

## Fallstudie 2 HIPST – FST

**1. Titel:** Dampf, Arbeit, Energie

**2. Autoren und Institution:** Paolo Brenni, Anna Giatti, Silvana Barbacci, Fondazione Scienza e Tecnica, [pbrenni@imss.fi.it](mailto:pbrenni@imss.fi.it), [collezioni@fstfirenze.it](mailto:collezioni@fstfirenze.it), [silvana.barbacci@technet.it](mailto:silvana.barbacci@technet.it)

### 3. Zusammenfassung

Diese Fallstudie stellt eine Art Baukasten für Physiklehrer der Oberschule (Schüler und Schülerinnen im Alter von 14-19 Jahren) dar, die den Unterricht in Thermodynamik ergänzen sollen, und zwar durch Elemente der historischen Kontextualisierung: Wie wurden die Grundgesetze entdeckt? Und wie haben sich die Begriffe entwickelt? Die Fallstudie soll zeigen, wie das Projekt aus den Bedürfnissen von Lehrern und Lehrerinnen entstanden ist, die die Themen Thermodynamik und Energie im Unterricht schon aus historischem Blickwinkel behandelt haben und soll auch die Entscheidungen verständlich machen, die bei der Erstellung des Lehrmaterials nötig wurden. Der „Baukasten“ besteht aus einer CD und schriftlichem Material für vertieftes Lernen. Die CD folgt dem historischen Verlauf, indem sie mit den ersten Dampfmaschinen beginnt (Savery, Newcomen und Watt), bringt eine Zusammenfassung der Theorien über die Natur der Wärme bis hin zur Etablierung der kinetischen Wärmetheorie zur Mitte des 19. Jahrhunderts; schließlich wird gezeigt, wie die Grundsätze der Thermodynamik durch die Arbeiten von Carnot, Joule und vielen anderen Wissenschaftlern gelegt wurden, die zu diesem neuen Teilgebiet der Physik beitrugen.

Die CD folgt einer Linie, die den Zusammenhang zwischen Wissenschaft, Technik und Gesellschaft betont. Auf der einen Seite wird gezeigt, wie praktische Erfordernisse und empirisch-technische Lösungen neue Theorien hervorbrachten und vor allem, wieso das Gesetz der Energieerhaltung eine der bedeutendsten Verallgemeinerungen in der Physik des 19. Jahrhundert war. Auf der anderen Seite zeigt die CD, auf welche Weise die technologische Innovation der Dampfmaschine und ihre schrittweisen Verbesserungen, die durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse möglich wurden, beginnend mit der ersten industriellen Revolution tief greifende Veränderungen der Gesellschaft und ihrer Organisation hervorriefen. Ein besonderes Charakteristikum der CD liegt darin, dass Videos enthalten sind, die Originalgeräte aus der historischen Sammlung der Fondazione Scienza e Tecnica (FST) im Betrieb zeigen, besonders den Tyndall-Apparat, das Luft-Feuerzeug, Joules Schaufelrad-Aufbau, den Puluj-Apparat, Watts Dampfmaschine und die Dampfmaschine mit Horizontalzylinder, Pronys Leistungsbremse. Die inhaltliche Struktur der CD und das Material, das sie enthält, wurden für den Gebrauch im Unterricht zugeschnitten, während das schriftliche Material zur Weiterarbeit zur Fortbildung der Lehrpersonen über die angesprochenen Themen dienen soll. Im Lauf des Jahres will die Fondazione darüber hinaus eine Kursfolge abhalten, die ausdrücklich für Lehrkräfte gedacht ist und zum Ziel hat, diese in historischen Inhalten weiter zu qualifizieren.

