

# Praktische Plasmaphysik in der Halbleiterindustrie Kurs bei Trumpf in Ulm

Ila Streuprozesse, 25. März 2021

Gerhard Franz

Walter Schottky Institut  
TU München

<http://www.gerhard-franz.org>



# Programm

- Einführung



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- RF- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- RF- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- CCP- und ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- RF- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- CCP- und ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung
- Sputtern



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- RF- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- CCP- und ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung
- Sputtern
- RIE I + (PE)CVD



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- RF- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- CCP- und ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung
- Sputtern
- RIE I + (PE)CVD
- RIE II: Microfeatures, Ätzmechanismen, Endpunktkontrolle, Plasmadiagnostik





# Streuquerschnitte

● **Elektronen**



# Streuquerschnitte

- **Elektronen**
- Streuquerschnitt der elastischen Streuung mit schweren Teilchen



# Streuquerschnitte

- **Elektronen**
- Streuquerschnitt der elastischen Streuung mit schweren Teilchen
- Streuquerschnitt der unelastischen Streuung mit schweren Teilchen



# Streuquerschnitte

- **Elektronen**
- Streuquerschnitt der elastischen Streuung mit schweren Teilchen
- Streuquerschnitt der unelastischen Streuung mit schweren Teilchen
- Vollständiger Streuquerschnitt



# Streuquerschnitte

- **Elektronen**
- Streuquerschnitt der elastischen Streuung mit schweren Teilchen
- Streuquerschnitt der unelastischen Streuung mit schweren Teilchen
- Vollständiger Streuquerschnitt
- **Schwere Teilchen**



# Streuquerschnitte

- **Elektronen**
- Streuquerschnitt der elastischen Streuung mit schweren Teilchen
- Streuquerschnitt der unelastischen Streuung mit schweren Teilchen
- Vollständiger Streuquerschnitt
- **Schwere Teilchen**
- Streuquerschnitt der elastischen Streuung

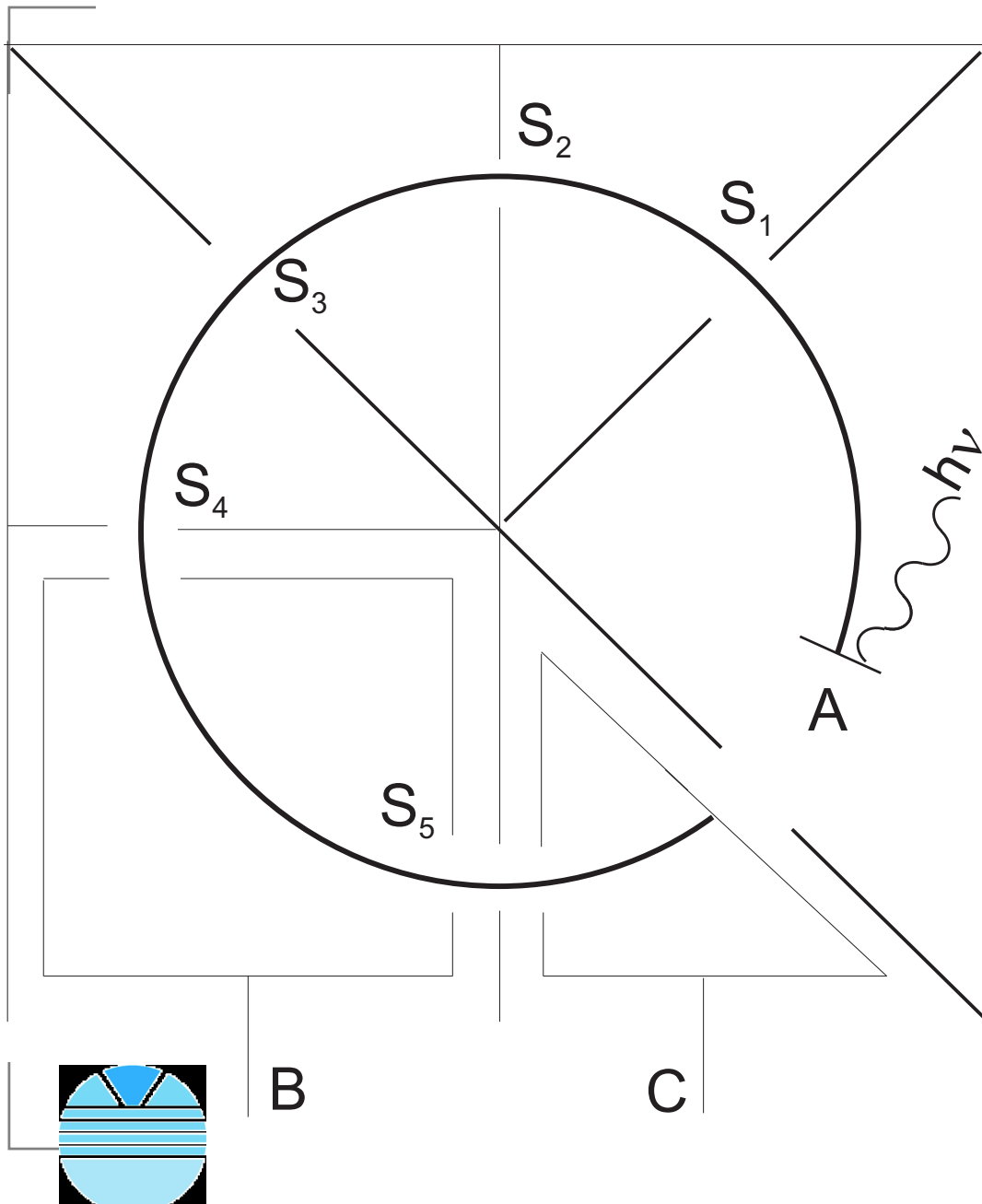


# Streuquerschnitte

- **Elektronen**
- Streuquerschnitt der elastischen Streuung mit schweren Teilchen
- Streuquerschnitt der unelastischen Streuung mit schweren Teilchen
- Vollständiger Streuquerschnitt
- **Schwere Teilchen**
- Streuquerschnitt der elastischen Streuung
- Streuquerschnitt der unelastischen Streuung



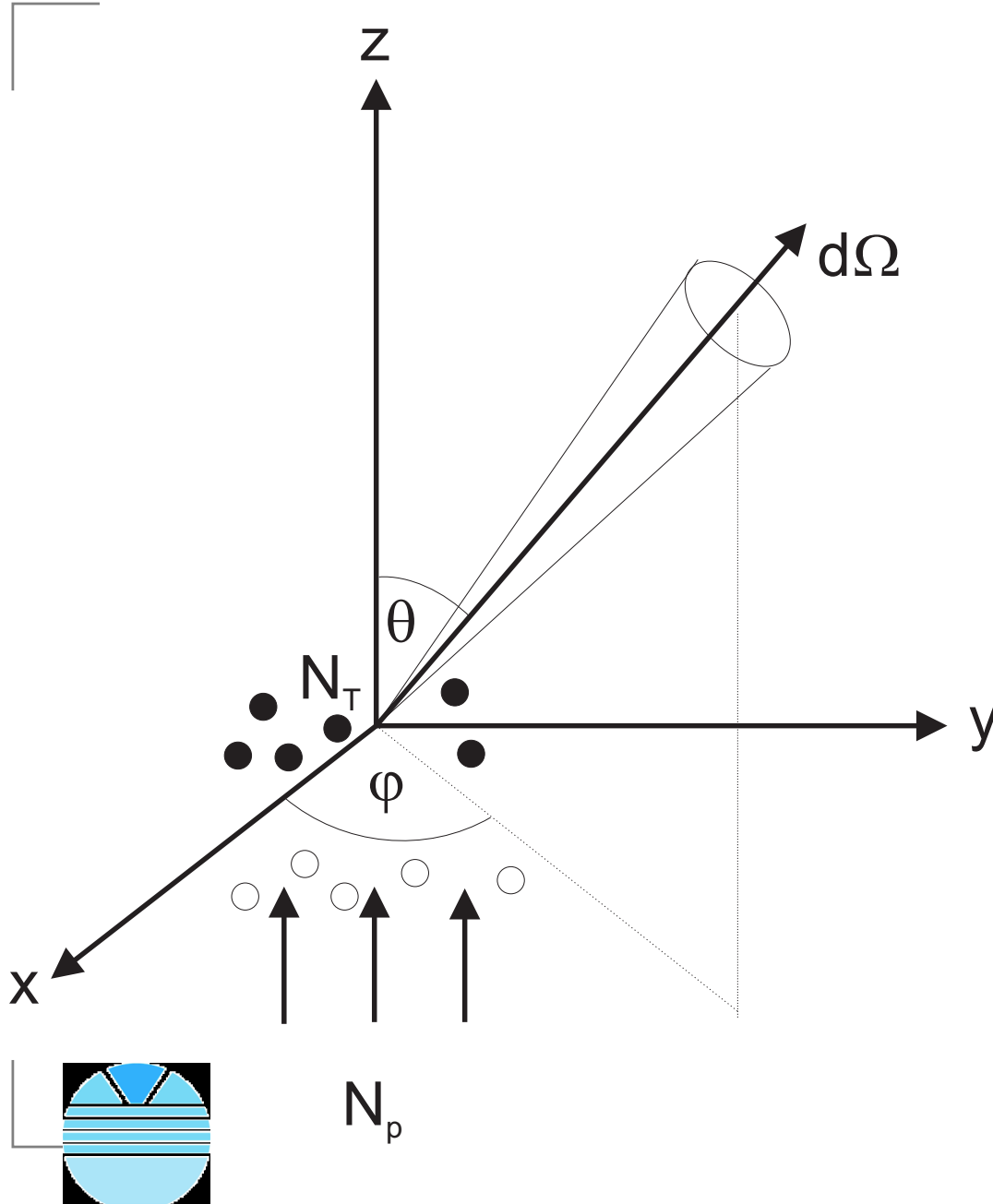
# Totaler Streuquerschnitt I



RAMSAUERS Apparat zur Messung des vollständigen Streuquerschnitts nach Burhop. Aus ZnS ausgelöste Elektronen wurden in einem senkrecht zur Zeichenebene stehenden Magnetfeld radial beschleunigt, die durch die Schlitze  $S_1$  bis  $S_5$  definiert sind. Sie müßten in den Faraday-Käfigen B und C gezählt werden, wenn sie nicht vorher weggestreut würden.

