

Teilprojekt A12: **Energie- und Teilchentransfer in Cluster-Cluster-Stößen**

Teilprojektleiter: **Prof. Eleanor E.B. Campbell**

Dienstanschrift: **School of Physics and Engineering Physics,
Gothenburg University and Chalmers University of
Technology, SE-412 96 Gothenburg, Sweden**

Kommunikation: Tel.: +46 31 772 3272, - 3273 (Skr.) Fax: +46 31 772 3496
E-mail: eleanor.campbell@fy.chalmers.se

Fachgebiet und **Physik der Cluster, Experimentalphysik, Stoßdynamik**
Arbeitsrichtung:

Keywords: **Cluster-cluster collisions, charge transfer, fusion**

Summary of results in the period 1995-1998

Reactive collisions between atomic clusters in the gas phase are of fundamental interest for the information they can provide on dynamical processes in systems with a large but finite number of degrees of freedom. Our work has been concerned with experimental and theoretical investigations of reactive collisions between fullerenes, in particular C_{60} and C_{70} . First, very preliminary, experimental results from our group /1/ on this collision system as well as preliminary model calculations from R. Schmidt and co-workers /2/ were available before 1995. Both experiment and theory indicated that fusion of the collision partners as well as fragmentation of the primary reaction products should be observable in the experiments in the collision energy range between about 50 eV and a few keV. During the last period we have carried out detailed investigations of these two reaction channels as well as charge transfer reactions between fullerenes and been able to obtain considerable insight into the underlying dynamics.

Absolute cross sections for fusion reactions, $C_n^+ + C_m \rightarrow C_{n+m}^+$, $n, m = 60, 70$, were measured as a function of collision energy. It was shown that fusion between two fullerenes could occur within a narrow „fusion window“ between about 60 and 220 eV collision energy (in the centre of mass frame of reference), i.e. far beyond thermal energies. The fusion window had a lower threshold of between 60 and 75 eV, dependent on the size of the collision partners. The maxima in the cross sections were at around 140 eV with absolute magnitudes of ca. 2, 5 and 14 Å² for fusion of C_{60}^+ with C_{60} , C_{60}^+ with C_{70} and C_{70}^+ with C_{70} , respectively. No fusion products could be

observed at a 0° scattering angle for collision energies beyond approximately 200 eV, the fusion cross-section very rapidly dropped to zero.

An extended Absorbing Sphere Model (ASM) was used to interpret these results. This model assumes that fusion can occur for all collisions where the impact parameter lies below the geometrical contact radius and the collision energy exceeds the sum of the reaction barrier (fusion threshold) and the centrifugal energy. The fusion thresholds determined by fitting the experimental results with this model lie at 60, 70 and 76 eV respectively as the number of atoms in the collision increases (from 120 to 140). These high threshold energies show that the reactions observed in the experiments are really due to the breaking and reforming of a number of bonds in a fusion-like process and not simply the formation of a metastable dimer species. The application of the ASM model also showed that steric factors play an important role in the fusion reaction. Close to threshold the fusion probability is only a few percent, rising as the collision energy increases. This is the main difference between fullerene-fullerene collisions and heavy ion collisions studied for many years by nuclear physicists. It is predominantly a consequence of the strong, directional covalent bonds between the carbon atom in the fullerene cage. The experimental results are in excellent agreement with quantum molecular dynamics calculations carried out in close collaboration with the group of R. Schmidt and also with calculations from other groups. The calculations give values for the fusion thresholds which lie within the statistical errors of the experimental results. They also show that the primary fusion products are isomers with a peanut-like structure.

Practically all fusion products dissociate on the microsecond timescale of the experiments due to the high internal energy they receive on collision. In the range of moderate collision energies below about 150 eV the experimental results can be explained by successive evaporation of C_2 molecules. Above this energy the measured product distribution shows lower masses and then disappears abruptly. This is interpreted as being due to a phase transition in the primary fusion product. Scattering angle resolved measurements were carried out to determine the fragment mass and angle distribution in this energy range and to collect evidence for the onset of a multi-fragmentation mechanism.

As well as fusion and fragmentation, the energy dependence of charge transfer processes between $C_{60}^{2+/3+}$ and C_{60} as well as between $C_{60/70}^+$ and C_{60} was investigated.

The measured absolute charge transfer cross sections could be explained in the context of simple models developed for ion-atom collisions.

Übersicht der Ergebnisse aus den Jahren 1995-1998

Reaktive Stöße zwischen atomaren Clustern in der Gasphase (Cluster-Cluster-Stöße) sind von grundlegendem Interesse, da sie Informationen über dynamische Prozesse in wechselwirkenden Systemen mit einer im Vergleich zu kleinen Molekülen großen, aber doch endlichen Anzahl an Freiheitsgraden liefern. Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Arbeiten befassen sich mit der experimentellen und theoretischen Untersuchung reaktiver Stöße zwischen Fullerenen, insbesondere C_{60} und C_{70} . Für dieses Stoßsystem lagen bereits vor dieser Förderungsperiode erste experimentelle Ergebnisse aus unserer Gruppe /1/ und Modellrechnungen von R. Schmidt und Mitarbeitern /2/ vor. Beide zeigten, daß in dem zugänglichen Stoßenergiebereich zwischen etwa 50 eV und mehreren keV sowohl Fusion der Stoßpartner als auch Fragmentation der primären Reaktionsprodukte experimentell zu erfassen sein sollten. In der Tat konnten im Laufe dieser Förderungsperiode beide Prozesse detailliert untersucht werden und dabei Einblicke in die zugrundeliegende Dynamik gewonnen werden.