### 4. Beschreibung der Fallstudie

Das Projekt über *Dampf, Arbeit, Energie* besteht aus Lernwerkzeugen zum Gebrauch für Physiklehrer der Oberschule (Alter der Schülerinnen und Schüler: 14 bis 19) zur Illustration der grundlegenden Begriffe der Thermodynamik und soll gleichzeitig eine historische Skizze zum Verhältnis zwischen Wissenschaft, Technik und Gesellschaft liefern. Das Material besteht aus einer CD und einer Reihe von schriftlichen Beiträgen zum Weiterlernen. Das

Herzstück der CD sind 15 Abbildungen, die von Texten, Bildern, Animationen und Videos ergänzt werden, und ist folgendermaßen gegliedert:

1. Saverys und Newcomens Dampfmaschinen
2. Watts wissenschaftlicher Ansatz für die Konstruktion einer Dampfmaschine
3. Watts "atmosphärische" Maschine in einer einfachen Version, mit getrenntem Kondensator und mit Parallelbewegung
4. Watts doppelt wirkende Dampfmaschine
5. Die Ausbreitung der Dampfmaschine und die industrielle Revolution
6. Der Stand der Naturforschung zur Wärme im frühen 19. Jahrhundert: der Wärmestoff
7. Erste Zweifel an der Wärmestoff-Theorie: die Beiträge von Rumford, Davy and Young
8. Das Luft-Feuerzeug und Studien über Gase
9. Die Geburt der Thermodynamik mit der Arbeit von Sadi Carnot "*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*"
10. Einführung in die hauptsächlich hierin enthaltenen Konzepte der idealen Maschine (Kreisprozess, Effizienz), erste Fassung des zweiten Hauptsatzes
11. Die Messung des Wirkungsgrades von Dampfmaschinen
12. Joule, das mechanische Wärmeäquivalent und die genaue Messung von Energie
13. Die Erhaltung der Energie und der erste Hauptsatz der Thermodynamik
14. Weiterentwicklung der Dampfmaschinen, Anwendung für den Transport
15. Weiterentwicklung der Dampfmaschinen, andere Anwendungen

Der Inhalt der CD ist auch auf dem Link in Kapitel 10 erhältlich.

Wie schon erwähnt, enthält das Material-Set auch gedruckte Ergänzungen zum vertieften Studium oder von Experten neu verfasste Texte, die den Inhalt der CD bereichern. Die auf der CD enthaltenen Videoaufnahmen tragen zu dem Ziel des Projekts bei, einen Weg aufzuzeigen, der Lehrkräften und Lernenden einen engen Kontakt mit der experimentellen und materiellen Dimension der Wissenschaft zu ermöglichen, und hierfür sind die Objekte der Sammlung in Florenz hervorragend geeignet.

Das Technische Institut der Toskana (**Istituto Tecnico Toscano**) wurde 1850 durch den Großherzog Leopold von Toskana nach dem Vorbild anderer europäischer Schulen gegründet, um den Arbeitern in der aufstrebenden Industrie der Toskana berufliche technische Fertigkeiten zu vermitteln. Die Sammlung der Physiklabors mit ihren über 3000 Exponaten ist die vollständigste in Italien und in Europa eine der wichtigsten im Hinblick auf die Lehre der Physik im 19. Jahrhundert. Die Instrumente werden in ihrem ursprünglichen Gehäuse aufbewahrt und sind nach den Zweigen der klassischen Physik des späten 19. Jahrhunderts angeordnet: Mechanik, Hydrostatik, Pneumatik, Wärme, Akustik, Optik, Elektrizität und Magnetismus, Meteorologie. Da der Hauptzweck des Instituts die Lehre war, haben die meisten der Geräte Lehrcharakter, aber es finden sich ebenso Forschungsinstrumente, Maschinenmodelle und -elemente sowie Apparate der "physique amusante".

Die Physiklabor-Sammlung als Herzstück der CD hat einen XXX Wert, indem sie den Reichtum des kulturellen Erbes veranschaulicht, ist daneben aber auch erzieherisch bedeutungsvoll. Dieser Wert besteht darin, dass sie zeigt, wie die modernen Physik- (und Chemie-) Labors im Rückbezug auf die wissenschaftlichen Labors des 18. Jahrhunderts entstanden sind und wie sie sich seit der Mitte des 19. Jahrhunderts weiter entwickelt haben. Die wachsende und sich beschleunigende Industrialisierung, der spektakuläre Fortschritt von Wissenschaft und ihren Anwendungen, die enorme Ausdehnung des Bildungssystems und der Drang nach Professionalisierung führte zur Gründung einer wachsenden Zahl von Schulen,

Universitäten und technischen Fachschulen, in denen die Existenz von Praktikums- und Forschungslaboren grundlegend war. Die Wichtigkeit dieser Labore war den Gründern des Istituto Tecnico von Florenz bewusst. Praktische und angewandte Aktivitäten waren für das anspruchsvolle Studienprogramm, das der Einrichtung zugrunde lag, von besonderer Wichtigkeit und erforderten eine reiche Ausstattung mit Instrumenten und Maschinen.