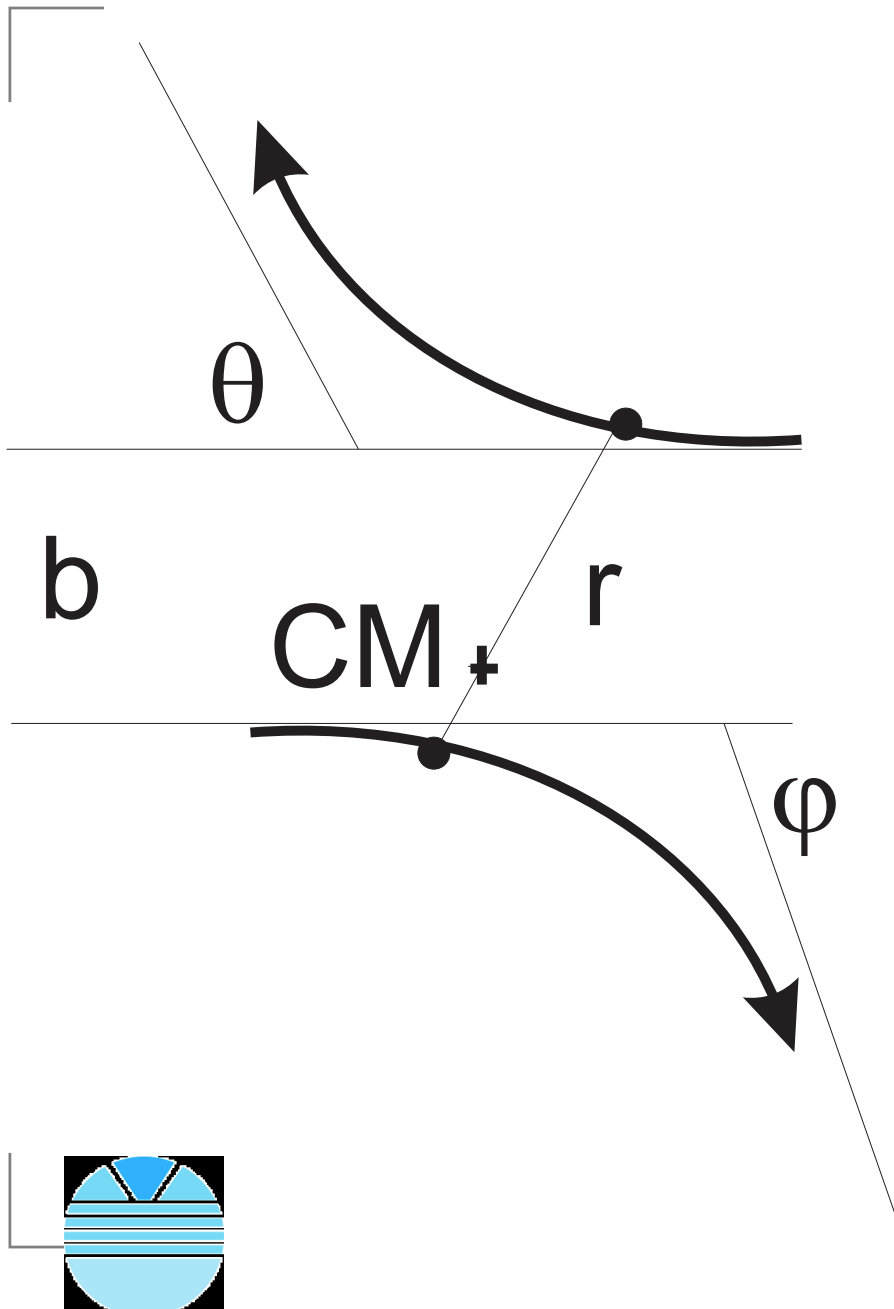


# Totaler Streuquerschnitt II



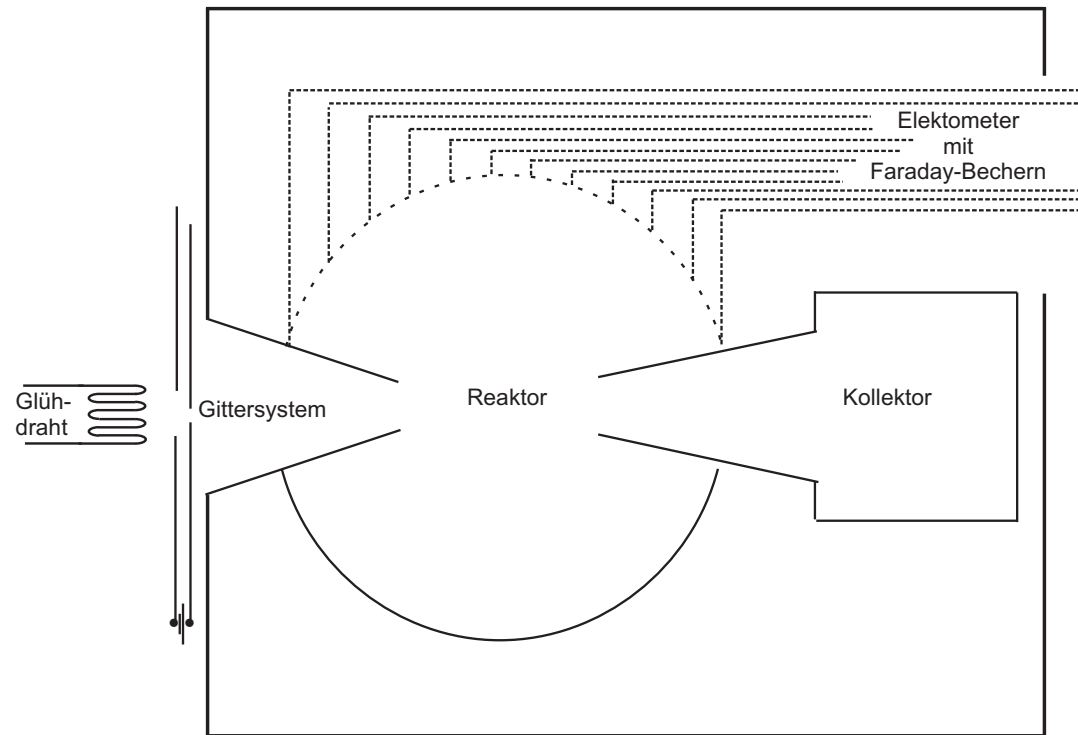
Definition des differentiellen Streuquerschnitts

# Totaler Streuquerschnitt III



Stoß zwischen zwei Kugeln.  
 $b$ : Streuparameter,  $\theta$ ,  $\varphi$ :  
Streuwinkel, CM:  
Massenzentrum.

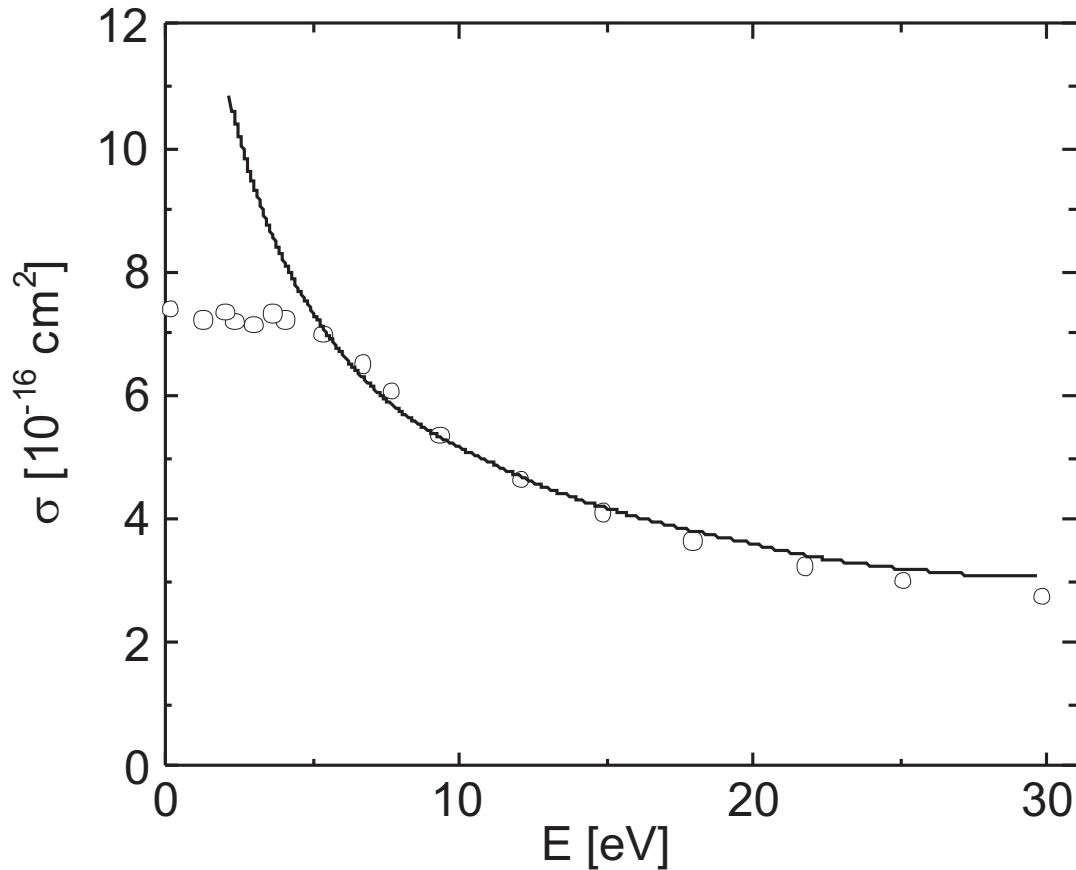
# Totaler Streuquerschnitt IV



Skizze des Apparats von RAMSAUER und KOLLATH zur Bestimmung der Winkelabhängigkeit des Stoßquerschnitts für elastische Streuung von Elektronen nach BROWN. Aus dem winkelgewichteten Streuquerschnitt ergibt sich dann der Streuquerschnitt für den Impulsaustausch.



# Totaler Streuquerschnitt $\sigma$

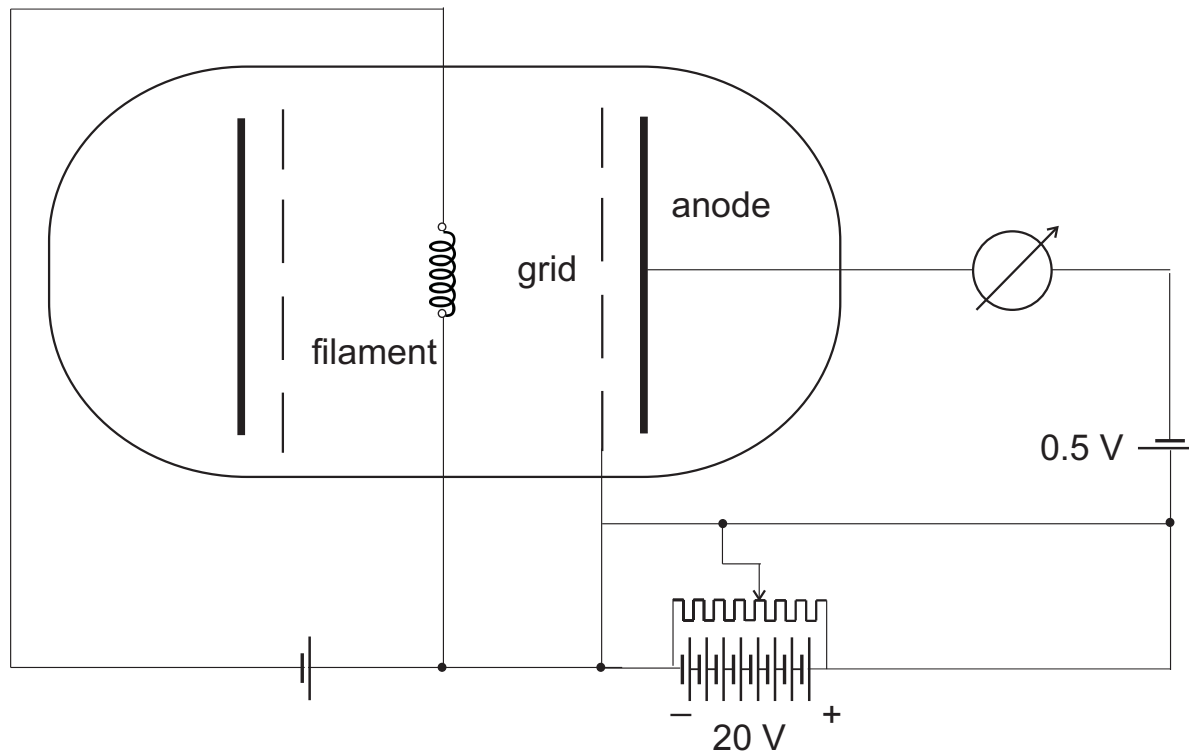


Experimentelle und berechnete Streuquerschnitte des elastischen Stoßes von Elektronen in Helium als Funktion der Elektronenenergie nach BROWN.