Es wurden absolute Querschnitte der Fusionsreaktionsreaktion $C_n^+ + C_m \rightarrow C_{n+m}^+$, $n, m = 60, 70$ in Abhängigkeit der Stoßenergie bestimmt. Es zeigte sich, daß Fusion zweier Fullerene innerhalb eines "Fusionsfensters" zwischen etwa 60 und 220 eV Stoßenergie (im Schwerpunktsystem), also weit jenseits thermischer Energien, auftritt. Die Fusionsfenster zeigen untere Schwellen zwischen 60 und 75 eV. Die Maxima der Fusionsquerschnitte treten bei etwa 140 eV auf und liegen für die Fusion von C_{60}^+ mit C_{60} , C_{60}^+ mit C_{70} und C_{70}^+ mit C_{70} bei ca. 2, 5 bzw. 14 \AA^2 . Oberhalb von ca. 200 eV werden im linearen Produktnachweis keine Fusionsprodukte mehr detektiert, der Fusionsquerschnitt verschwindet.

Zur Interpretation dieser Ergebnisse wurde ein erweitertes Absorbing Sphere Model (ASM) herangezogen. Dessen Grundannahme ist, daß Fusion bei allen Stößen auftritt, deren Stoßparameter innerhalb des geometrischen Radius liegt und deren Stoßenergie die Summe aus Reaktionsbarriere ("Fusionsschwelle") und Zentrifugalenergie übertrifft. Die mittels dieses Modelles gewonnene Fusionsschwelle liegt mit zunehmender Anzahl der am Stoß beteiligten Atome bei 60, 70 bzw. 76 eV. Diese

hohen Schwellenenergien zeigen, daß bei den hier beobachteten Reaktionen die Fullerenkäfige tatsächlich unter Aufbrechen und Neubildung vieler Bindungen verschmelzen. Aus Anwendung des ASM kann weiterhin gefolgert werden, daß sterische Faktoren eine wichtige Rolle in der Fusionsreaktion spielen. Dies zeigt sich in der Tatsache, daß die Fusionswahrscheinlichkeit nur wenige Prozent beträgt und mit der Stoßenergie ansteigt. Dies stellt der Hauptunterschied zwischen Fulleren-Fulleren-Stößen und kernphysikalischen Schwerionenstößen dar und ist eine Konsequenz der starken gerichteten kovalenten Bindungen des Kohlenstoffkäfiges. Die experimentellen Ergebnisse stehen in exzellenter Übereinstimmung mit quantenmolekulardynamischen Rechnungen, die in Zusammenarbeit mit der Gruppe von R. Schmidt (T.U. Dresden) durchgeführt wurden sowie mit Rechnungen anderer Gruppen. Die Rechnungen liefern Fusionschwellen, die innerhalb der statistischen Fehlergrenzen mit dem Experiment übereinstimmen. Sie zeigen zudem, daß die primären Fusionsprodukte eine erdnußartige Struktur haben.

Nahezu alle Fusionsprodukte dissoziieren auf der Mikrosekunden-Zeitskala des Experimentes aufgrund der großen inneren Energie, die sie im Fusionsprozeß erhalten. Im Bereich moderater Stoßenergien unterhalb von ca. 150 eV lassen sich die experimentellen Produktmassenverteilungen durch sukzessives Abdampfen von C₂-Einheiten erklären. Oberhalb von 150 eV weichen die Produktmassenverteilungen von einer solchen Voraussage nach unten hin ab. Diese Abweichung wird als Hinweis für einen Phasenübergang im primären Fusionsprodukt angesehen. Um Reaktionsprodukte bei diesen höheren Energien erfassen zu können und möglicherweise Hinweise auf eine Multifragmentation zu bekommen, wurden Winkelverteilungen der Produkt-Ionen aufgenommen.

Neben Fusion und Fragmentation wurden Ladungstransferreaktionen sowohl zwischen C₆₀^{2+, 3+} und C₆₀ als auch zwischen C_{60/70}⁺ und C₆₀ untersucht. Die gemessenen absoluten Ladungstransferquerschnitte lassen sich im Rahmen einfacher erweiterter Modelle zu Ionen-Atomstößen erklären. Der Elektronentransfer zwischen C₆₀⁺ und C₆₀ ist resonant, in den übrigen Reaktionen nichtresonant.

Bericht aus dem letzten Berichtszeitraum (1.1.1995 bis 31.12.1998)

Zu Beginn dieses Berichtszeitraumes war das Wissen über die Dynamik in Cluster-Cluster-Stößen vor allem theoretischer Natur. In einer Reihe von Artikeln hatten R. Schmidt und Mitarbeiter (TU Dresden) Stoßprozesse zwischen Natriumclustern untersucht /3/. Diese Rechnungen lieferten den Hauptanstoß für die Durchführung entsprechender Experimente in unserem Labor. Die Fusion von Fullerenen wurde dann experimentell erstmals 1992, damals noch an der Universität Freiburg, beobachtet /1/. Kurz danach wendeten Schmidt und Mitarbeiter Dichtefunktionaltheorie zur Berechnung von reaktiven Stößen zwischen Fullerenen an /2,4/. Es wurde gezeigt, daß Fusion zwischen C_{60}^+ und C_{60} bei hyperthermischen Stoßenergien um 100 eV (im Schwerpunktsystem) auftritt, entsprechend der theoretischen Voraussage. Ziele der weiteren experimentellen und theoretischen Untersuchungen der Fullerenionen-Fulleren-Stöße waren u.a. die Ermittlung absoluter Reaktionsquerschnitte, die Bestimmung der Fusionsschwelle, die Untersuchung von Fragmentationsprozessen und Ladungsaustausch.

