

1. Einleitung

Wohl jede Schülerin und jeder Schüler hat sich schon einmal gefragt, wie das „Beamen“ funktioniert, das sie in der populären Fernsehserie „Raumschiff Enterprise“ beobachten konnten. Dabei werden Personen vom Raumschiff auf zu erforschende Planeten und wieder zurück übertragen, ohne daß sie die dazwischenliegende Strecke zurückgelegt hätten.

Die Faszination, die vom Prozeß des Beamens ausgeht, kann man sich für den Physikunterricht zunutze machen. In der vorliegenden Arbeit soll eine Unterrichtsstunde skizziert werden, in der die Physik des Beamens einmal gründlicher unter die Lupe genommen wird. Die „Rahmenhandlung“ ist dabei: Die Schülerinnen und Schüler arbeiten in Gruppen. Sie sollen sich vorstellen, sie seien Mitglieder im Konstruktionsteam des Raumschiffs Enterprise. Sie wirken am Entwurf des Materie-Transporters mit, der das „Beamen“ von Objekten und Personen ermöglicht. Es werden vier „Konstruktionsteams“ gebildet, die sich – im Sinne einer „arbeitsteiligen Entwicklung“ – mit verschiedenen Aspekten des zu konstruierenden Transporters befassen.

Die Schülerinnen und Schüler müssen dabei auf ganz verschiedene Bereiche ihres bisher erworbenen Wissens zurückgreifen. Vertikale Vernetzung ergibt sich also ganz natürlich. Ebenso treten fächerübergreifende Verknüpfungen zur Biologie und sogar zu Philosophie, Ethik und Religion auf („Wenn man einen Menschen in Atome zerlegt und anderswo wieder zusammensetzt, was passiert dann mit der Seele?“).

In einigen Aspekten lehnen sich die behandelten Fragestellungen an das Buch „Die Physik von Star Trek“ [1] des renommierten Astrophysikers Lawrence M. Krauss an (in dem leider die Diskussion des Beamens nicht vollständig zu überzeugen vermag). Quantenmechanische Aspekte bleiben absichtlich ausgespart, damit die Stunde nicht nur in Klasse 13 unterrichtet werden kann. (Hinweis auf Teleportation)

2. Vier Konstruktionsteams

Eine grundlegende Entscheidung muß man zu Anfang fällen: Sollen beim Beamen die einzelnen Materiebausteine der betreffenden Person übertragen werden? Oder wird nur die im menschlichen Körper gespeicherte Information übertragen und der Körper am Zielort aus anderer Materie wieder aufgebaut? Krauss [1] bringt diese Frage auf die kurze Formel: „Atome oder Bits“? Im vorliegenden Unterrichtsentwurf untersuchen drei Teams die erste Alternative auf ihre mögliche Realisierbarkeit, ein Team die zweite. Die Autoren von „Star Trek“ haben sich übrigens für die Übertragung der Materie entschieden (vgl. [1], S. 82).

(a) Team 1: Entscheidung für die Ebene der Materie-Übertragung.

Hat man sich entschieden, beim Beamen die Materie zu übertragen, muß man sich überlegen, wie weit ein menschlicher Körper zu Übertragung „zerlegt“ werden soll. Damit beschäftigt sich die erste Gruppe. Ihre Aufgabe lautet: 1. Worin liegen die Vorteile, die Materie vor dem Transport zu zerlegen? Was sind die Nachteile, einen Menschen als Ganzes auf eine weit entfernte Planetenoberfläche zu „katapultieren“?

2. Welche Ebene der Zerlegung ist nach Ihrer Meinung am sinnvollsten? Sollte man einen Menschen in Organe, Zellen, Biomoleküle, Atome oder Kernbausteine zerlegen, um ihn zu beamen. Diskutieren Sie die physikalischen, biologischen und ethischen Probleme, die sich aus der jeweiligen Übertragungsform ergeben.

3. Wenn Sie eine Ebene als die geeignetste ausgewählt haben: Überlegen Sie sich einen physikalischen Mechanismus, der die Zerlegung auf möglichst schonende Weise erlaubt.

Die einfachste Vorgehensweise wäre sicherlich, den Körper als Ganzes zu übertragen. In der Fernsehserie wurde diese unspektakuläre Alternative allerdings nicht gewählt. Ein möglicher Grund dafür ist, daß für die Übertragung nur eine sehr kurze Zeitspanne zur Verfügung steht. Das bedeutet, daß sehr große Beschleunigungen auftreten, die ein menschlicher Körper nicht überstehen würde.