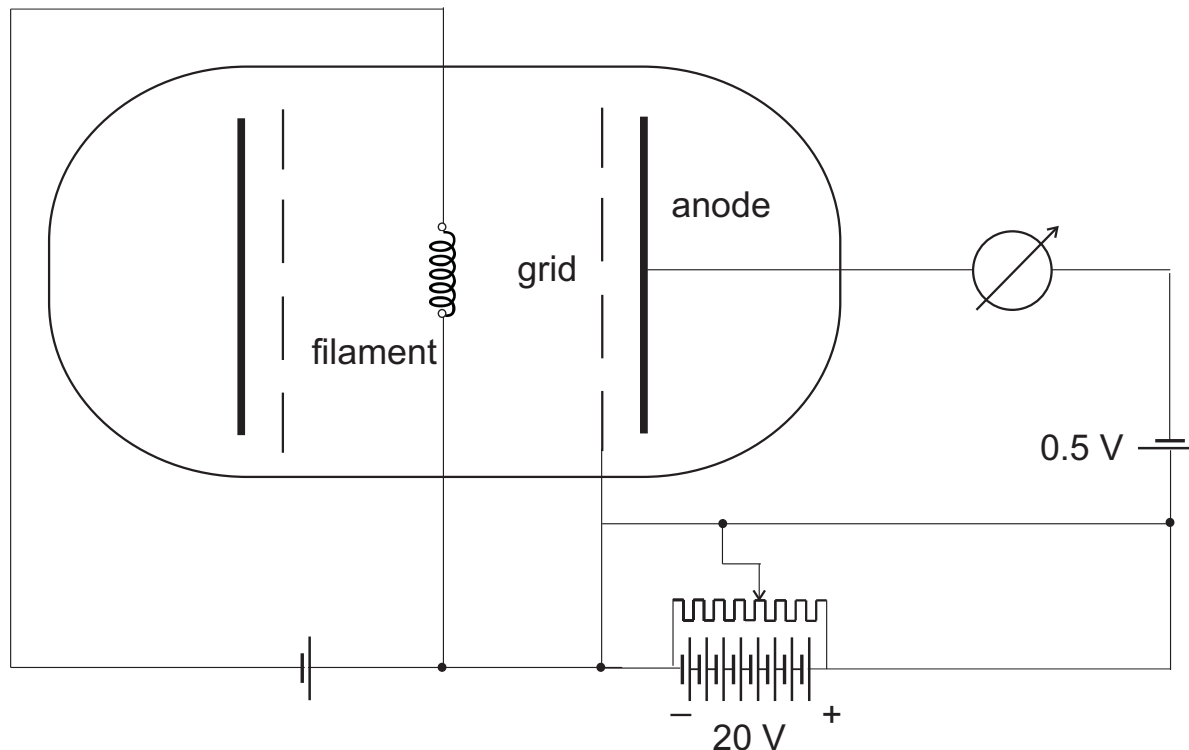
# Franck-Hertz-Versuch I

- Anregung von Hg-Atomen durch Elektronenstoß



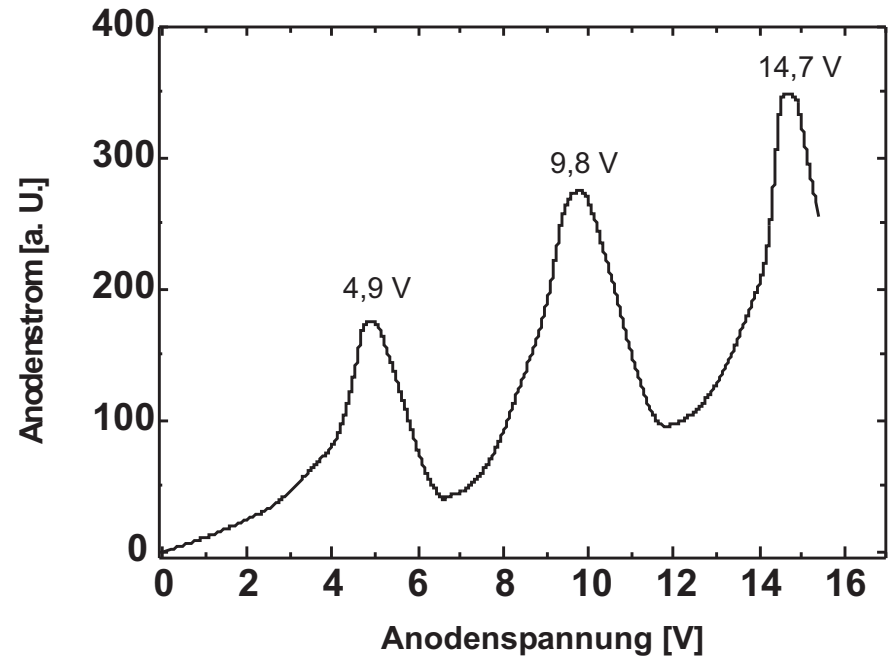
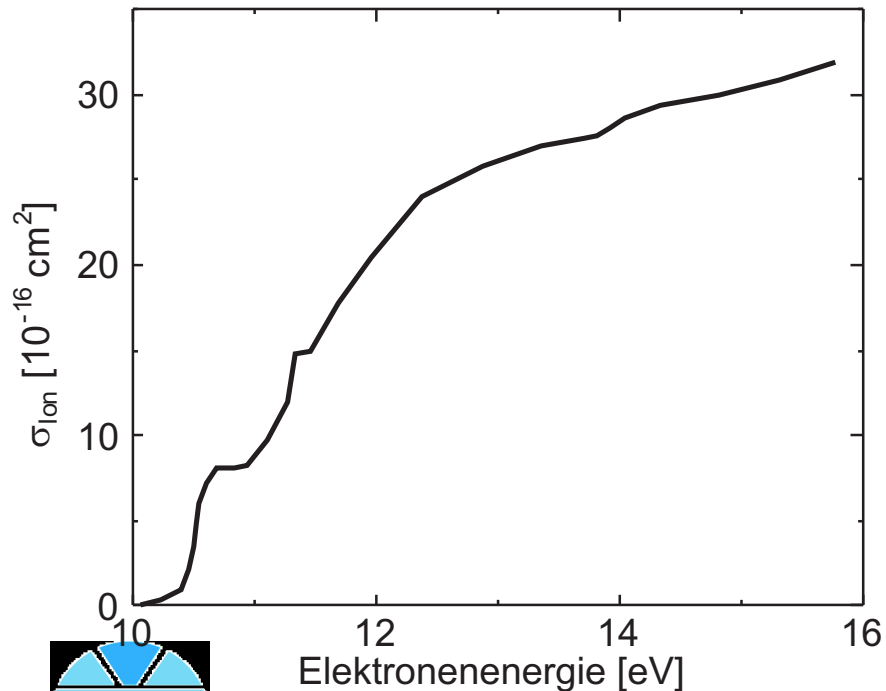
# Franck-Hertz-Versuch I

- Anregung von Hg-Atomen durch Elektronenstoß
- Röhre mit Hg-Dampf, Elektronen werden thermisch emittiert und durch die Gitterspannung beschleunigt.



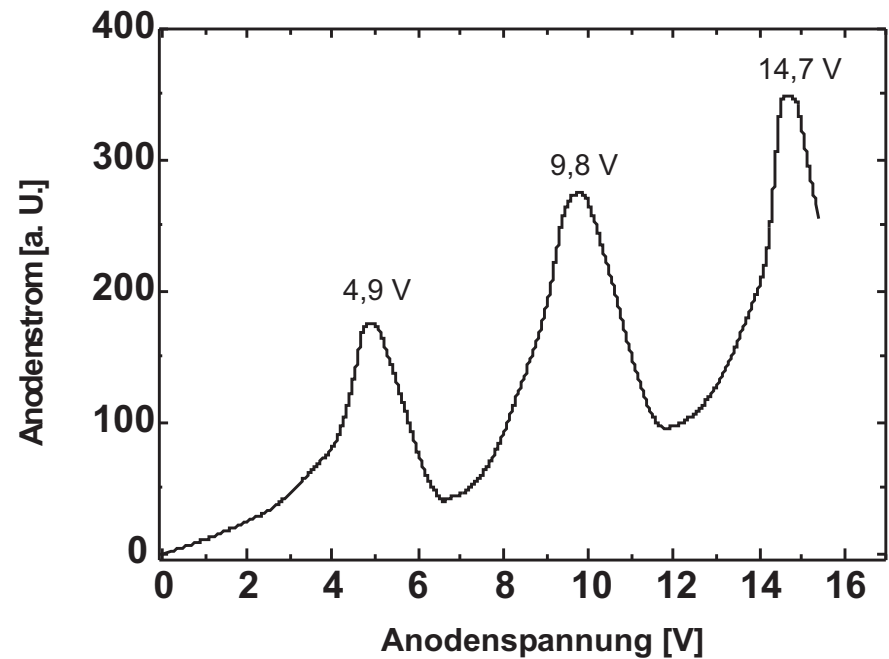
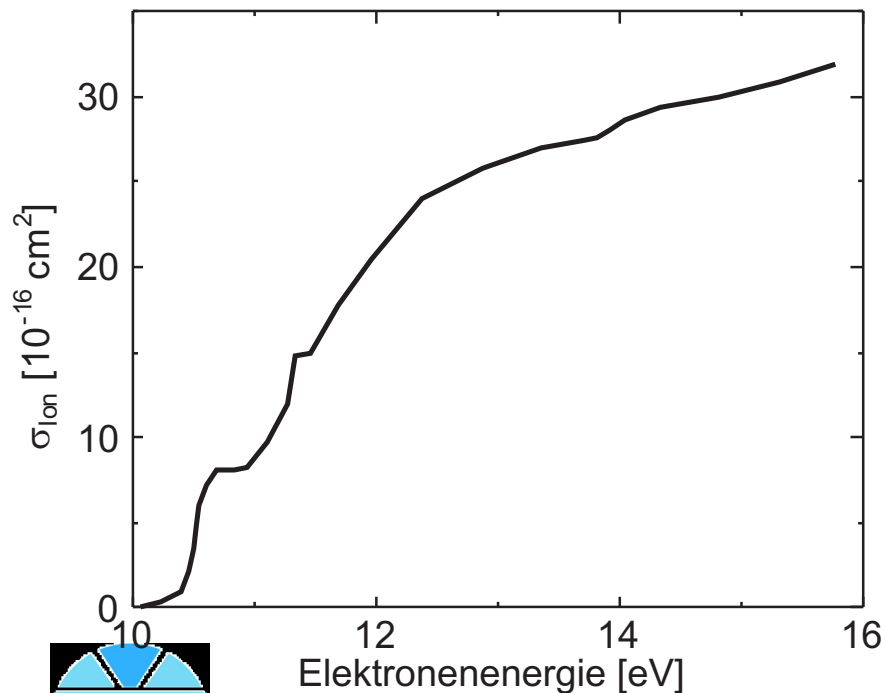
# Franck-Hertz-Versuch II

- Anregung von Hg-Atomen durch Elektronenstoß



# Franck-Hertz-Versuch II

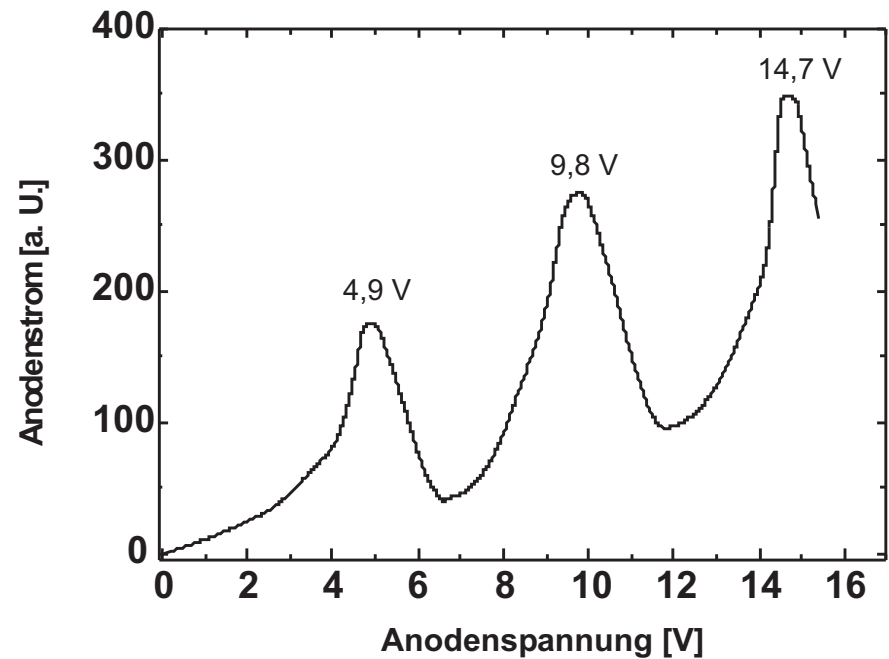
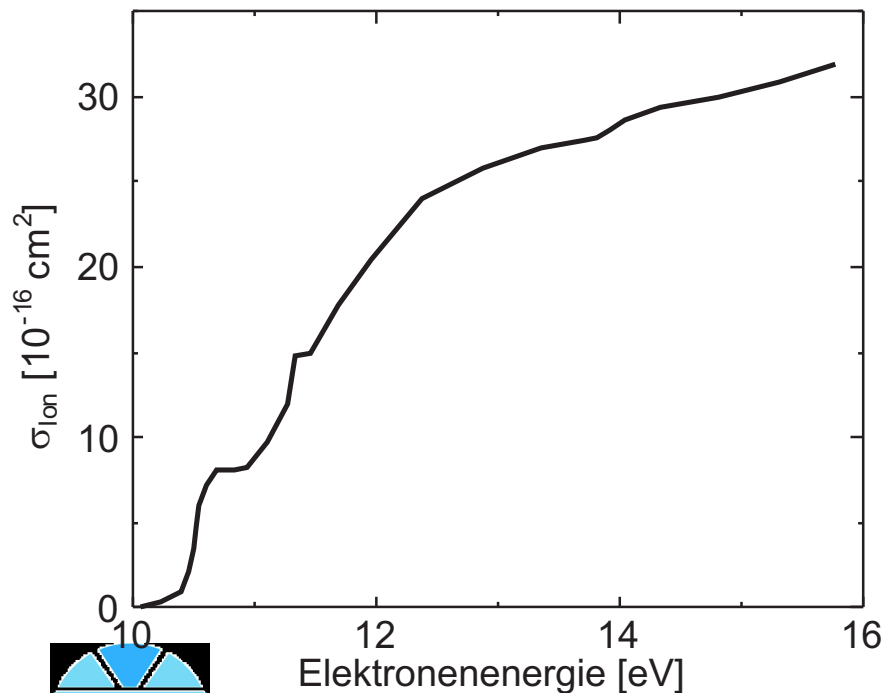
- Anregung von Hg-Atomen durch Elektronenstoß
- 1. Ionisierungspotential bei 4,9 eV.