In Kooperation mit R. Schmidt wurden weitere QMD-Rechnungen begleitend zu den Experimenten durchgeführt. Abb.1 zeigt Schnappschüsse von Trajektorien in Stößen zwischen C_{60} und C_{70} . Auf der ps-Zeitskala der Rechnungen zeigen sich drei Reaktionskanäle: (tiefinelastische) Streuung, Fusion der Fullerenkäfige sowie Multifragmentation, d.h. Verlust der Fullerenstruktur unter plötzlicher Bildung vieler Fragmente unterschiedlicher Größe und Struktur. Während Streuung und Fusion bei quasi identischen Stoßenergien um 120 eV auftreten, wird Multifragmentation in den Rechnungen erst bei wesentlich höheren Energien beobachtet.

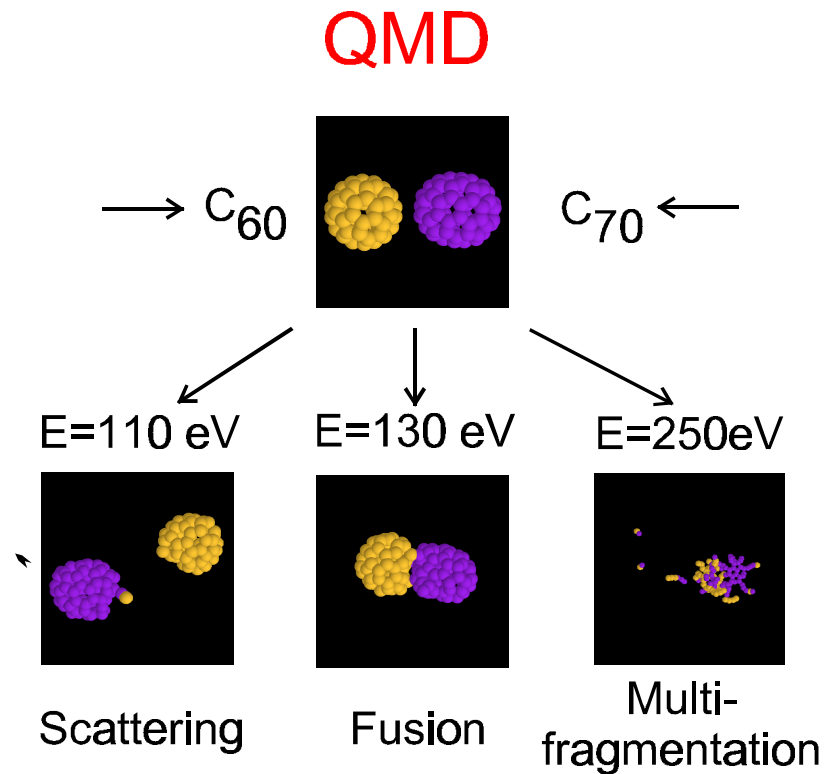


Abb. 1: Reaktionskanäle in Fulleren-Fulleren-Stößen, Schnappschüsse aus QMD-Trajektorien

Die verwendete experimentelle Anordnung /RGH96/ besteht aus zwei gekoppelten Flugzeitmassenspektrometern. In der primären Flugzeitanordnung werden die Primärionen präpariert, das sekundäre Reflektrom-Massenspektrometer dient zur Analyse der Reaktionsprodukte. Fullerenionen werden durch Verdampfen von Fullerenpulver und anschließende Elektronenstoßionisation erzeugt und mittels gepulster elektrischer Felder auf kinetische Energien zwischen 100 eV und mehreren keV beschleunigt. Die Ionen durchfliegen eine geheizte Stoßzelle, in der sich Fullerdampf befindet. Die Stoßzelle kann auf ein elektrisches Potential gelegt werden, um niedrige Stoßenergien bis zu 50 eV zu erzielen. In der Stoßzelle erzeugte Reaktionsprodukte sowie Primärionen werden anschließend im Reflektrom-Massenspektrometer analysiert. Durch geeignete Wahl der Stoßzellentemperatur werden Einzelstoßbedingungen realisiert, die Variation der Targetgasdichte erlaubt die Bestimmung absoluter Reaktionsquerschnitte.

In Abb. 2 sind die experimentell erhaltenen Fusionsquerschnitte der Reaktionen $C_n^+ + C_m^+ \rightarrow C_{n+m}^+$, $n, m = 60, 70$ als Funktion der reziproken Stoßenergie aufgetragen /RCK96, RGH96/. In allen drei Fällen wird ein "Fusionsfenster", d.h. ein Stoßenergiebereich mit wohldefinierter unterer und oberer Energieschwelle,

beobachtet. Fusion tritt oberhalb etwa 60 bis 80 eV auf. Der Fusionsquerschnitt erreicht sein Maximum um 140 eV, wobei mit zunehmender Zahl der am Stoß beteiligten Atome der absolute maximale Querschnitt von 2 über 5 bis zu 14 Å² ansteigt. Jenseits von ca. 200 eV fallen die Querschnitte schnell auf Null ab, es werden keinerlei Reaktionsprodukte mehr nachgewiesen.