Die sinnvollste Ebene der Übertragung wird in der zweiten Aufgabe diskutiert. Während für die Übertragung von Organen sicherlich das gleiche Problem wie für den gesamten Körper existiert und Zellen vermutlich ebenfalls zu empfindlich sind, erscheint die Übertragung von Atomen oder Molekülen am sinnvollsten. Die Materie in noch kleinere Bausteine zu zerlegen ist zu energieaufwendig. Einen Mechanismus, um den menschlichen Körper schonend in Atome oder Moleküle zu zerlegen, gibt es beim derzeitigen Stand der Technik nicht. Sicherlich kommen nur elektromagnetische Wechselwirkungen in Frage, mit Energien, die im eV-Bereich liegen, damit die Bausteine nicht zerstört werden. Wenn man seine Phantasie spielen läßt, kommen einem die Manipulation einzelner Atome mit Kraftmikroskopen oder mit Lasern als mögliche Mechanismen in den Sinn

Ein großes Problem bei der Übertragung von Materiebausteinen wird weder in der Fernsehserie noch in der Literatur angesprochen: Wie wird die übertragene Materie wieder zusammengesetzt? Bei der Erforschung unbekannter Planeten können sich naturgemäß am Zielort keine Empfangseinrichtungen befinden. Das Zusammen-

setzen muß also vom Raumschiff aus gesteuert werden. Im Fall der Übertragung von Atomen ist die einzig plausible Möglichkeit, den Körper mit einem präzise gelenkten Strahl „abzurastern“ und Atom für Atom aufzubauen. Im Abschätzen der dazu nötigen Zielgenauigkeit (von Störungen durch die Planetenatmosphäre nicht zu reden) böte sich eine dankbare Aufgabe für eine weitere Gruppe.

(b) Team 2: Abschätzung des Zeitbedarfs beim Übertragen von Atomen

Während die erste Gruppe mit rein qualitativen Überlegungen beschäftigt ist, sind die Aufgaben der restlichen Gruppen mehr quantitativer Natur (worauf man bei der Gruppeneinteilung Rücksicht nehmen kann). Die zweite Gruppe schätzt den Zeitbedarf ab, den man aufgrund fundamentaler physikalischer Beschränkungen mindestens benötigt, um alle Atome des menschlichen Körpers nacheinander zu übertragen.

1. Die durchschnittliche Masse eines Atoms im menschlichen Körper beträgt etwa 10^{-26} kg. Schätzen Sie ab, aus wie vielen Atomen ein Mensch besteht.

Antwort: Bei einer Masse von 50 kg ergeben sich etwa $N = 5 \cdot 10^{27}$ Atome.

2. Die Atome sollen nacheinander übertragen werden. Ihr räumlicher Abstand kann dabei den Atomdurchmesser $d \approx 10^{-9}$ m nicht unterschreiten. Gleichzeitig kann ihre Geschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) nicht übersteigen. Berechnen Sie, in welchem zeitlichen Abstand zwei Atome höchstens gesendet werden können.

Antwort: Der zeitliche Abstand ist $\Delta t = d/c = 3 \cdot 10^{-18}$ s

3. Wenn die Atome mit diesem kleinstmöglichen Zeitabstand gesendet werden: Wie lange dauert die Übertragung aller Atome der zu transportierenden Person?

Antwort: Die Gesamtzeit ist $T = N \cdot \Delta t \approx 10^{10}$ s \approx 530 Jahre

4. Suchen Sie nach Möglichkeiten, wie man die Transportzeit verkürzen könnte.

Antwort: Natürlich könnte man mehrere Atome parallel versenden. Aber um auf Übertragungszeiten in der Größenordnung von Sekunden zu erhalten, müßte man 10^{10} Atome in geordneter Weise simultan übertragen.

5. Atomphysikalische Experimente finden üblicherweise im Vakuum statt. Warum? Welche Probleme könnte die Planetenatmosphäre für den Übertragungsvorgang darstellen?

Antwort: Hier liegt das größte Problem bei der Übertragung von einzelnen Atomen. Ein Strahl aus einzelnen Atomen wird von der Atmosphäre praktisch sofort absorbiert (d. h. die Atome werden durch Stöße gestreut). Hier kann nur eine Übertragung im Vakuum Abhilfe schaffen. (Ist dafür der „ringförmige Sperrstrahl“ zuständig, der im „Next Generation Technical Manual“ erwähnt wird?)

(c) Team 3: Energiebedarf beim Übertragen von Atomen

Das dritte Team hat die Aufgabe, den Energiebedarf des Transporters abzuschätzen. Wieviel Energie braucht man zur Übertragung der einzelnen Atome, in die ein Besatzungsmitglied zerlegt worden ist, zu einer 1000 km entfernten Planetenoberfläche?

