

ELEKTRONENFLUG & BILDRÖHRE

Was hat Einstein mit dem Fernsehen zu tun?

Durch die Erkenntnisse der Relativitätstheorie empfangen wir heute im Fernsehen ein scharfes Bild. In einem Fernseher werden Elektronen mit über zwanzigtausend Volt beschleunigt. Laut Relativitätstheorie nimmt die Masse der Elektronen dabei messbar zu. Berücksichtigt man diese Massenzunahme nicht, so würden die Elektronen auf einem Bildschirm Abweichungen im Millimeterbereich zeigen. Die Folge: Alle Bilder wären verschwommen.

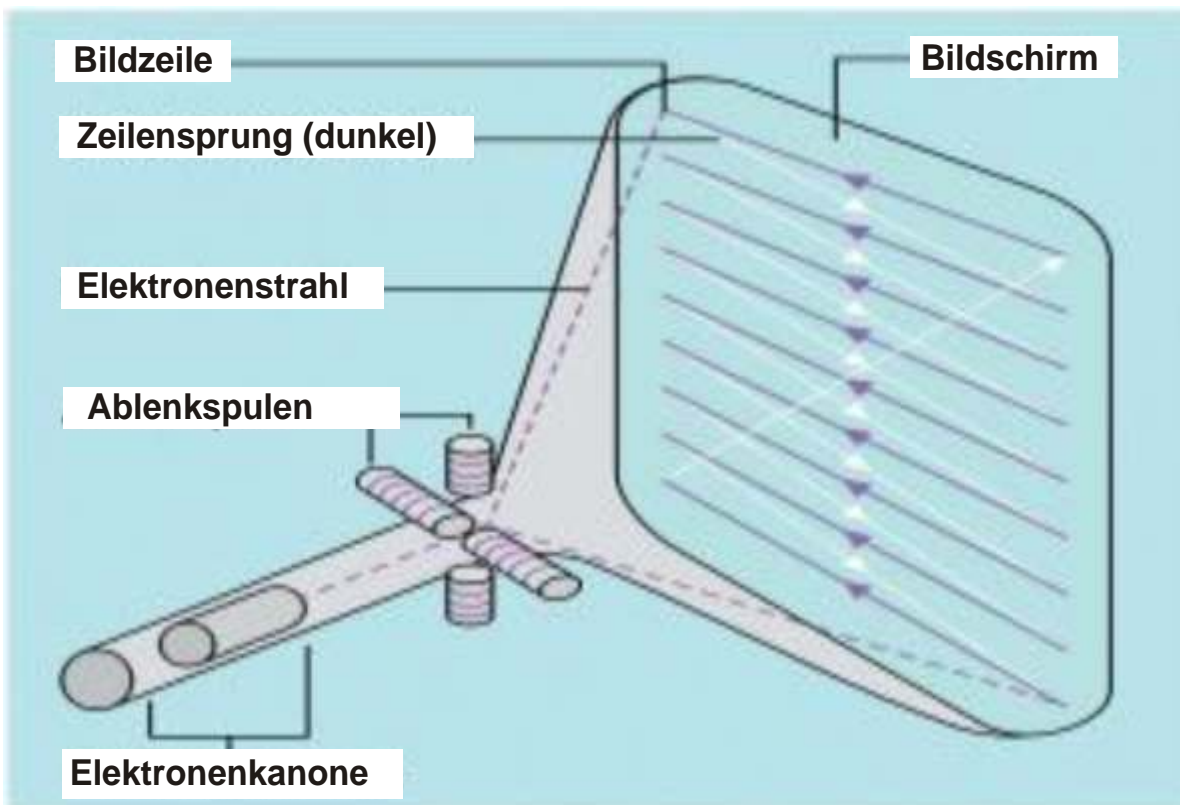
Wie schnell sind die Elektronen im Fernseher?

Je schwerer ein Elektron, desto stärker muss das Magnetfeld sein, um es abzulenken. Hier kommt die Relativitätstheorie ins Spiel. Sie sagt voraus: Je schneller sich ein Objekt bewegt, umso schwerer erscheint es einem außen stehenden Beobachter und damit auch den Ablenkfeldern. Um also die Magnetfelder zu erzeugen, welche die Elektronen an die richtige Stelle auf den Schirm lenken, müssen die Techniker mehr Saft anlegen, als man ohne Einsteins Entdeckung vermuten würde. Denn die auf ein Viertel der Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Elektronen sind, wie von der Relativitätstheorie vorausgesagt, deutlich schwerer als ruhende.

