhältnis von C_2H_2 , C_2H_6 und C_3H_4 zu CO bis zu großen heliozentrischen Abständen konstant bleibt, ist zu vermuten, dass auch diese Moleküle eine relativ hohe Volatilität aufweisen. Dies ist besonders interessant für C_3H_4 . Über die Volatilität von Propadien und Methylacetylen ist wenig bekannt, aber die Daten für die latente Wärme weisen ebenfalls auf eine hohe Volatilität hin. Das fast konstante Verhältnis von C_3H_4 zu CO von 0.008 ± 0.004 ist somit ein weiteres Indiz dafür, dass diese beiden Moleküle die Elternmoleküle von C_3 sind. Es konnte erstmal in einem Kometen eine Abschätzung für das Mengenverhältnis von C_3H_4 zu C_2H_2 und C_2H_6 gegeben werden. Dieser Wert weist eine große Unsicherheit auf, da hier alle Unsicherheiten des Modells eingehen. Es läßt sich aber abschätzen, dass C_3H_4 im Vergleich zu C_2H_2 und C_2H_6 etwa um einen Faktor 2 verarmt ist.

Basierend auf den Ergebnissen der Modellrechnungen ist der Versuch unternommen worden, die Entstehungsregion des Nukleus von Komet Hale-Bopp im frühen Sonnensystem einzugrenzen. Die Idee hierbei ist zu zeigen, wie, basierend auf den Produktionsraten und den Mengenverhältnissen von C_2H_2 , C_2H_6 und C_3H_4 , die aus optischen Beobachtungen von C_2 und C_3 gewonnen wurden, Aussagen über den Kern des Kometen gewonnen werden können. Für eine schematische Darstellung der möglichen Prozesse die zur Bildung von C_2H_2 , C_2H_6 und C_3H_4 geführt haben sei auf Kapitel 21 und hier besonders auf die Abbildung 21.1 auf Seite 186 und die Abbildung 21.2 auf Seite 190 verwiesen. Hier kann nur eine sehr verkürzte Darstellung der Argumentation gegeben werden Die Übereinstimmung des Mengenverhältnisses von C_2H_2 zu CO , wie in dieser Arbeit bestimmt, im Vergleich zu oberen Grenzen für dieses Verhältnis in molekularen Wolken deutet darauf hin, dass dieses Molekül interstellaren Ursprungs sein könnte. Das C_2H_6 zu CO Verhältnis in Komet Hale-Bopp liegt jedoch um eine Größenordnung höher als die oberen Grenzen für diese Verhältnis in molekularen Wolken. Die Anreicherung von C_2H_6 spricht für eine Bildung dieses Moleküls während einer sehr frühen Phase des Sonnensystem. Dies kann unter relativ hohen Temperaturen ($T \approx 100$ K) in der Gasphase geschehen oder bei niedrigen Temperaturen ($T \approx 10-50$ K) durch Oberflächenreaktionen auf Staubteilchen. Die Verarmung von C_3H_4 relativ zu C_2H_2 und C_2H_6 spricht für niedrige Temperaturen von etwa 25-50 K, da die Bildung

von C_3H_4 bei höheren Temperaturen effektiver abläuft. Zusammengefasst lässt sich somit eine Bildungstemperatur für den Nukelus von Komet Hale-Bopp von $T \approx 25-35K$ vermuten. Dies ist in Übereinstimmung mit dem Ergebnissen einer Reihe anderer Autoren, die mit sehr unterschiedlichen Methoden eine Bildungstemperatur von etwa 30 K erhalten [Crovisier, 1997; Krasnopolsky *et al.*, 1997; Meier *et al.*, 1998; Stern *et al.*, 2000]. Aus diesem Temperaturbereich kann man sehr grob einen Entfernungsbereich von 10-30 AE von der frühen Sonne als Entstehungsbereich von Komet Hale-Bopp abschätzen, also etwas der Bereich von Saturn bis Uranus. Dieser Schluss basiert allerdings auf einer Reihe von Annahmen und ist mit entsprechend großen Unsicherheiten behaftet.