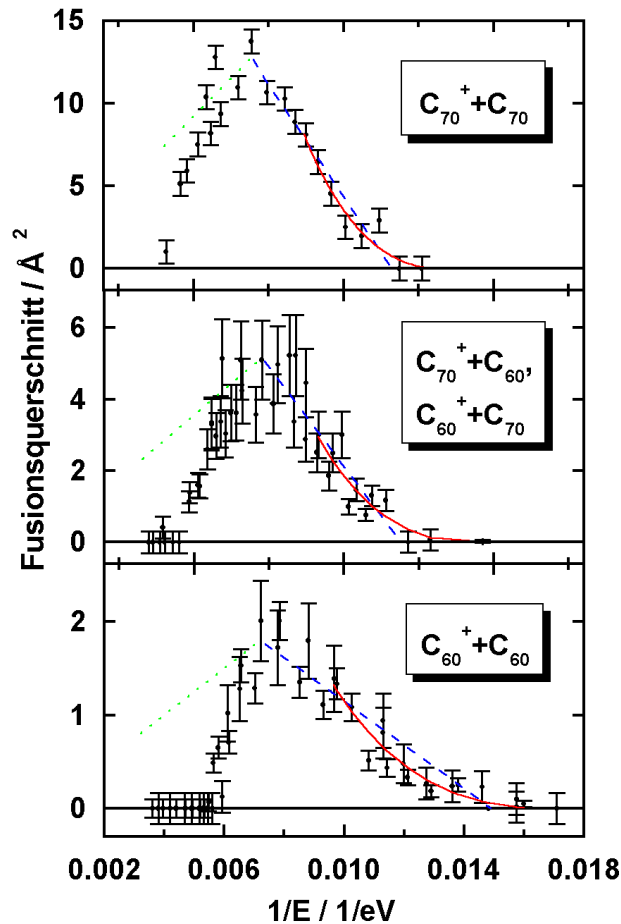


Abb. 2: Fusionsquerschnitt σ_{fus} als Funktion der inversen Stoßenergie E^{-1} . Neben den experimentellen Daten sind Ergebnisse phänomenologischer Modelle gezeigt: einfaches Absorbing Sphere Model (gestrichelt, Gl. 1 und 2), sterisches Absorbing Sphere Model (durchgezogene Kurve, Gl. 3)

Zur Analyse der Fusionsquerschnitte wird das einfache Absorbing Sphere Model herangezogen. Es wird davon ausgegangen, daß Fusion der Cluster auftreten kann, falls der Stoßparameter b kleiner ist als die Summe der Radien der Stoßpartner $R_{12}=R_1+R_2$ und die Stoßenergie E die Summe aus Fusionsbarriere V_b und Zentrifugalenergie b^2E/R^2 übersteigt. Aus diesen Annahmen ergibt sich der Modellfusionsquerschnitt σ_{fus} zu

$$s_{fus} = \bar{P} p R_{12}^2 \left(1 - \frac{V_b}{E}\right), \quad (1)$$

wobei \bar{P} die mittlere Fusionswahrscheinlichkeit angibt.

Oberhalb eines kritischen Drehmomentes l_{krit} wird das Fusionsprodukt instabil aufgrund der großen Zentrifugalenergie, der Fusionsquerschnitt sinkt im Rahmen dieses Modells daher mit steigender Stoßenergie gemäß

$$s_{fus} = \frac{h^2 l_{krit}^2}{8\pi m E}. \quad (2)$$

Wie aus Abb. 2 ersichtlich ist, können die experimentellen Daten im Bereich niedriger Stoßenergien gut durch Gl. 1 beschrieben werden. Die Fusionswahrscheinlichkeit \bar{P} ist mit wenigen bis einigen Prozent sehr klein. Wir schließen daraus, daß in diesem Stoßenergiebereich neben der Fusion noch andere Reaktionskanäle wie z.B. tiefinelastische Streuung von Bedeutung sind, die in den linear gemessenen Massenspektren nicht beobachtet werden können. Diese Interpretation steht in Übereinstimmung mit QMD-Rechnungen /RCK96/. Der Rückgang der gemessenen Fusionsquerschnitte jenseits der kritischen Stoßenergie $E_{krit} = V_b + h^2 l_{krit}^2 / 8\pi m R_{12}^2$, die mit der Lage der Maxima der gemessenen Querschnitte übereinstimmt, ist deutlich steiler als von Gl. 2 vorausgesagt. Neben Dissoziation der Fusionsprodukte aufgrund hoher Zentrifugalanregung und Abdampfen von C_2 -Einheiten (s.u.) tritt hier vermutlich Multifragmentation auf, wie sie auch in QMD-Rechnungen (Abb. 1) beobachtet wird. Die in einem Multifragmentationsereignis erzeugten Fragmente werden in einen weiten Winkelbereich gestreut und können daher mit dem geringen Akzeptanzwinkel ($1,2^\circ$) unserer linearen experimentellen Anordnung nicht effizient nachgewiesen werden. Aus diesem Grunde wurden Winkelverteilungen der Fragmente aufgenommen (s.u.).

Tab. 1: Zusammenfassung der Fusionsschwellen V_b , die sich aus Anwendung der phänomenologischen Modelle (Gl. 1 und 3) auf die experimentell bestimmten Querschnitte sowie aus QMD-Rechnungen /KGS96/ ergeben (Werte in eV).

Stoßsystem	V_b^{ASM} Gl. 1	V_b^{ASM} Gl. 3	V_b^{QMD}
$C_{60}^+ + C_{60}$	67(7)	60(1)	60
$C_{60/70}^+ + C_{70/60}$	84(9)	70(7)	70
$C_{70}^+ + C_{70}$	86(12)	76(4)	75

Das einfache Absorbing Sphere Model kann durch die Annahme einer linear mit der Stoßenergie wachsenden Fusionswahrscheinlichkeit erweitert werden. Im Rahmen dieses sterischen Modells ergibt sich ein Fusionsquerschnitt von

$$s_{fus} = s_0 \frac{(E - V_b)^2}{E}.$$

(3) Die experimentellen Daten in Abb. 2 stehen in exzellenter Übereinstimmung mit Gl. 3. Die Zunahme der Fusionswahrscheinlichkeit mit steigender Stoßenergie bedeutet, daß mit wachsendem E mehr relative Orientierungen der Reaktanden zur Fusion führen. Dieses Verhalten ist intuitiv zu erwarten und wird auch von QMD-Rechnungen bestätigt.