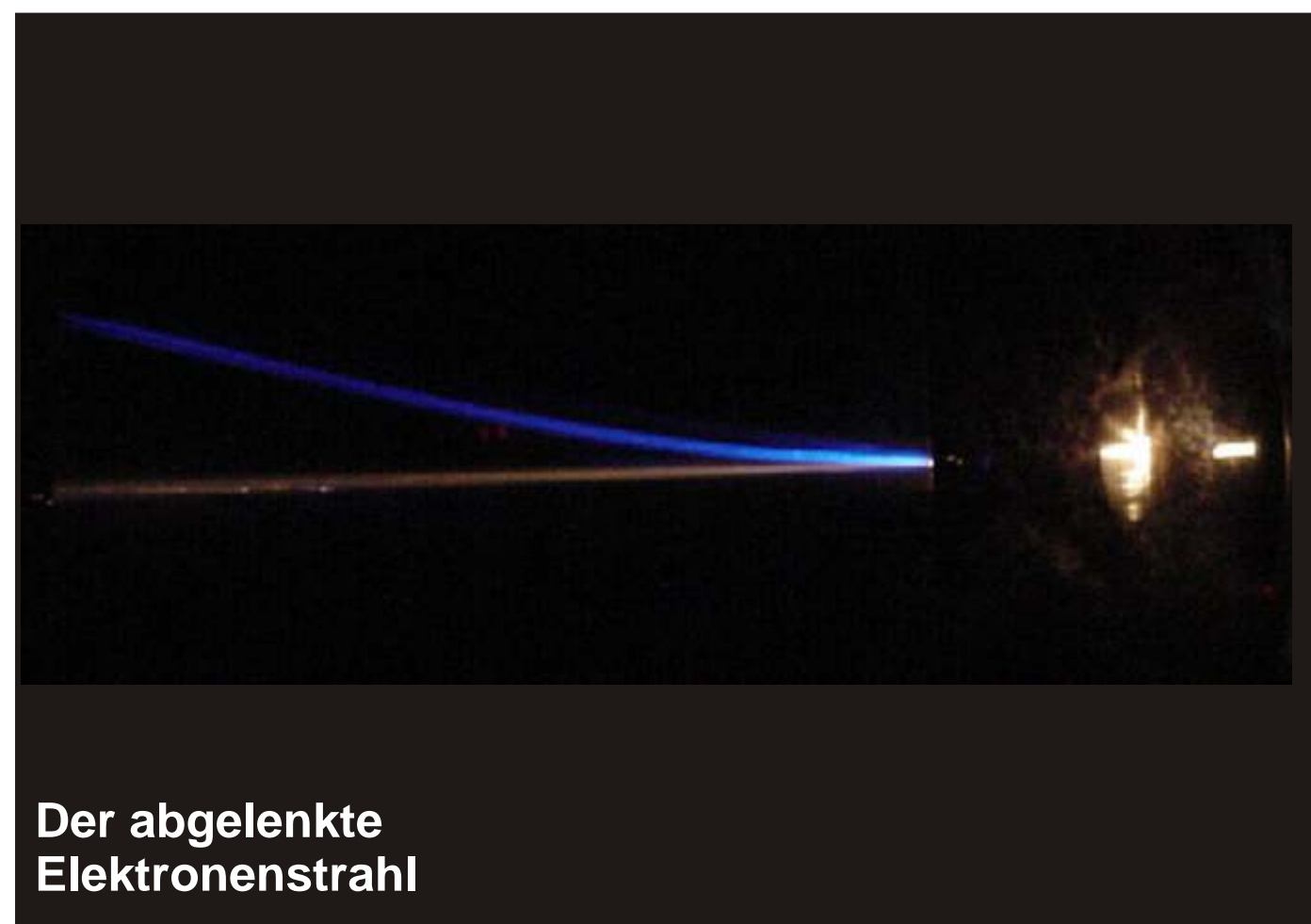
Was passiert, wenn die Elektronen nicht kontrolliert werden?