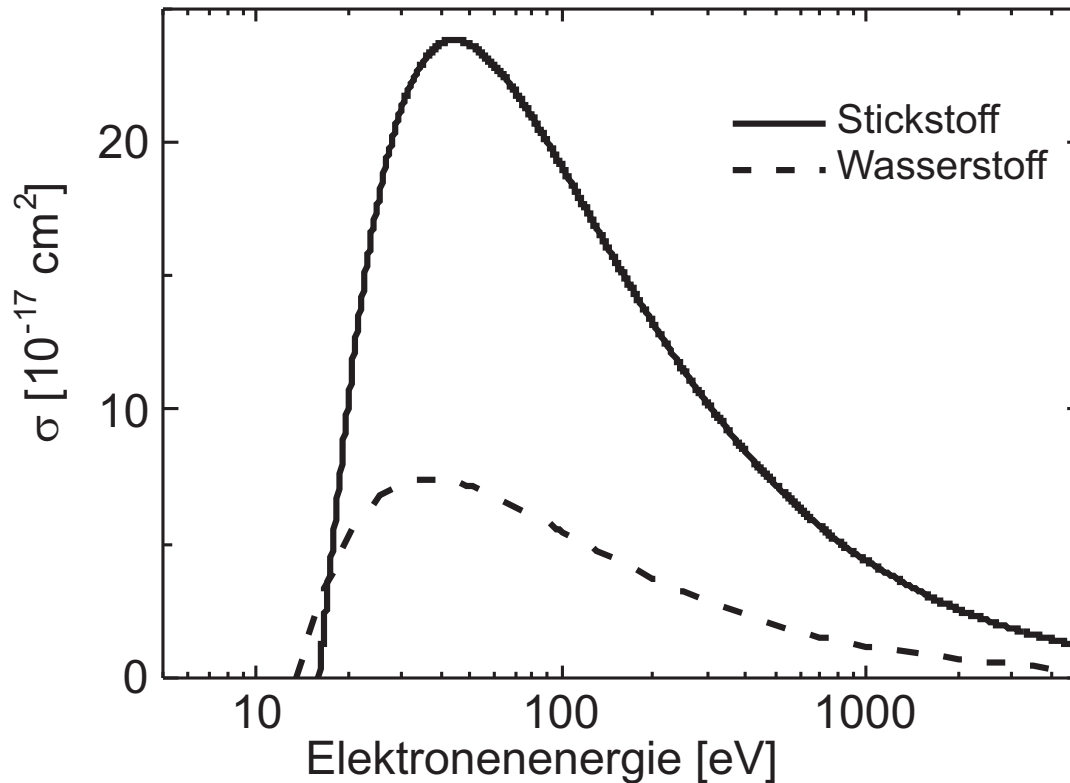


# Franck-Hertz-Versuch II

- Anregung von Hg-Atomen durch Elektronenstoß
- 1. Ionisierungspotential bei 4,9 eV.
- multiples Auftreten alle 4,9 eV.



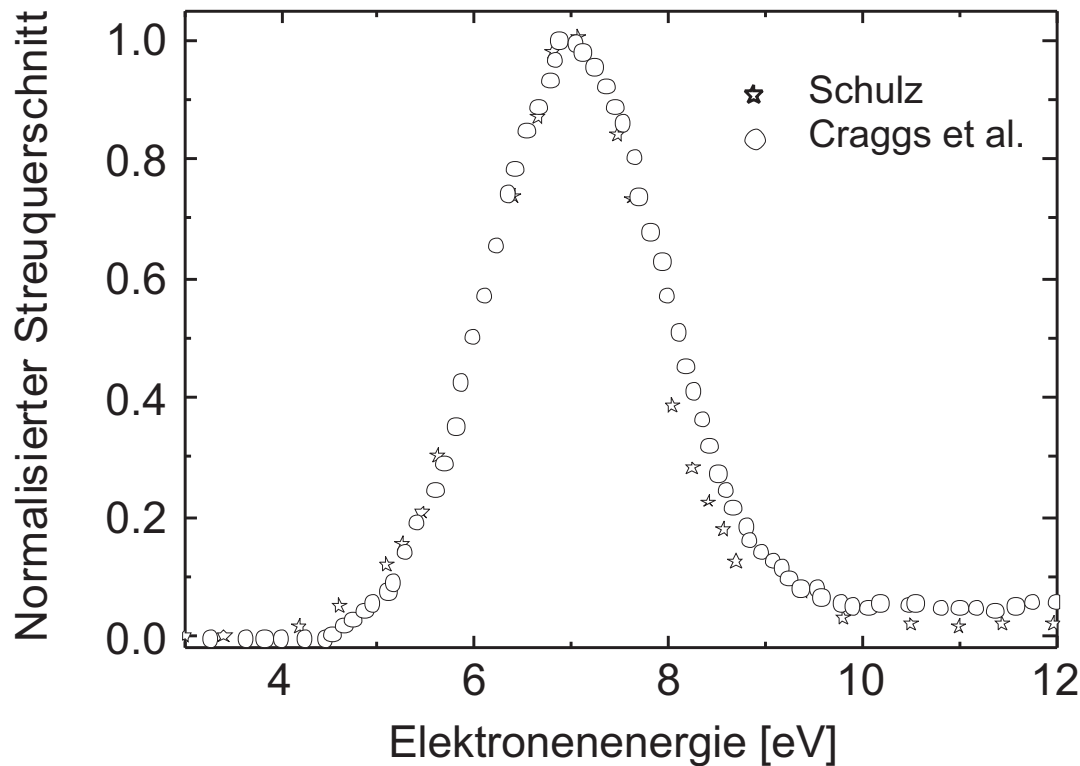
# Unelastischer Streuquerschnitt I



Typische Abhängigkeit des unelastischen Streuquerschnittes von der Energie für den Stoß zwischen Elektronen und Molekeln.



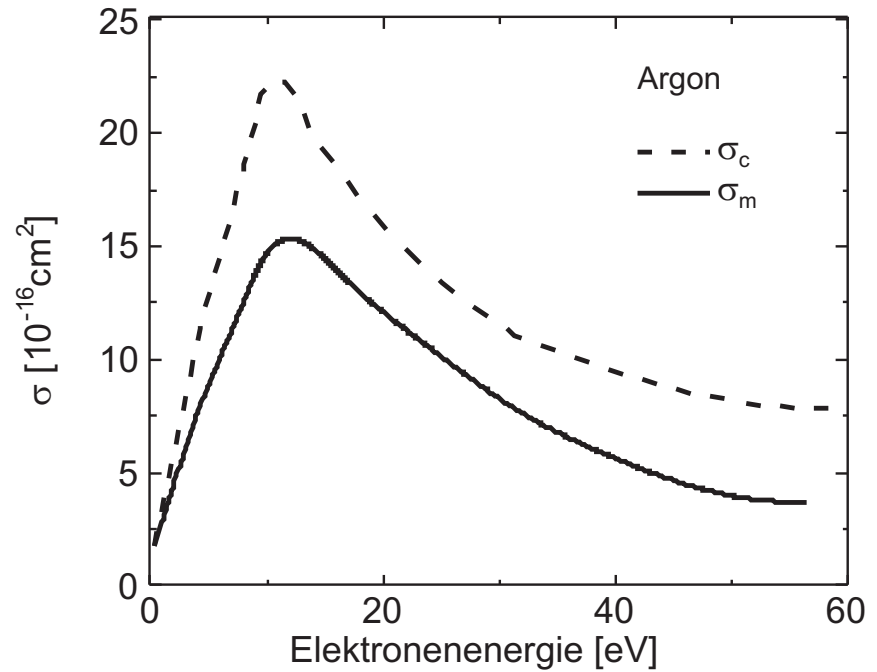
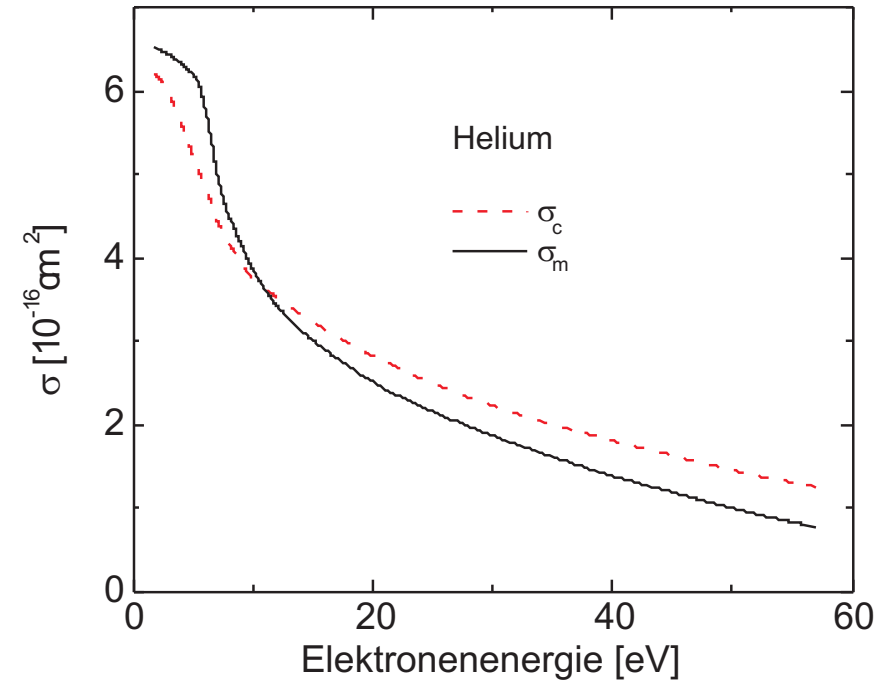
# Unelastischer Streuquerschnitt II



Normalisierter Streuquerschnitt des Elektroneneinfangs und Bildung von  $O^-$ -Ionen. Die offenen Kreise stammen von SCHULZ, die vollen Kreise von CRAGGS et al. Das Maximum (SCHULZ) liegt bei 1,25 Mbarn und 6,7 eV (nach MCDANIEL 8).



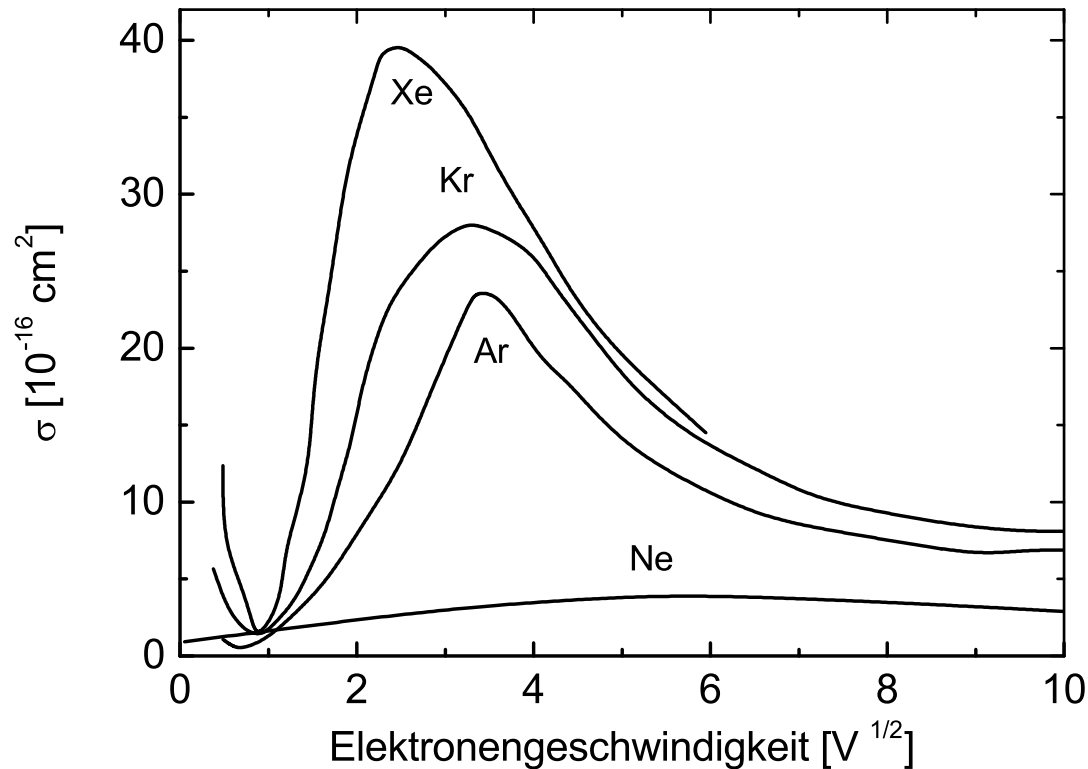
# Totale Streuquerschnitte I



Vergleich zwischen vollständigem Streuquerschnitt  $\sigma_c$  und Streuquerschnitt für den Impulstransfer  $\sigma_m$  der Elektronen für das leichteste Edelgas Helium und das sich zu niedrigen Elektronenenergien völlig anders verhaltende mittelschwere Edelgas Argon nach BROWN.