1. Atome lassen sich effektiv mit Lasern beschleunigen. Heutzutage erreicht man Beschleunigungen von 10^6 g ($g = 10$ m/s²). Wie lange ist ein Atom bis zur Planetenoberfläche unterwegs, wenn es mit dieser Beschleunigung gleichmäßig beschleunigt wird (Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$)?

Antwort: Nach $s = \frac{1}{2} a t^2$ ergibt sich $t = 0,45$ s. Dies ist in Übereinstimmung mit den kurzen Zeiten, die das Beamen in der Fernsehserie benötigt.

2. Welche Endgeschwindigkeit v erreicht das Atom?

Antwort: $v = a t = 4500$ km/s. Das Atom muß also erheblich abgebremst werden.

3. Wenn die gesamte Masse eines Menschen von $v_0 = 0$ auf die Geschwindigkeit v beschleunigt wird: Wieviel Energie wird dazu benötigt?

Antwort: Bei $m = 50$ kg ist $W = \frac{1}{2} m v^2 = 5 \cdot 10^{14}$ J.

4. Der Beamvorgang sollte nicht länger als eine Minute dauern. Welche Leistung wird während dieser Zeit zur Beschleunigung der Materie benötigt? Nehmen Sie an, daß 1% der dem Laser zugeführten Leistung zum Beschleunigen verwendet wird. Welche Leistung müßt man ihm während des Beamvorgangs zuführen? Vergleichen Sie mit der Leistung von 10^9 W, die ein großes Kernkraftwerk liefert.

Antwort: Die zur Beschleunigung aufzuwendende Leistung ist $P_0 = 8 \cdot 10^{12}$ W. Bei einem Wirkungsgrad von 1% entspricht das einer Ausgangsleistung von etwa 10^{15} W. Über den Zeitraum von einer Minute würde man also die Leistung von einer Million Kernkraftwerken benötigen.

6. Bei der gegenseitigen Vernichtung von Materie und Antimaterie wird Energie gemäß $W = m c^2$ freigesetzt (m = Gesamtmasse von Materie und Antimaterie). Welche Masse müßte vernichtet werden, damit die zum Beamen benötigte Energie freigesetzt wird?

Antwort: Um die Energie von $5 \cdot 10^{16}$ J (wieder 1% Wirkungsgrad angenommen) zu erbringen, müßten 0,5 kg Materie und Antimaterie vernichtet werden. Die unglaublich große Energiemenge, die bei der Materie-Antimaterie-Vernichtung freigesetzt wird, holt das Beamen aus dem Bereich des völlig Utopischen zurück.

(d) Team 4: Beamen durch Informationsübertragung

Die letzte Gruppe beschäftigt sich mit der Alternative, beim Beamen nur die in einem menschlichen Körper steckende Information zu übertragen. Ein einfaches Verfahren dazu ist das folgende: Der Körper wird in ein Gitter von „Würfeln“ unterteilt, die Atomgröße besitzen (Bild 1). Für jeden Gitterplatz wird der Reihe nach ermittelt, mit welcher Atomsorte er besetzt ist (z. B. Wasserstoff, Sauerstoff, Calcium, Gitterplatz ist leer). Diese Information wird gesendet.

1. Nehmen Sie an, pro Gitterplatz werden 5 Bit an Information gesendet. Wie viele Atomsorten kann man in diesen 5 Bit codieren?

Antwort: 2^5 Möglichkeiten, also 32 Atomsorten.

2. Wie viele „Würfel“ (Kantenlänge 10^{-9} m) braucht man, um einen Bereich von der Größe des menschlichen Körpers (also ca. $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$) zu erfassen? Wie viele Bits müssen also insgesamt gesendet werden?

Antwort: In einer Richtung passen 10^9 Gitterplätze auf einen Meter. Insgesamt muß demnach die Information von $2 \cdot (10^9)^3 = 2 \cdot 10^{27}$ Gitterplätzen gesendet werden, also $5 \cdot 2 \cdot 10^{27}$ Bit = 10^{28} Bit.

3. Ein Bit soll durch einzelne Lichtpulse übertragen werden (Bild 2). Der zeitliche Abstand der Pulse soll $2 \cdot 10^{15}$ s (Frequenz von sichtbarem Licht) betragen. Berechnen Sie, wie lange die gesamte Informationsübertragung dauert.

Antwort: $T = (\text{Zahl der zu übertragenden Bits}) \cdot (\text{Zeitabstand zwischen zwei Bits}) = 10^{28} \cdot 2 \cdot 10^{15} = 2 \cdot 10^{43} \text{ s} = 630\,000 \text{ Jahre}$.