Haben Sie schon einmal einen Magneten neben ihren Fernseher gehalten? Tun Sie es nicht, das Gerät kann Schaden nehmen. Wer es dennoch versucht, wird ein eigenartig verzerrtes Bild sehen. Das Magnetfeld lenkt den Elektronenstrahl, der zeilenweise das Bild aufbaut, von seiner berechneten Bahn ab.

Einen ähnlichen Effekt würden wir beobachten, wenn wir die Folgen von Einsteins spezieller Relativitätstheorie abschalten könnten. Einen Schalter zum Ausknipsen von Naturgesetzen hat freilich noch niemand erfunden. Deshalb müssen die Fernsehkonstrukteure mit Einstein rechnen.



Was bringt das Fernsehbild zum Leuchten? Treffen die Elektronen dank Relativitätstheorie auf dem richtigen Punkt auf den Schirm, ist übrigens wieder Einstein im Spiel. Die ankommenden Elektronen heben nämlich die Elektronen in den Atomen der fluoreszierenden Schicht auf ein höheres Energieniveau. „springen“ diese Elektronen wieder auf ihr Ausgangsniveau zurück, geben sie die Energie in Form von Lichtquanten wieder ab. Ein Effekt, der sich nur mit der von Einstein mitentwickelten Quantentheorie verstehen lässt.



Und dazu die Theorie...

Mechanik-Gesetze – auch für Elektronen?

Hinter der Anodenöffnung einer braunschen Röhre fliegen Elektronen geradlinig weiter. Sie folgen dem Trägheitssatz, wenn sie kräftefrei sind. In einem homogenen elektrischen Querfeld durchlaufen sie eine Parabelbahn wie ein Wasserstrahl im homogenen Schwerfeld. Zwischen Kathode und Anode einer Elektronenröhre liegt die Spannung U . Die Feldkräfte verrichten auf dieser Beschleunigungsstrecke in jedem Elektron die Arbeit $W=eU$ (auch im inhomogenen Feld). Im Vakuum der Röhre erhält das Elektron die kinetische Energie $W=\frac{1}{2}mv^2$. Für seine Geschwindigkeit v an der Anode gilt also:

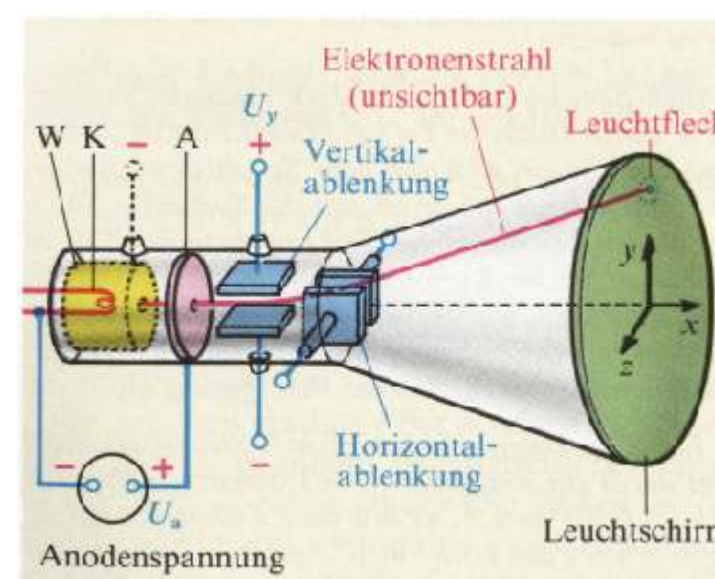
$$\frac{1}{2}mv^2 = eU$$

Wann Parabel-, wann Kreisbahn?