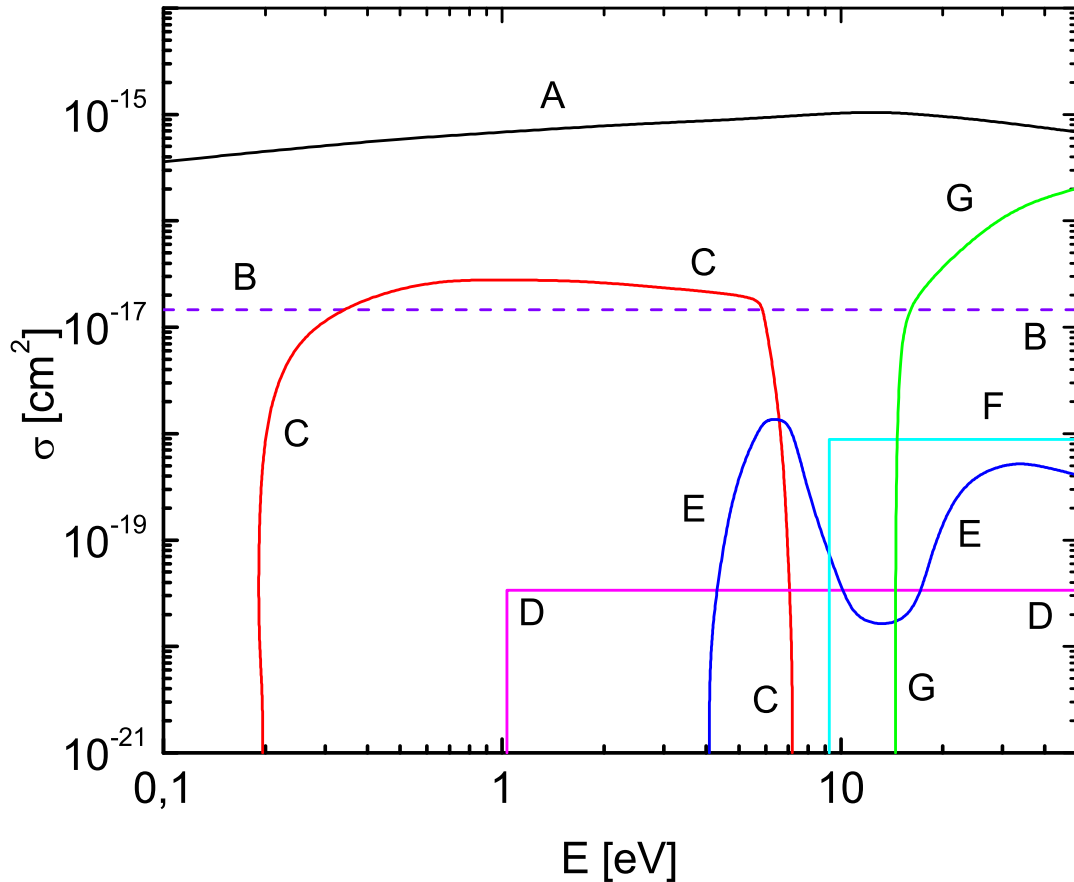
# Totale Streuquerschnitte II



Experimentelle Streuquerschnitte der schweren Edelgase in Abhängigkeit von der Elektronengeschwindigkeit. Auffallend ist die nahezu vollständige Transparenz bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten und ein ausgeprägtes Maximum bei der Ionisierungsenergie  $E_{\text{Ion}}$ .



# Totale Streuquerschnitte III



Die einzelnen Beiträge des totalen Streuquerschnitts für  $O_2$  nach MYERS. Die Buchstaben stehen für folgende Anteile:

A: elastische Streuung, B: Anregung der Rotation, C: Anregung der Schwingung, D: Anregung zum Zustand  $a^1\Delta_g$ , E: „Dissociative Attachment“, F: Anregung höherer elektronischer Zustände, G: Ionisierung.



# Elast. Streuung zw. schweren Teilchen

| $\angle$ | $d\sigma(\vartheta)/d\Omega$ |                          |
|----------|------------------------------|--------------------------|
|          | <i>Hartree-Potential</i>     | <i>Coulomb-Potential</i> |
| 0        | $9 \cdot 10^3$               | $\infty$                 |
| 12       | 7,85                         | 124,0                    |
| 28       | 2,00                         | 6,10                     |
| 34       | 0,72                         | 2,85                     |
| 57       | 0,21                         | 0,40                     |
| 80       | 0,08                         | 0,12                     |
| 114      | 0,04                         | 0,04                     |
| 137      |                              | 0,03                     |
| 167      |                              | 0,02                     |

Berechnete differentielle

Streuquerschnitte  $d\sigma(\vartheta)/d\Omega$  pro

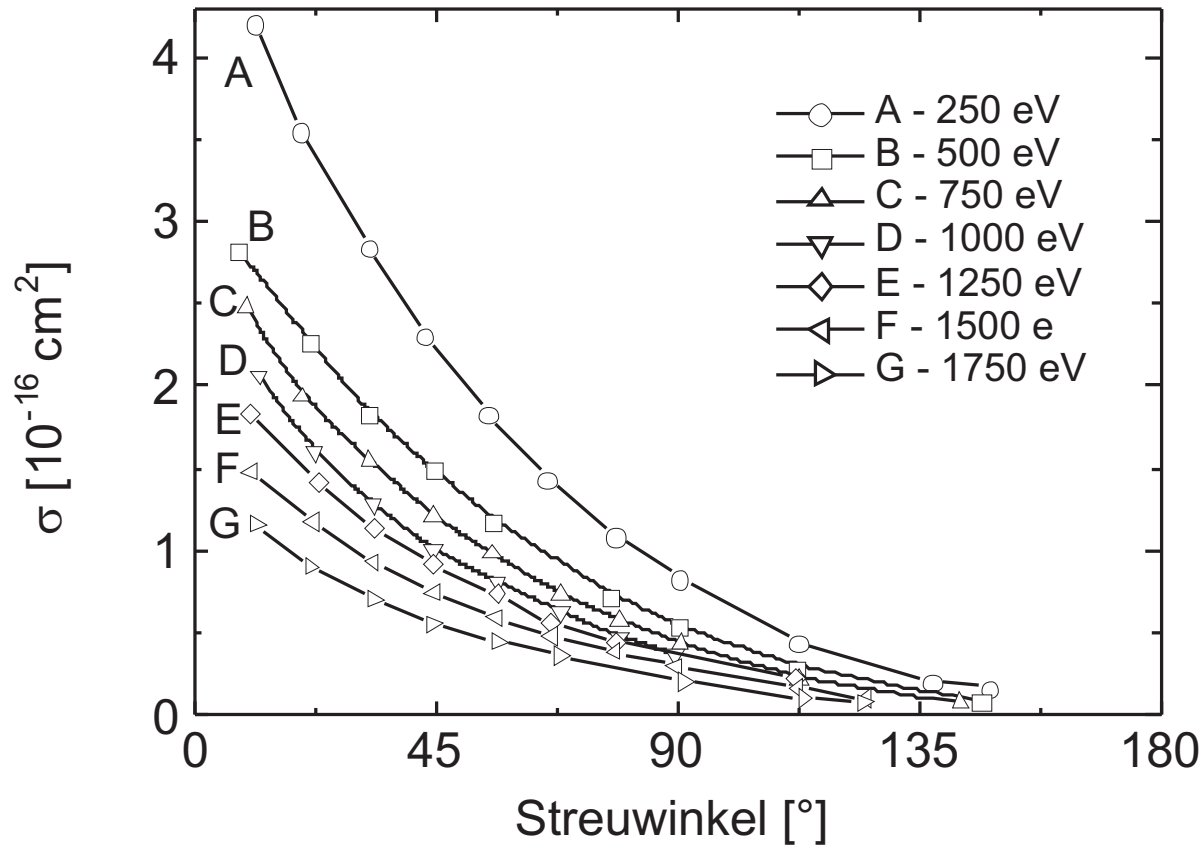
Einheitsraumwinkel für Protonen der

Energie von 110 eV in Helium in

Einheiten von  $a_0^2$ .



# Elast. Streuung zw. schweren Teilchen I

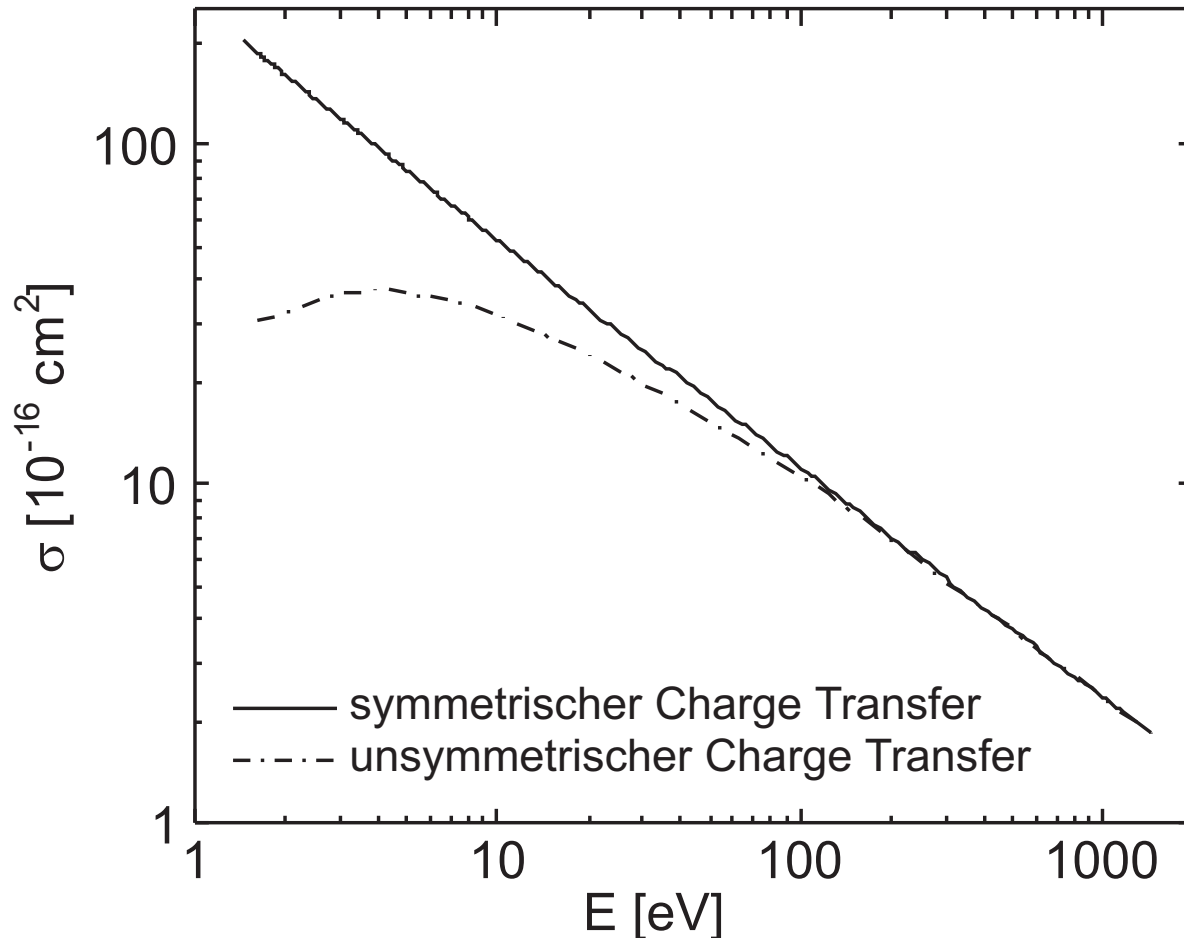


Streuquerschnitt von  $\text{Ar}^+$  in  $\text{Ar}$   
in Abhängigkeit des  
Streuwinkels nach BERRY.

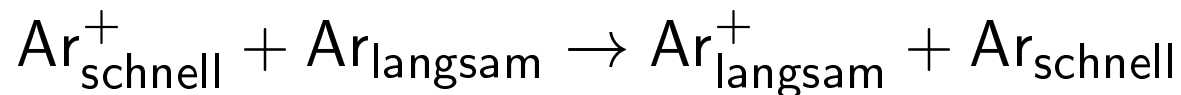




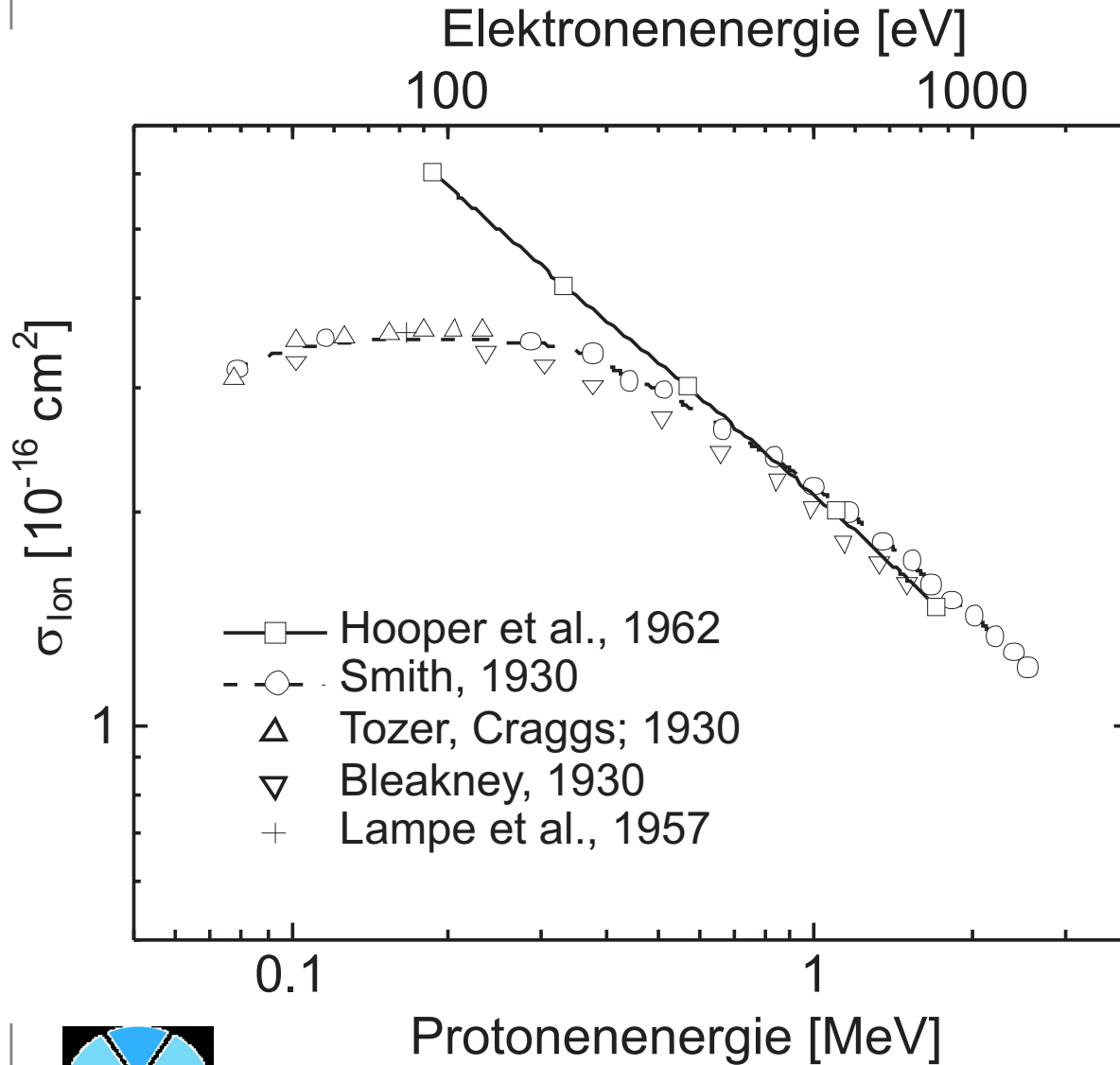
# Elast. Streuung zw. schweren Teilchen I