Tabelle 1 faßt die durch Anwendung von Gl. 1 und 3 auf die experimentellen Daten sowie mittels QMD-Rechnungen gewonnenen Werte für die Fusionsschwelle V_b zusammen. Insbesondere die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen des sterischen Modelles und der QMD sind exzellent. Darüberhinaus liefern klassische MD- /5/ und Tight-Binding- /6/ Rechnungen Fusionsschwellen, die mit dem Experiment verträglich sind.

Die primären Fusionsprodukte $C_{120,130,140}^+$ sind auf der μ s-Zeitskala des Experimentes aufgrund ihrer hohen inneren Energie instabil, sie fragmentieren. In Abb. 3 sind die mittleren nachgewiesenen Produktmassen als Funktion der Stoßenergie aufgetragen. Neben den experimentellen Daten sind Resultate von Monte-Carlo-Simulationen gezeigt, die unter Annahme sukzessiver Abdampfung von C_2 -Einheiten, wie sie auch für C_{60} -Ionen beobachtet wird, gerechnet wurden /RCK96,RGH96/. Im Bereich moderater Stoßenergien bis ca. 150 eV stimmen Experiment und Rechnung sehr gut überein. Für größere Energien liegen die nachgewiesenen Massen unterhalb der Modellrechnung. Dies kann durch das Abdampfen größerer Fragmente wie Ringe und Ketten erklärt werden. Diese Interpretation steht in Einklang sowohl mit Maximum-Entropie- /CTL96/ als auch mit QMD- /CRG97/ Rechnungen, die einen flüssig-gasförmig-Phasenübergang in diesem Energiebereich für die fusionierten Fullerene voraussagen.

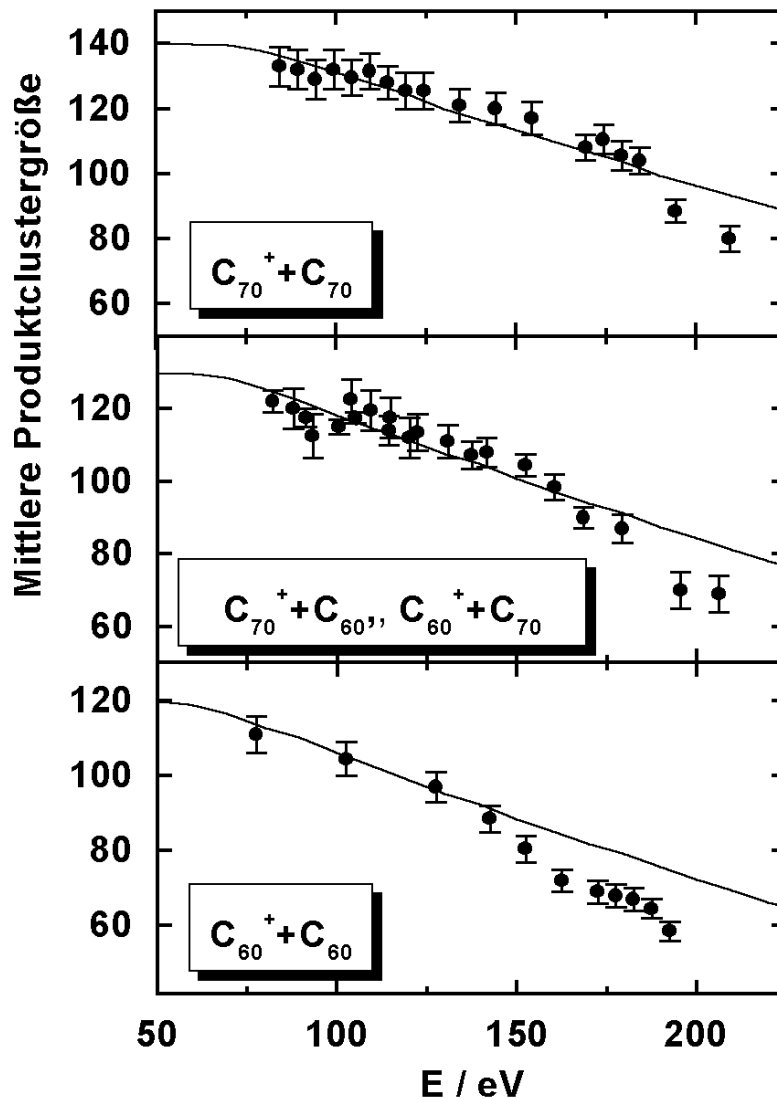


Abb. 3: Mittlere nachgewiesene Fusionsproduktmasse als Funktion der Stoßenergie. Neben den experimentellen Daten sind Ergebnisse von Rechnungen gezeigt, die sukzessives Abdampfen von C₂-Einheiten vom primären Fusionsprodukt simulieren.

Da Multifragmentationsprodukte mit der in den Fusionsexperimenten verwendeten linearen Meßanordnung nicht erfaßt werden können, wurden winkelaufgelöste Messungen durchgeführt. Dazu wurde das Reflektron-Massenspektrometer um das Stoßzentrum herum rotiert. Fragmente werden im Winkelbereich bis zu ca. 10° für Stoßenergien oberhalb von ca. 200 eV detektiert, bei denen in linearer Konfiguration keine Fusionsprodukte mehr nachgewiesen werden. Primärionen und die bei geringeren Stoßenergien entstehenden Fusionsprodukte werden hingegen lediglich bis ca. 2° nachgewiesen. Die aus den Massenspektren gewonnenen mittleren Fragmentmassen /GRC97/ sind in Abbildung 4 als Funktion der Stoßenergie aufgetragen. Daneben ist

die Produktmassenverteilung der linear ($\Theta=0^\circ$) gemessenen Fusionsprodukte (Abb. 3) gezeigt.