4. Warum kann man nicht zu wesentlich höheren Frequenzen übergehen? Kennen Sie Beispiele für elektromagnetische Strahlung sehr hoher Frequenz? Welche Eigenschaften hat sie?

Antwort: Um den Beamvorgang in einer Minute abzuschließen, müßten die Pulse einen Zeitabstand von $6 \cdot 10^{-27}$ s besitzen, entsprechend einer Energie im Bereich von 10^{11} eV. Es ist nicht klar, wie Strahlung dieser Energie erzeugt und kontrolliert moduliert werden könnte.

Neben diesen Problemen ist bei dieser Methode völlig unklar, wie aus der Information auf der Planetenoberfläche wieder ein menschlicher Körper wird. Während bei der Übertragung von Materie eine Steuerung des Zusammensetzens vom Raumschiff aus denkbar scheint, ist dies bei der Übertragung von Information allein völlig unplausibel. Mindestens braucht auf dem Planeten man eine Vorrichtung, die die Information empfängt und das Zusammensetzen zu einem Körper steuert. Damit steht man aber wieder vor der Ausgangsfrage: Wie gelangt diese Apparatur auf den Planeten. Wohl aus diesem Grund haben sich die Drehbuchautoren der Serie für die andere Alternative zur Übertragung entschieden.

Zusammen genommen zeigen die Ergebnisse der einzelnen Gruppen, auf welche enormen Schwierigkeiten die Konstruktion eines Materie-Transporters stößt. Dabei muß betont werden, daß es sich bei den meisten der hier diskutierten Probleme nicht um rein technische Probleme handelt, die in Zukunft überwunden werden könnten, sondern um Hindernisse, die die Gesetze der Physik dem Beamen in den Weg legen. Den Schülerinnen und Schülern wird so die räumliche und zeitliche Universalität der Gültigkeit der physikalischen Gesetze nahegebracht.

[1] L. M. Krauss, Die Physik von Star Trek, Heyne, München, 1996.

„Beamen“ durch Übertragung von Materie

Gruppe 1: Prinzip des Transporters

Stellen Sie sich vor, Sie seien Mitglieder im Konstruktionsteam des Raumschiffs *Enterprise*. Sie wirken am Entwurf des Materie-Transporters mit, der das „Beamen“ von Objekten und Personen ermöglicht. Die Projektleitung gibt vor: Das Beamen soll so erfolgen, daß die zu beamenden Objekte zuerst in ihre Bestandteile zerlegt und diese dann übertragen werden.

Die Aufgabe Ihrer Gruppe ist es, den Teil der Anlage zu entwerfen, der die „Zerlegung“ besorgt.

1. Worin liegen die Vorteile, die Materie vor dem Transport zu zerlegen? Was sind die Nachteile, einen Menschen als Ganzes auf eine weit entfernte Planetenoberfläche zu „kaptapultieren“?
2. Welche Ebene der Zerlegung ist nach Ihrer Meinung am sinnvollsten? Sollte man einen Menschen in Organe, Zellen, Biomoleküle, Atome oder Quarks zerlegen, um ihn zu beamen? Diskutieren Sie die physikalischen, biologischen und ethischen Probleme, die sich aus der jeweiligen Übertragungsform ergeben.
3. Wenn Sie eine Ebene als die geeignetste ausgewählt haben: Überlegen Sie sich einen physikalischen Mechanismus, der die Zerlegung auf möglichst schonende Weise erlaubt.

„Beamen“ durch Übertragung von Materie

Gruppe 2: Abschätzung des Zeitbedarfs

Stellen Sie sich vor, Sie seien Mitglieder im Konstruktionsteam des Raumschiffs *Enterprise*. Sie wirken am Entwurf des Materie-Transporters mit, der das „Beamen“ von Objekten und Personen ermöglicht.

Sie sollen abschätzen, wie viel Zeit benötigt wird, um alle Atome eines menschlichen Körpers einzeln zu übertragen.

1. Die durchschnittliche Masse eines Atoms im menschlichen Körper beträgt etwa 10^{-26} kg. Schätzen Sie ab, aus wie vielen Atomen ein Mensch besteht.
2. Die Atome sollen nacheinander übertragen werden. Ihr räumlicher Abstand kann dabei den Atomdurchmesser $d \approx 10^{-9}$ m nicht unterschreiten. Gleichzeitig kann ihre Geschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) nicht übersteigen. Berechnen Sie, in welchem zeitlichen Abstand zwei Atome höchstens gesendet werden können.
3. Wenn die Atome mit diesem kleinstmöglichen Zeitabstand gesendet werden: Wie lange dauert die Übertragung aller Atome der zu transportierenden Person?
4. Suchen Sie nach Möglichkeiten, wie man die Transportzeit verkürzen könnte.
5. Atomphysikalische Experimente finden üblicherweise im Vakuum statt. Warum? Welche Probleme könnte die Planetenatmosphäre für den Übertragungsvorgang darstellen?