Vergleich des prinzipiellen Verlaufs von symmetrischem (resonantem) und asymmetrischem Charge-Transfer. In doppelt-logarithmischer Auftragung ist die Energieabhängigkeit des resonanten Charge-Transfers linear.



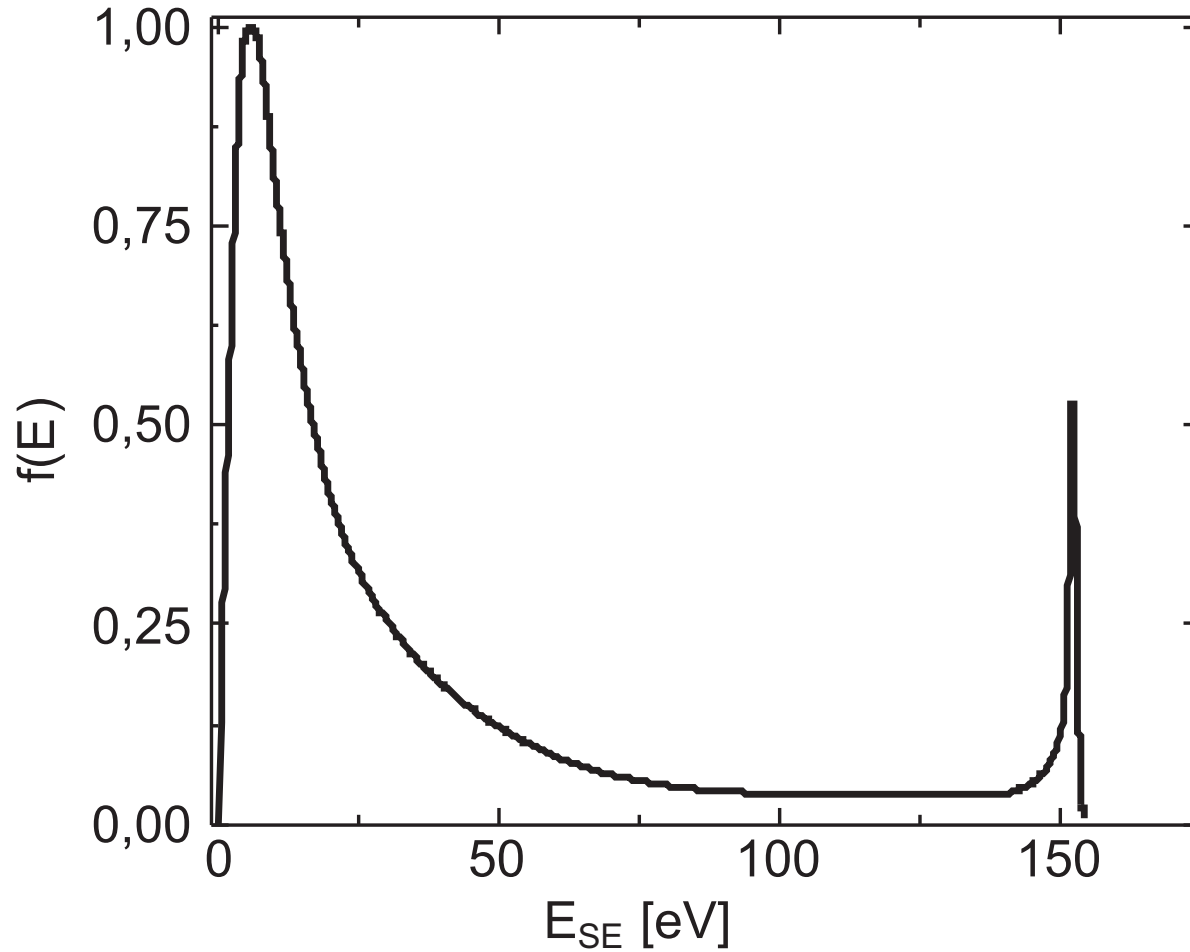
# Unelastische Streuung I



Vergleich der  
Ionisierungsquerschnitte von  
Argon für Protonen (strichliert)  
und Elektronen  
(durchgezogen) nach  
MCDANIEL.



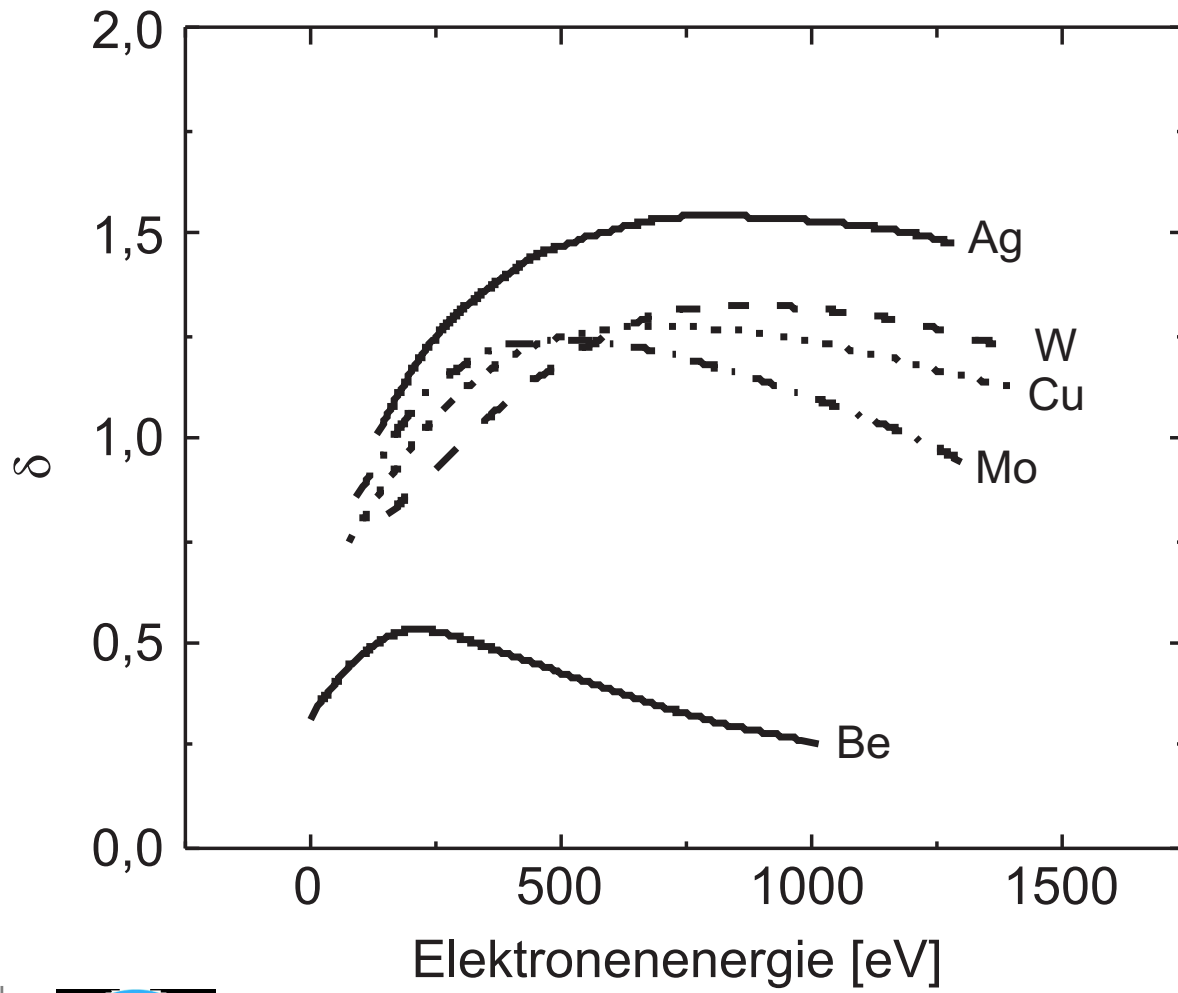
# Sekundärelektronen I



Energieverteilung der Sekundärelektronen,  $f(E)_{SE}$ , für 160 eV-Elektronen, die auf eine blanke Au-Oberfläche treffen (auf das Maximum normiert) nach v. ENGEL.



# Sekundärelektronen II

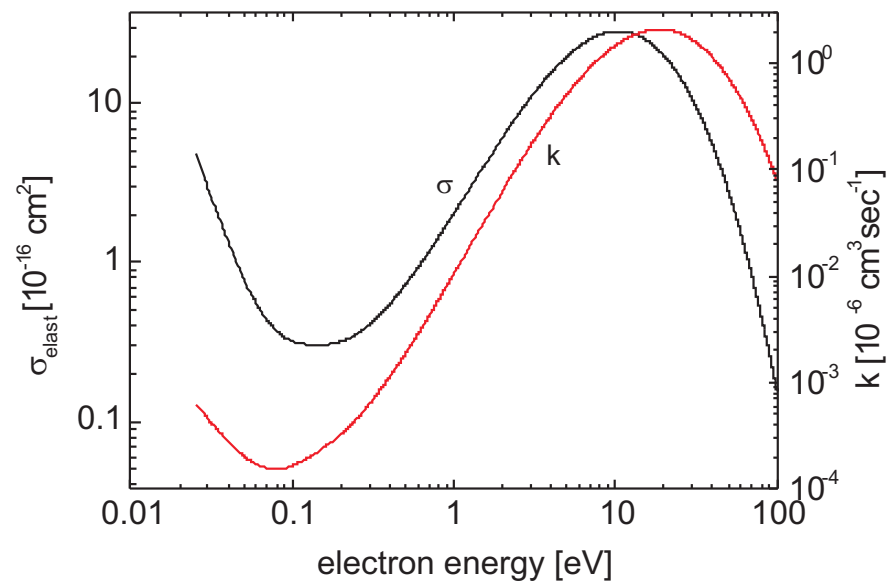
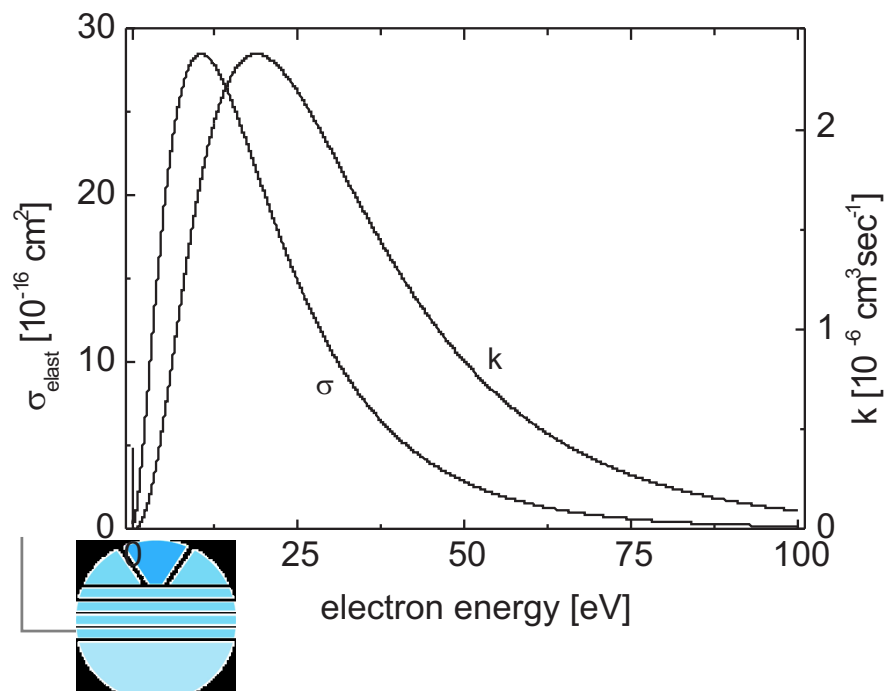


Koeffizienten der SE-Emission  $\delta$  verschiedener Metalle als Funktion der Energie der Primärelektronen.