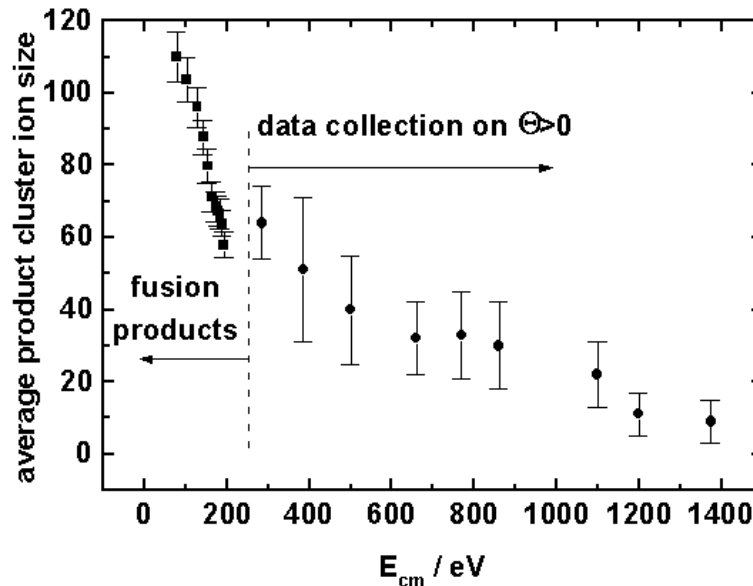


Abb. 4: Mittlere nachgewiesene Produktmassen aus Fusions- und Fragmentationsereignissen in $C_{60}+C_{60}$ -Stößen

Die mittlere Masse der gestreuten Fragmente sinkt mit ansteigender Stoßenergie nahezu linear von ca C_{70}^+ auf C_{10}^+ ab. Die mittleren Fusionsprodukt- und Fragmentmassen stimmen im Übergangsbereich um 200 eV ungefähr überein. Die Fragmentmassenverteilung als Funktion der Stoßenergie ist mit einem Multifragmentationsmechanismus verträglich, für den eine Abnahme der mittleren Fragmentmasse mit steigendem E zu erwarten ist. Allerdings kann auch tiefinelastische Streuung mit anschließender Fragmentation des Projektils als möglicher Reaktionskanal nicht ausgeschlossen werden.

Die Fullerenionenquelle erzeugt neben einfach geladenen auch zwei- und dreifach geladene Ionen mit hoher Intensität. Dies ermöglichte uns die Bestimmung absoluter