Warum durchfliegen die Elektronen im homogenen elektrischen Querfeld eine Parabelbahn? Um ihre Bahnkurve zu berechnen, eliminiert man die Zeit t aus $y=\frac{1}{2}a_y t^2$ und $x=v_x t$. Dies gibt die von t freie Parabelgleichung:

$$y = \frac{1}{2} a_y \frac{x^2}{v_x^2} \sim x^2$$

in der v_x und a_y konstant sind. Die Feldkraft F_y hat eine Komponente parallel zur Parabelbahn, macht also das Elektron schneller. Da es aber der positiven Platte näher gekommen ist, wird es beim Weiterflug im sich anschließenden inhomogenen Feld wieder langsamer. In homogenen magnetischen Querfeldern dagegen steht die Lorentzkraft F_L in jedem Bahnpunkt senkrecht zum jeweiligen \vec{v} -Vektor. F_L ändert zusammen mit \vec{B} längs der Bahn die Richtung und zeigt ständig zum Kreismittelpunkt hin. Deshalb verrichtet F_L keine Arbeit; das Elektron wird weder schneller noch langsamer; es beschreibt einen Kreis.

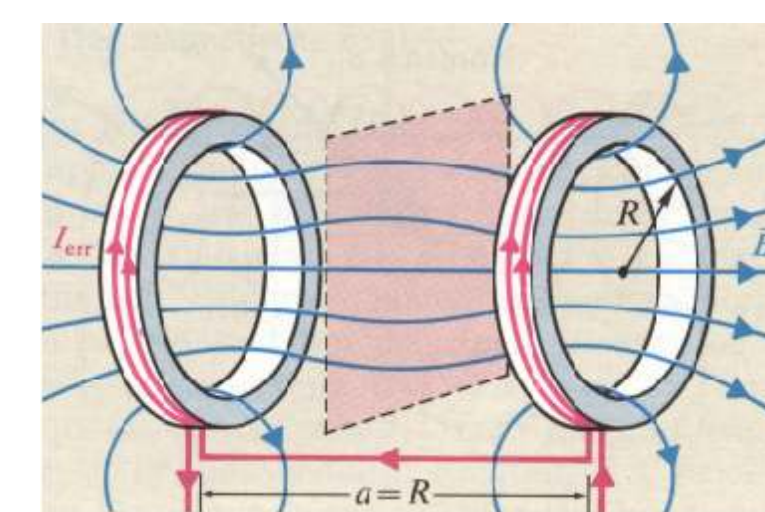
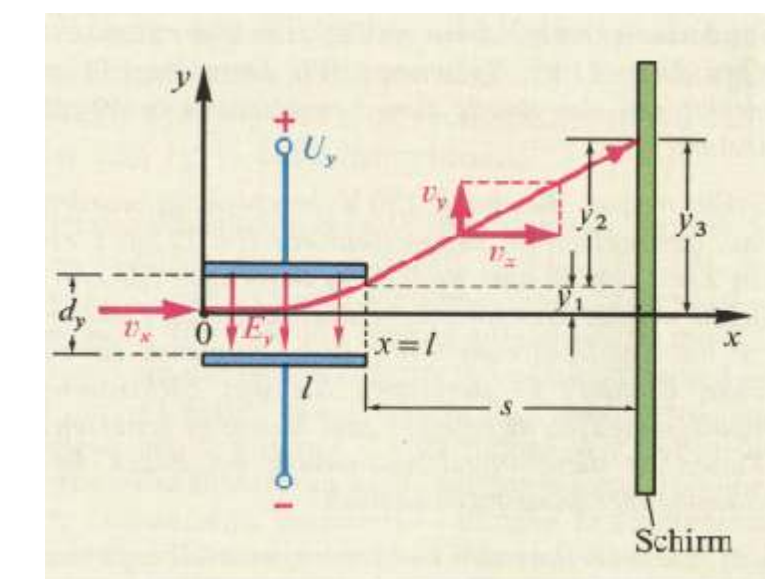


Elektronen schneller als Licht?

Mithilfe der spezifischen Ladung e/m und U können wir jetzt die Geschwindigkeit v ($v \approx c$) der Elektronen nach dem Durchlaufen der Beschleunigungsspannung U berechnen:

$$v = \sqrt{2Ue/m_e}$$

Ein Elektronenstrahl lässt sich ablenken...