# Gleichungen I

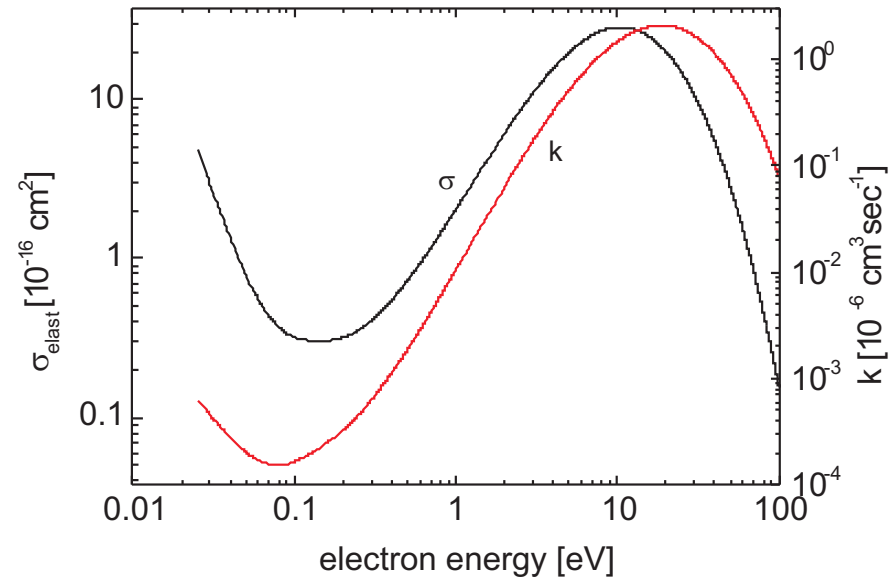
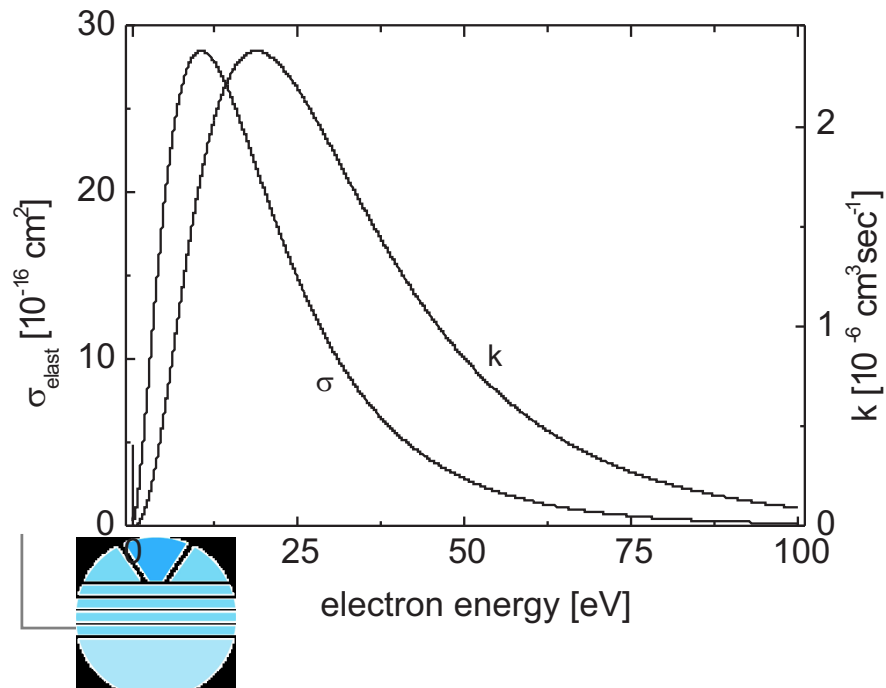
- Vollständiger Streuquerschnitt und Geschwindigkeitskonstante in Argon.



# Gleichungen I

- Vollständiger Streuquerschnitt und Geschwindigkeitskonstante in Argon.

- $$\nu_m = n_n \sigma \langle v_e \rangle$$

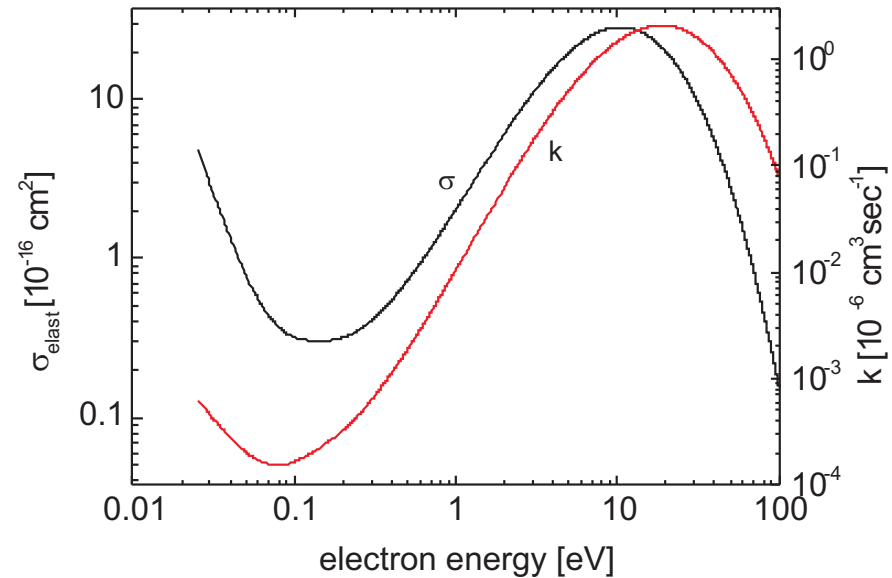
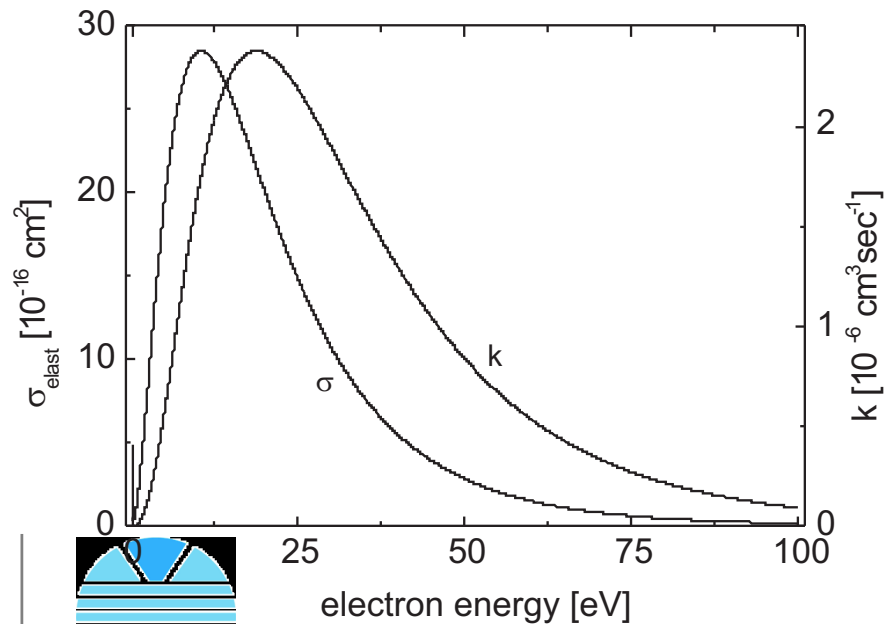


# Gleichungen I

- Vollständiger Streuquerschnitt und Geschwindigkeitskonstante in Argon.

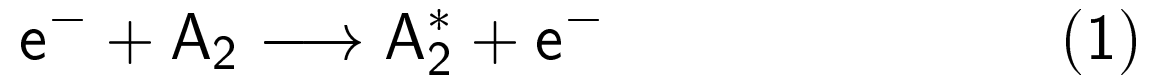
- $\nu_m = n_n \sigma \langle v_e \rangle$

- $k = \frac{\nu_m}{n_n} = \sigma \langle v_e \rangle$



# Gleichungen II

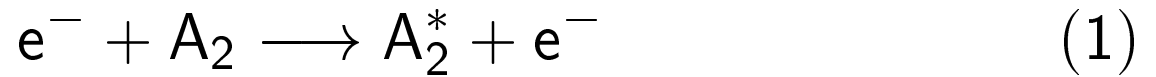
- Anregung in höhere Zustände (Schwingungsniveaus oder elektronische Zustände)



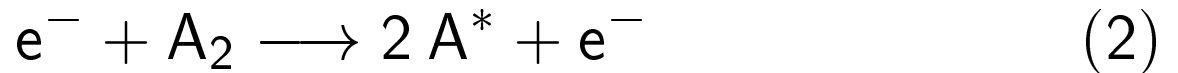


# Gleichungen II

- Anregung in höhere Zustände (Schwingungsniveaus oder elektronische Zustände)

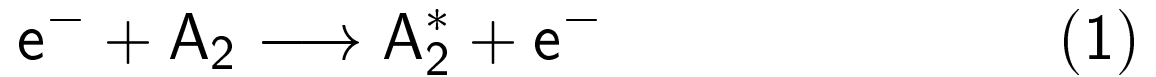


- Dissoziation in Radikale (homolytische Spaltung)

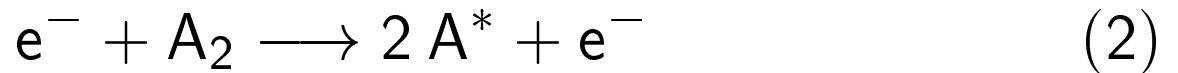


# Gleichungen II

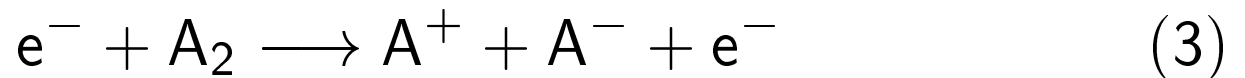
- Anregung in höhere Zustände (Schwingungsniveaus oder elektronische Zustände)



- Dissoziation in Radikale (homolytische Spaltung)

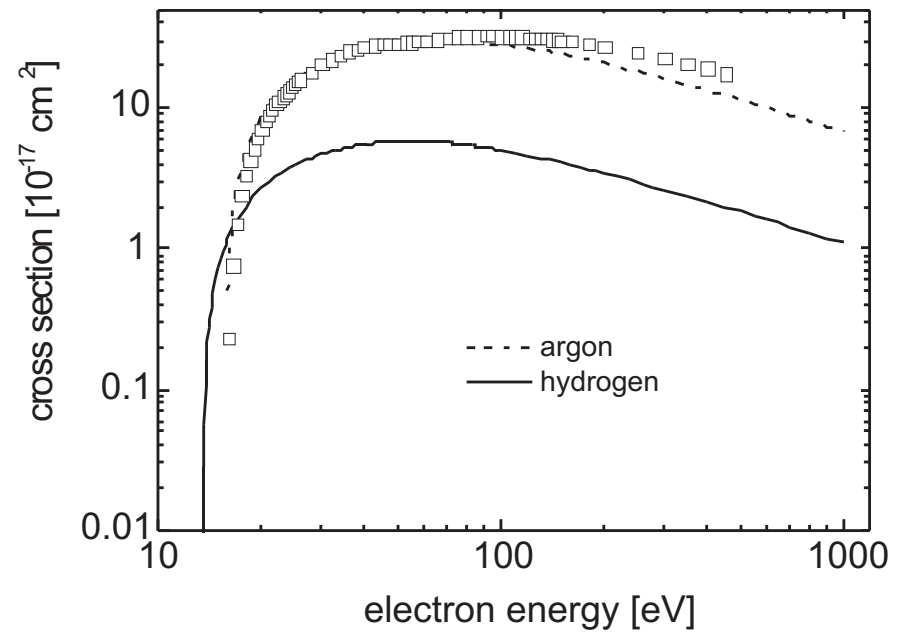
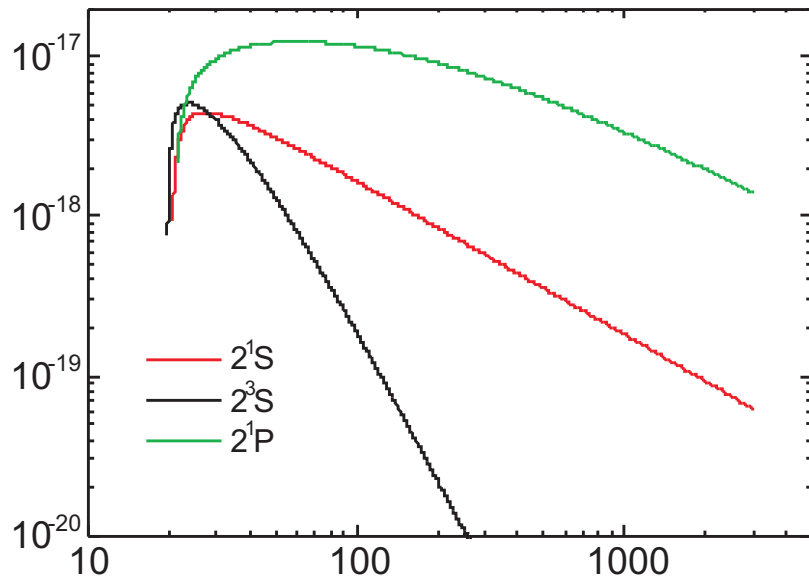