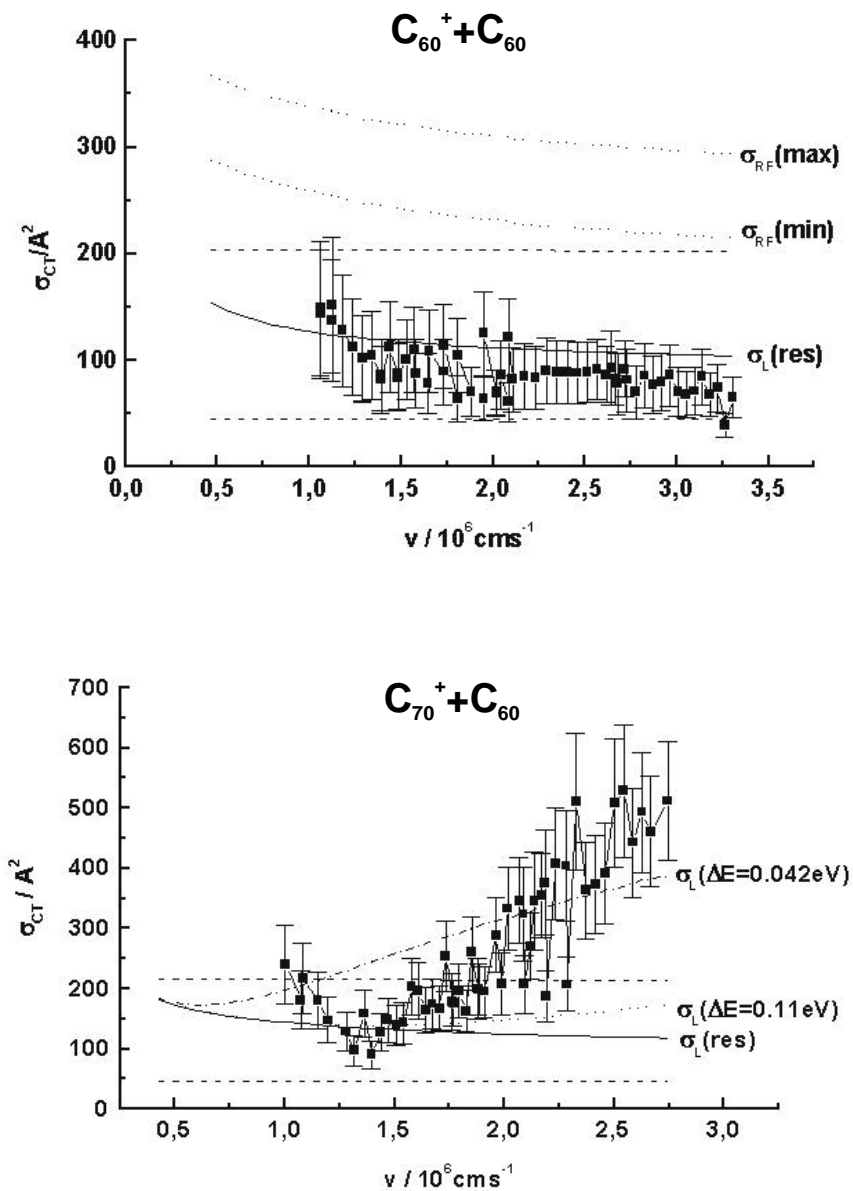


Abb. 5: Absolute Querschnitte für die Elektronentransferprozesse $C_{60/70}^+ + C_{60} \rightarrow C_{60/70} + C_{60}^+$ als Funktion der Projektilgeschwindigkeit. Die Stoßenergien lagen zwischen etwa 100 und 2200 eV (CM). Neben den experimentellen Daten sind Rechnungen beruhend auf Over-Barrier- und Ion-Atom-Stoßmodellen gezeigt /RoC97b/.

Reaktionsquerschnitte von Elektronentransferprozessen zwischen Fullerenen. Im Falle der Prozesse $C_{60}^{n+} + C_{60} \rightarrow C_{60}^{(n-q)+} + C_{60}^{q+}$, $n = 2, 3$, $q = 1, 2$ /RoC95, RoC97a/ ist der Elektronenübergang quasi-resonant, wie die Analyse der experimentellen Daten mit einfachen Modellen zu Ion-Atom-Stößen zeigt. Die Neutralisationsreaktionen $C_{60/70}^+ + C_{60} \rightarrow C_{60/70} + C_{60}^+$ konnten durch Einsatz eines linearen Massenspektrometers anstelle des Reflektrons zum Nachweis der neutralen Produktcluster untersucht werden

/RoC97b/. Abb. 5 zeigt die experimentellen Querschnitte neben theoretischen Rechnungen basierend auf einfachen Over-Barrier- und Ion-Atom-Stoßmodellen /RoC97b,7/. Im Falle des symmetrischen Elektronentransfers zum C_{60}^+ -Projektil ist der Prozeß resonant, während der deutlich verschiedene Verlauf der Energieabhängigkeit des Querschnittes im Falle des unsymmetrischen Transfers zum C_{70}^+ -Projektil durch einen nicht-resonanten Ladungstransfer erklärt werden kann.

Im Jahr 1998 wurde zusätzlich die Herstellungsdynamik, Stabilität und spektroskopischen Eigenschaften von im Stoß produzierten endohedralen Fullerenen intensiv (auch in Zusammenarbeit mit TP B3 Stehlik/Vieth) untersucht.

Literatur

- 1 E.E.B. Campbell, V. Schyja, R. Ehlich, I.V. Hertel, Phys. Rev. Lett. **70**, 263 (1993)
- 2 G. Seifert, R. Schmidt, Int. J. Mod. Phys. B **6**, 3845 (1992)
- 3 R. Schmidt, G. Seifert, H.O. Lutz, Phys. Lett. A **158**, (1991); R. Schmidt, H.O. Lutz, Phys. Lett. A **183**, 338 (1993)
- 4 R. Schmidt, J. Schulte, O. Knospe, G. Seifert, Phys. Lett A **194**, 101 (1994)
- 5 D.H. Robertson, D.W. Brenner, C.T. White, J. Phys, Chem. **99**, 15721 (1995)
- 6 B.L. Zhang, C.Z. Wang, C.T. Chan, K.M. Ho, J. Phys. Chem. **97**, 3134 (1993)
- 7 D. Rapp, W.E. Francis: J. Chem. Phys. **37**, 2631 (1962)

Material zum Teilprojekt

Publikationen

1995

- RoC95 F. Rohmund, E.E.B. Campbell
Charge transfer collisions between C_{60}^{2+} and C_{60}
Chem. Phys. Lett. **245**, 237 (1995)

1996

- CaH96a E.E.B. Campbell, I.V. Hertel
Die Physik der Fullerene: Experimente in der Gasphase
Chapter 6 in "Von Fuller bis zu Fullerenen" ed. W. Krätschmer , p.143-159
(Vieweg Verlag 1996)
- CaH96b E.E.B. Campbell, I.V. Hertel
Hyperthermal chemistry and cluster collisions
Nucl. Instr. and Methods in Physics Research B, **112**, 48 (1996)
- CFM96 E.E.B. Campbell, P.W. Fowler, D. Mitchell, F. Zerbetto
Increasing cost of pentagon adjacency for larger fullerenes
Chem. Phys. Lett., **250**, 544 (1996)

- CRL96 E.E.B. Campbell, T. Raz, R.D. Levine
Internal energy dependence of the fragmentation pattern of C₆₀
Chem. Phys. Lett. **253**, 261 (1996)
- EWC96 R. Ehlich, M. Westerburg, E.E.B. Campbell
Collision induced fragmentation of fullerenes with atomic and molecular targets
J. Chem. Phys. **104**, 1900 (1996)
- HaC96 K. Hansen, E.E.B. Campbell
Radiative cooling of fullerenes
J. Chem. Phys., **104**, 5012 (1996)
- HHM96 K. Hansen, H. Hohmann, R. Müller, E.E.B. Campbell
Icosahedra of icosahedra: the stability of (C₆₀)₁₃
J. Chem. Phys., **105**, 6088 (1996)
- KGS96 O. Knospe, A.V. Glotov, G. Seifert, R. Schmidt
Theoretical studies of atomic cluster cluster collisions
J. Phys. B **29**, 5163 (1996)
- MWK96 R. Mitzner, B. Winter, Ch. Kusch, E.E.B. Campbell and I.V. Hertel
Coalescence reactions in laser-induced fullerene desorption: the role of fragments
Z. Phys. D. **37**, 89 (1996)
- RCK96 F. Rohmund, E.E.B. Campbell, O. Knospe, G. Seifert, R. Schmidt
Collision energy dependence of molecular fusion and fragmentation in C₆₀⁺+C₆₀ collisions
Phys. Rev. Lett. **76**, 3289 (1996)
- RGH96 F. Rohmund, A.V. Glotov, K. Hansen, E.E.B. Campbell
Experimental studies of fusion and fragmentation of fullerenes
J. Phys. B **29**, 5143 (1996)