„Beamen“ durch Übertragung von Materie

Gruppe 3: Energiebedarf

Stellen Sie sich vor, Sie seien Mitglieder im Konstruktionsteam des Raumschiffs *Enterprise*. Sie wirken am Entwurf des Materie-Transporters mit, der das „Beamen“ von Objekten und Personen ermöglicht.

Ihre Aufgabe ist es, den Energiebedarf des Transporters abzuschätzen. Wieviel Energie braucht man zur Übertragung der einzelnen Atome, in die ein Besatzungsmitglied zerlegt worden ist, zu einer 1000 km entfernten Planetenoberfläche?

1. Atome lassen sich effektiv mit Lasern beschleunigen. Heutzutage erreicht man Beschleunigungen von $10^6 g$ ($g = 10 \text{ m/s}^2$). Wie lange ist ein Atom bis zur Planetenoberfläche unterwegs, wenn es mit dieser Beschleunigung gleichmäßig beschleunigt wird (Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$)?
2. Welche Endgeschwindigkeit v erreicht das Atom?
3. Wenn die gesamte Masse eines Menschen von $v_0 = 0$ auf die Geschwindigkeit v beschleunigt wird: Wieviel Energie wird dazu benötigt?
4. Der Beamvorgang sollte nicht länger als eine Minute dauern. Welche Leistung wird während dieser Zeit zur Beschleunigung der Materie benötigt?
5. Nehmen Sie an, daß 1% der dem Laser zugeführten Leistung zum Beschleunigen verwendet wird. Welche Leistung müßt man ihm während des Beamvorgangs zuführen? Vergleichen Sie mit der Leistung von 10^9 W , die ein großes Kernkraftwerk liefert.
6. Bei der gegenseitigen Vernichtung von Materie und Antimaterie wird Energie gemäß $W = m c^2$ freigesetzt ($m =$ Gesamtmasse von Materie und Antimaterie). Welche Masse müßte vernichtet werden, damit die zum Beamen benötigte Energie freigesetzt wird?

„Beamen“ durch Übertragung von Information

Gruppe 4: Informationsübertragung

Stellen Sie sich vor, Sie seien Mitglieder im Konstruktionsteam des Raumschiffs *Enterprise*. Sie wirken am Entwurf des Materie-Transporters mit, der das „Beamen“ von Objekten und Personen ermöglicht.

Die gesamte Information, die in einem menschlichen Körper steckt, soll zu einer Planetenoberfläche übertragen werden. Ein einfaches Verfahren ist das folgende: Der Körper wird in ein Gitter von „Würfeln“ unterteilt, die Atomgröße besitzen (Bild 1). Für jeden Gitterplatz wird der Reihe nach ermittelt, mit welcher Atomsorte er besetzt ist (z. B. Wasserstoff, Sauerstoff, Calcium, Gitterplatz ist leer). Diese Information wird gesendet.

1. Nehmen Sie an, pro Gitterplatz werden 5 Bit an Information gesendet. Wie viele Atomsorten kann man in diesen 5 Bit codieren?
2. Wie viele „Würfel“ (Kantenlänge 10^{-9} m) braucht man, um einen Bereich von der Größe des menschlichen Körpers (also ca. $2\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$) zu erfassen? Wie viele Bits müssen also insgesamt gesendet werden?
3. Ein Bit soll durch einzelne Lichtpulse übertragen werden (Bild 2). Der zeitliche Abstand der Pulse soll $2 \cdot 10^{-15}$ s betragen. Berechnen Sie die zugehörige „Frequenz“. Vergleichen Sie mit der Frequenz von Licht? (alternativ: Die „Frequenz“ der Pulse soll optischen Frequenzen entsprechen, also $f = 5 \cdot 10^{14}$ Hz. Was ist der zeitliche Abstand zweier Pulse?)
4. Berechnen Sie wie lange bei diesem Zeitabstand zwischen den Pulsen die gesamte Informationsübertragung dauert.
5. Das Beamen soll nicht länger als eine Minute dauern. Welchen Zeitabstand dürfen die Pulse dann höchstens aufweisen. Welche Eigenschaften hat elektromagnetische Strahlung bei dieser Frequenz?