- Dissoziation in Ionen (heterolytische Spaltung)



# Gleichungen III

● Mituyreva + Lotz



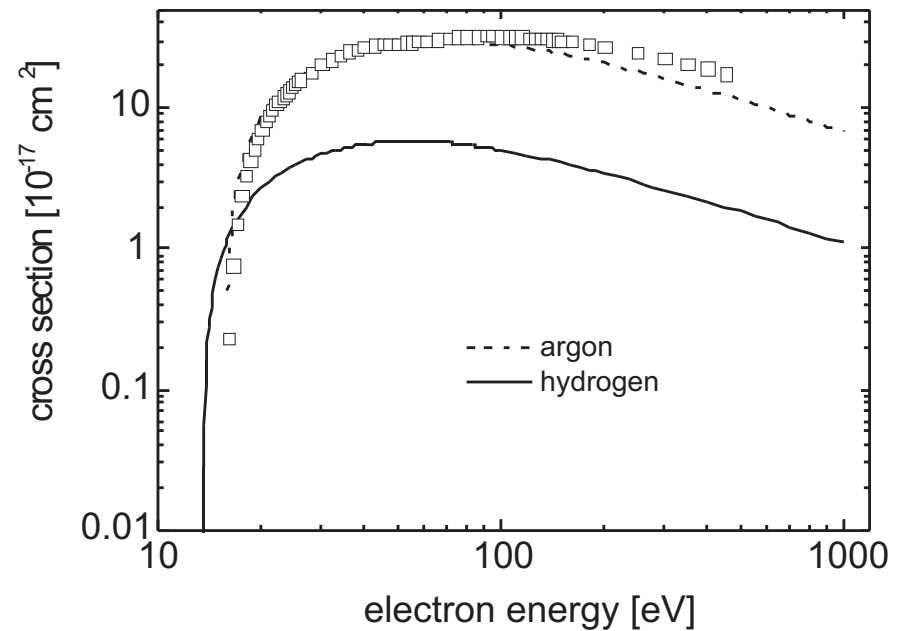
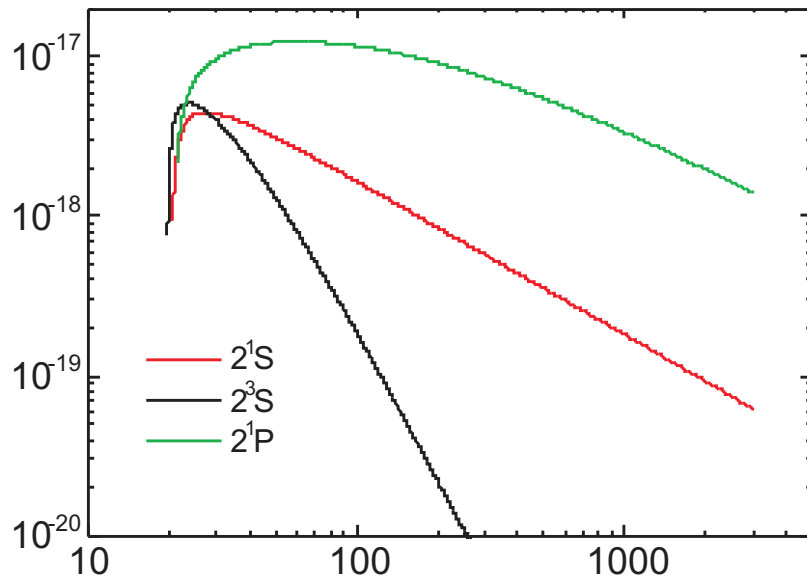
Electronic Kinetic Energy [eV]



# Gleichungen III

● Mituyreva + Lotz

$$\sigma_n = \sigma_0 \sqrt{\frac{T - E_n}{T}} \left( \frac{T}{E_n} - 1 + \phi \right)^{-\gamma}.$$



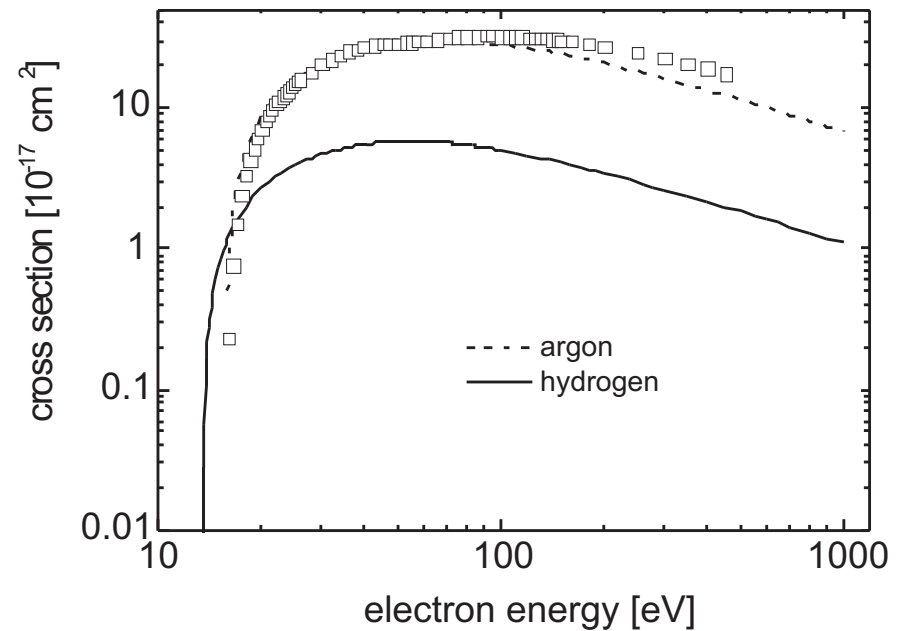
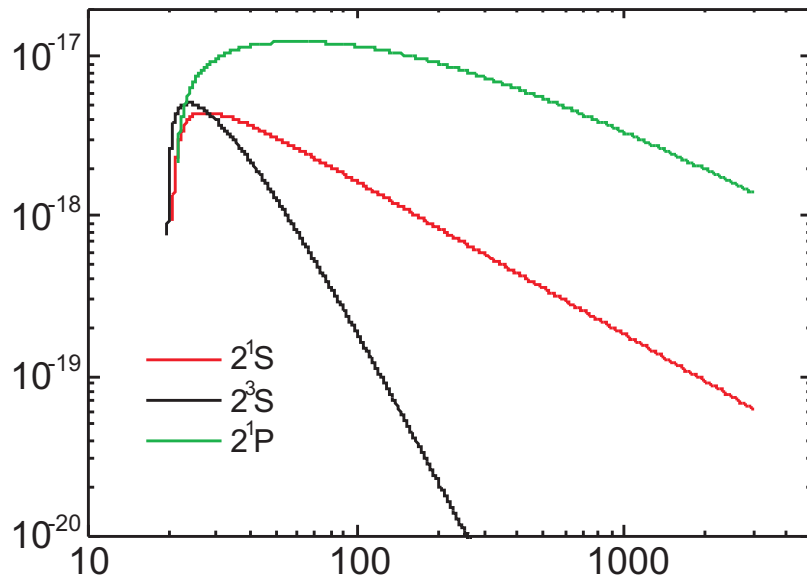
Electronic Kinetic Energy [eV]

# Gleichungen III

- Mituyreva + Lotz

- $$\sigma_n = \sigma_0 \sqrt{\frac{T - E_n}{T}} \left( \frac{T}{E_n} - 1 + \phi \right)^{-\gamma}.$$

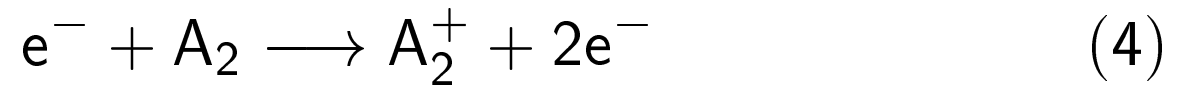
- $$\sigma_n = a \frac{\ln(T/E_n)}{T} \left\{ 1 - b \exp \left[ -c \left( \frac{T}{E_n} - 1 \right) \right] \right\}.$$



Electronic Kinetic Energy [eV]

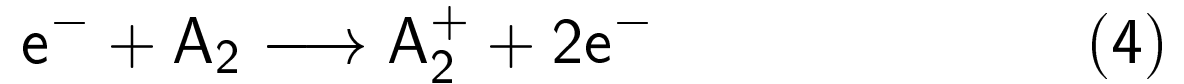
# Gleichungen IV

●  $\alpha$ -Ionisation



# Gleichungen IV

- $\alpha$ -Ionisation

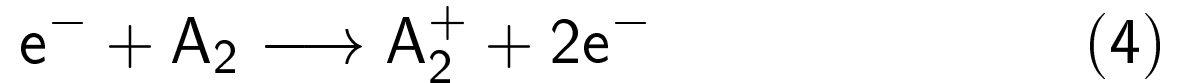


- ionisierende Dissoziation



# Gleichungen IV

- $\alpha$ -Ionisation



- ionisierende Dissoziation



- Elektron-Attachment (dissoziative Elektronenanlagerung):





# Zusammenfassung I

- Wir unterscheiden zwischen elastischem und unelastischem Streuquerschnitt.



# Zusammenfassung I

- Wir unterscheiden zwischen elastischem und unelastischem Streuquerschnitt.
- Beim elastischen Stoß wird nur Impuls (kinet. Energie) ausgetauscht, der zur Thermalisierung führt, beim unelastischen dagegen findet auch ein Transfer von potentieller Energie statt.



# Zusammenfassung I

- Wir unterscheiden zwischen elastischem und unelastischem Streuquerschnitt.
- Beim elastischen Stoß wird nur Impuls (kinet. Energie) ausgetauscht, der zur Thermalisierung führt, beim unelastischen dagegen findet auch ein Transfer von potentieller Energie statt.
- Sehr gebräuchlich ist die Einheit der Fläche ( $\text{\AA}^2$  oder  $\text{m}^2$ ). Man kann den unelastischen Streuquerschnitt aber auch als Quotienten aus erfolgreichen zu allen erfolgten Stößen betrachten. Die Effizienz der elastischen Prozesse ist typisch 2 Größenordnungen höher.



# Zusammenfassung II

- Die Stöße zwischen Elektronen und Neutralteilchen werden als  $\alpha$ -Prozesse, die zwischen schweren Teilchen als  $\beta$ -Prozesse bezeichnet. Die  $\alpha$ -Prozesse sind wesentlich effektiver als die  $\beta$ -Prozesse.  $\lambda_{\text{deBroglie}}$  eines Elektrons bei 100 eV ist etwa 1,2 Å (Atomdurchmesser).



# Zusammenfassung II

- Die Stöße zwischen Elektronen und Neutralteilchen werden als  $\alpha$ -Prozesse, die zwischen schweren Teilchen als  $\beta$ -Prozesse bezeichnet. Die  $\alpha$ -Prozesse sind wesentlich effektiver als die  $\beta$ -Prozesse.  $\lambda_{\text{deBroglie}}$  eines Elektrons bei 100 eV ist etwa 1,2 Å (Atomdurchmesser).
- Die wichtigste Gleichung ist die für die Stoßfrequenz (**m** steht für Momentum Transfer, **ion** für Ionisation:

$$\nu_{\text{m,ion}} = k \langle E \rangle \sigma.$$



# Zusammenfassung III

- Der elastische Streuquerschnitt hat sein Maximum bei sehr kleinen kinetischen Energien, der unelastische Streuquerschnitt hat dagegen einen „Threshold“, steigt sehr steil zum Maximum, das meist bei der DE BROGLIE-Wellenlänge des Targets liegt und fällt langsam ab. Dennoch liegt das Maximum bei deutlich höheren Energien als der „Threshold“.



# Zusammenfassung III

- Der elastische Streuquerschnitt hat sein Maximum bei sehr kleinen kinetischen Energien, der unelastische Streuquerschnitt hat dagegen einen „Threshold“, steigt sehr steil zum Maximum, das meist bei der DE BROGLIE-Wellenlänge des Targets liegt und fällt langsam ab. Dennoch liegt das Maximum bei deutlich höheren Energien als der „Threshold“.
- Elektronen wie Ionen können beim Aufschlag auf Materie Sekundärelektronen auslösen (sog.  $\gamma$ -Prozesse). Diese Prozesse sind entscheidend für den Erhalt von DC-Entladungen, dagegen entbehrlich bei HF-Entladungen.