1997

- BFS97 P.Barran, S. Firth, A.J. Stace, H.W. Kroto, K. Hansen, E.E.B. Campbell
The stability of fullerenes, C_n for 46<n<102
Int. J. Mass Spec. & Ion Processes, **167/168**, 127 (1997)
- CRG97 E.E.B. Campbell, F. Rohmund, A. Glotov
Fullerene-fullerene-collisions
Il Nuovo Cimento **110**, 1191 (1997)
- GRC97 A.V. Glotov, F. Rohmund, E.E.B. Campbell
Angular resolved Study of Fragmentation in Collisions between Fullerenes
Proceedings of the International Symposium on Similarities and Differences between Atomic Nuclei and Microclusters: Unified Developments for Cluster
Science, edited by Y. Abe and S.-M. Lee, AIP Press (1997)
- HMB97 K. Hansen, R. Müller, P. Brockhaus, E.E.B. Campbell, I.V. Hertel
Resonant two-photon ionisation spectroscopy of C₆₀
Z. Phys. D, **42**, 153 (1997)
- HMH97 K. Hansen, R. Müller, H. Hohmann, E.E.B. Campbell
Stability of clusters of fullerenes
Z. Phys. D. **40**, 361 (1997)

- RoC97a F. Rohmund, E.E.B. Campbell
Charge transfer collisions between fullerenes: $C_{60}^{3+} + C_{60}$
Z. Phys. D **40**, 399 (1997)
- RoC97b F. Rohmund, E.E.B. Campbell
Resonant and non-resonant charge transfer in $C_{60/70}^+ + C_{60}$ -collisions
J. Phys. B **30**, 5293 (1997)

1998

- BET98 L.P. Biro, R. Ehlich, R. Tellgmann, A. Gromov, N. Krawez, M. Tschaplyguine, M.-M. Pohl, E. Zsoldos, Z. Vertessy, Zs. Horvath, E.E.B. Campbell
Growth of carbon nanotubes by fullerene decomposition in the presence of transition metals
Chem. Phys. Lett., submitted
- Cam98 E.E.B. Campbell
Atom Cluster
in McGraw-Hill 1999 Yearbook of Science and Technology (McGraw-Hill, New York), in press
- CCF98 E.E.B. Campbell, S. Couris, M. Fanti, E. Koudoumas, N. Krawez, F. Zerbetto
Third order susceptibility of $Li@C_{60}$
Advanced Materials, submitted
- CEH98 E.E.B. Campbell, R. Ehlich, G. Heusler, O. Knospe, H. Sprang
Capture dynamics in collisions between fullerene ions and rare gas atoms
Chem. Phys., in press
- CGR98 E.E.B. Campbell, A.V. Glotov, F. Rohmund
Cluster-cluster-collisions: fusion, phase transition and fragmentation phenonema
Proc. of the Les Houches Workshop on Nuclear Matter in Different Phases and Transitions, ed. M. Ploszajczak, Kluwer Acad. Publ. (1998)
- ESW98 R. Ehlich, H. Sprang, M. Westerburg, E.E.B. Campbell
Fragmentation, charge transfer and chemical reactions in $C_{60}^+/C_{70}^+ - SF_6$ collisions
J. Chem. Phys. **108**, 9390 (1998)
- HaC98 K. Hansen, E.E.B. Campbell
Thermal radiation from small particles
Phys. Rev. E, in press
- HCM98 K. Hansen, R. Müller, E.E.B. Campbell
Comment on 'Photofragmentation of C_{60} in seeded supersonic molecular beams: effects of ro-vibrational cooling' by Biasioli et al.
Chem. Phys. Lett., submitted
- KGB98 N. Krawez, A. Gromov, K. Buttke, E.E.B. Campbell
Thermal stability of $Li@C_{60}$
Eur. Phys. J. D, submitted
- KGT98 N. Krawez, A. Gromov, R. Tellgmann, E.E.B. Campbell
Production, HPLC separation and UV-Vis-NIR spectroscopy of $Li@C_{70}$
in Proc. of the Int. Winter School on Electronic Properties of Novel Materials, ed. Kuzmany, Fink, Mehring, Roth (World Scientific, 1998) in press
- KKT98 Ch. Kusch, N. Krawez, R. Tellgmann, B. Winter, I.V. Hertel, E.E.B. Campbell
Thermal desorption spectroscopy of fullerene films containing endohedral $Li@C_{60}$
Appl. Phys. A., **66**, 293 (1998)

KTG98 N. Krawez, R. Tellgmann, A. Gromov, W. Krätschmer, I.V. Hertel, E.E.B. Campbell
Collisions with fullerenes: from basic dynamics to the production and isolation of new materials
Mol. Materials **10** (1998)

Wissenschaftliche Mitarbeiter des Teilprojektes in der Förderungsperiode 95-98

PD Dr. Eleanor E.B. Campbell, Dr. K. Hansen (1.10.-31.12.97)
Doktoranden: Frank Rohmund (1.1.95-15.7.97), Alexei V. Glotov (18.4.95-30.6.98),
Harald Varel (1.1-30.5.98), Nela Krawez (1.1.-31.12.98)
Diplomand: Matthias Henyk