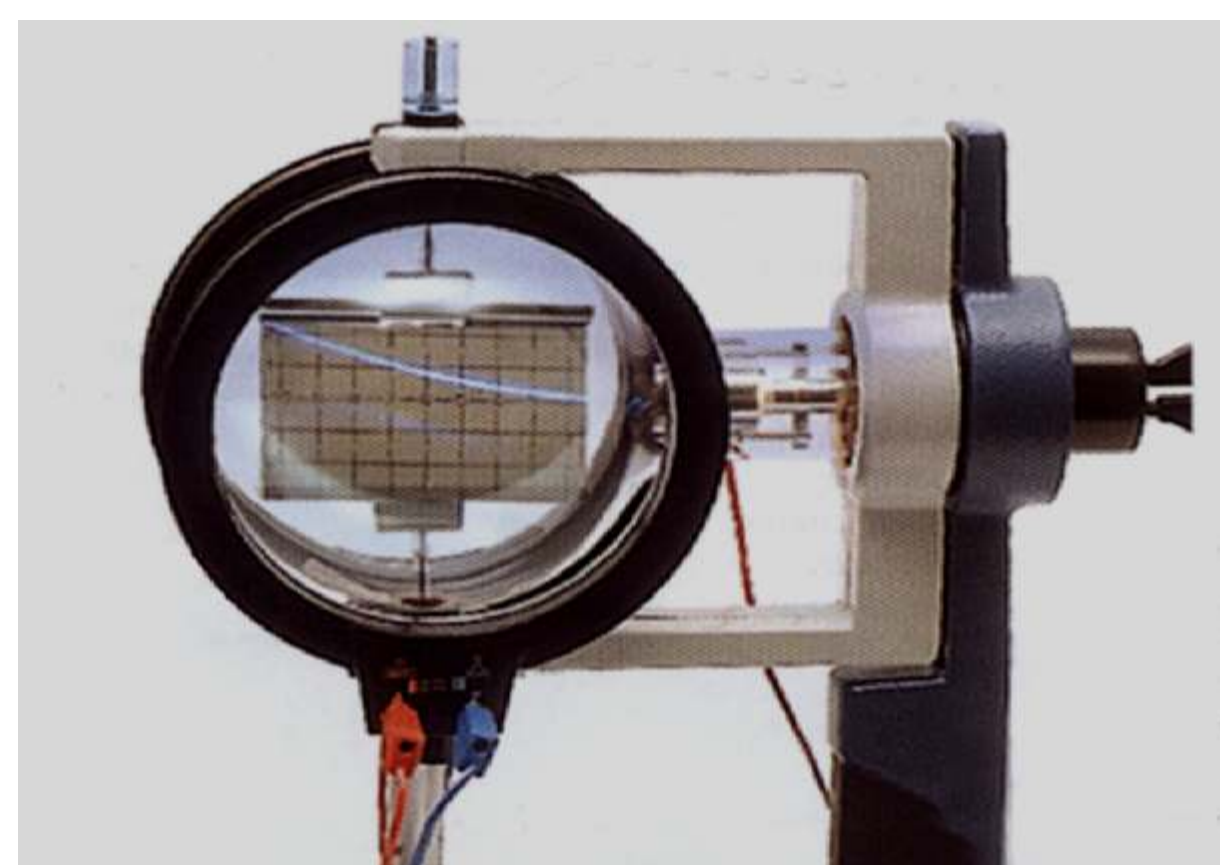
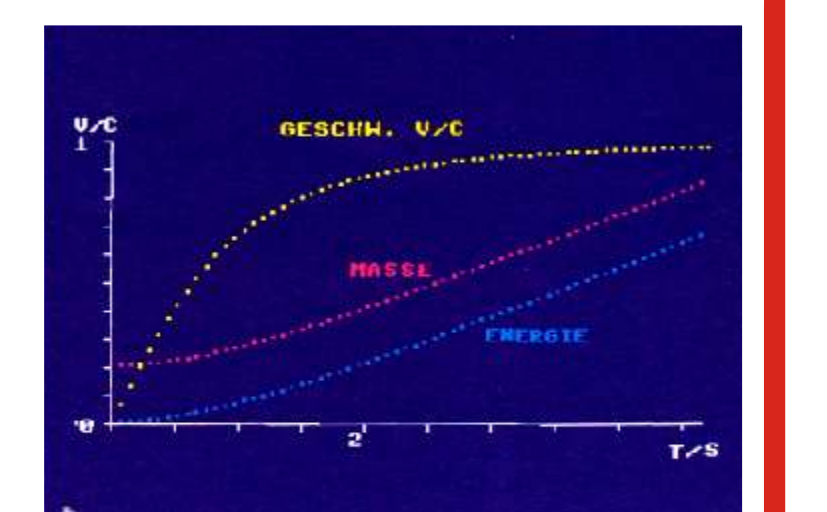


Ein Elektron mit dem Ladungsbetrag e bewege sich mit der Geschwindigkeitskomponente v_x senkrecht zu den Feldlinien eines Magnetfelds mit der Flussdichte B . Es erfährt die Lorentzkraft vom Betrage $F_L = e B v_x$. Die Lorentzkraft F_L steht sowohl zu \vec{v}_x als auch zu \vec{B} senkrecht. Sie verrichtet im Gegensatz zur elektrischen Feldkraft am Elektron keine Arbeit, sondern lenkt es nur senkrecht zu \vec{v}_x und zu \vec{B} ab.

Das Proton – ein Schwergewicht!

Für die Elektronenmasse $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg haben wir im täglichen Leben kein Vergleichsmaß. Wir müssen Vergleiche in atomaren Bereichen suchen, etwa beim Proton. Dieses kann man mit starken und ausgedehnten Magnetfeldern ebenfalls auf Kreisbahnen zwingen. Solche Felder stehen uns nicht zur Verfügung. Wir wissen aber, dass 1 mol H-Atome (also 1 g) $6,02 \cdot 10^{23}$ Elektronen und gleich viele Protonen enthält. Alle Elektronen zusammen haben die gegenüber 1 g winzige kleine Masse $M_e = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg = $5,5 \cdot 10^{-7}$ g. Die Protonenmasse ist also $m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Dies ist das 1840fache der Elektronenmasse. Die Masse der Atome sitzt also fast ganz im Kern. Die spezifische Ladung der Protonen beträgt $e/m_p = 9,58 \cdot 10^7$ C kg⁻¹. Damit haben wir wichtige Konstanten der atomaren Welt mithilfe mechanischer und elektrischer Gesetze in makroskopischen Versuchen gewonnen.

In der Beschleunigungskanone der Röhre durchfliegen die Elektronen die Spannung $U=200$ V, hatten also an der Anode die Energie $200 \text{ eV} = 320 \cdot 10^{-19}$ J. Für Heliumkern hat zwei Elementarladungen. Durchläuft er im Vakuum die Spannung 1 V, so erhält er die Energie 2 eV. Verfliegt er mit der Energie 4 MeV als Alpha-Teilchen einen Atomkern, so ist er so schnell, als ob er mit der Spannung 2 MV – und nicht mit 4 MV – aus der Ruhe beschleunigt worden wäre.



MUSEUM
AUTOVISION
DIE TECHNOLOGIE-ARENA

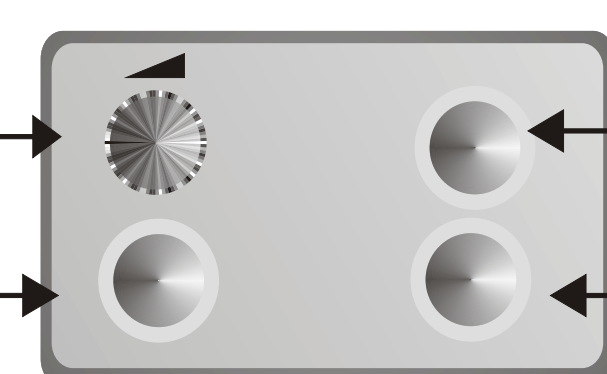
LEARNING
BY DOING

DER ELEKTRONENSTRAHL

DER FERNSEHER

Magnetfeld ändern (Stellrad)

Start Elektronenstrahl



Testbild MIT EINSTEIN

Testbild OHNE EINSTEIN

EINSTEIN
KOMPAKT

Das Museum AUTOVISION war mit der ersten interaktiven Sonderausstellung "Mythos Einstein" offizieller Partner von...



Eine gemeinsame Initiative von Bundesregierung, Wissenschaft, Wirtschaft und Kultur