Die Videos auf der CD handeln von folgenden Themen:

1. Ein Modell der Wattschen Dampfmaschine, ihr Aufbau und Wirkungsweise wird gezeigt. Wir erkennen, dass Maschinenmodelle im 19. Jahrhundert in den Laboratorien der Schulen und Universitäten weit verbreitet waren; sie dienten zur Demonstration der physikalischen Phänomene und Gesetze sowie deren Anwendung. Das hier gezeigte Gerät ist ein verkleinertes Modell einer doppelt-wirkenden stationären Dampfmaschine nach Watt, die während des gesamten 19. Jahrhunderts verwendet wurde.
2. Der Tyndall-Apparat war weit verbreitet in den Physik-Sammlungen des 19. Jahrhunderts. Er wurde in rein qualitativen Experimenten benutzt, um zu zeigen, wie mit der Hilfe von Reibung mechanische Arbeit in Wärme umgewandelt werden kann.
3. Das Luftfeuerzeug ist ein eigenartiges Gerät, das seit dem frühen 19. Jahrhundert in Europa bis zur Erfindung von verlässlichen Streichhölzern (ca. 1820) üblich war. Mit seiner Hilfe ist es möglich, eine leicht entflammbare Substanz praktisch sofort zu entzünden dank der schnellen Kompression eines kleinen Luftvolumens, das dabei stark erhitzt wird. Dieses Prinzip wurde als physikalischer Demonstrationsapparat noch lange benutzt, da es eine spektakuläre Vorführung der Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme aufgrund der adiabatischen Kompression eines Gases gestattet.
4. Die Funktion des Jouleschen Schaufelrad-Experiments wird mit einem für Ausbildungszwecke gebauten Aufbau veranschaulicht. Joule erfand ihn 1845, um das mechanische Wärmeäquivalent zu messen.
5. Das gezeigte Modell einer typischen Horizontal-Dampfmaschine war in der Industrie weit verbreitet und ist ein Beispiel technischer Reife einer Maschine.
6. Pronys Leistungsbremse wurde 1821 von dem französischen Ingenieur und Mathematiker Gaspard Clair François Marie Riche de Prony vorgeschlagen. Es ist das erste Beispiel einer großen Zahl von dynamometrischen Apparaten, die zwischen dem 19. und 20. Jahrhundert erfunden wurden, um die Leistung von Dampfmaschinen und verschiedenen anderen Antrieben zu messen.
7. Der Puluj-Apparat wurde von dem ukrainischen Physiker und Erfinder Johann Puluj (1845-1918) macht die näherungsweise Bestimmung des mechanischen Äquivalents einer Calorie möglich. Da er kleiner und besser zu handhaben war als der Joulesche Aufbau, wurde er besonders für Lehrzwecke eingesetzt.

Die CD wird zur freien Nutzung für Lehrkräfte angeboten, die die für sie verwendbaren Teile je nach den Erfordernissen ihres Lehrplans und entsprechend ihren Interessen auswählen können. Wir werden Fortbildungskurse anbieten, um verlässliches Hintergrund-Material für sie bereit zu stellen.

## **5. Historischer Hintergrund, einschließlich *Nature of Science***

Dieses Kapitel umfasst vier Gesichtspunkte, die den ganzen Bereich dieser Fallstudie abdecken: die technischen Neuerungen, die von der Dampfmaschine bewirkt wurden, die sozioökonomischen Umwandlungen, die von der industriellen Revolution verursacht wurden,

die Kenntnisse über die Natur der Wärme bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts und die Geburt der Thermodynamik.

Der historische Hintergrund, der im folgenden dargestellt wird, hilft auch dabei, den hier vorgeschlagenen Kursverlauf zum Thema „Dampf, Arbeit, Energie“ zu verstehen und bietet den Lehrerinnen und Lehrern viele Hinweise, wie man die Lernenden zur Reflexion über die Natur der Naturwissenschaften (Nature of Science, NoS) motivieren kann. Zum Beispiel: Praktische Erfordernisse, die neue technische Lösungen hervorgebracht haben, wurden oft zur Triebkraft für neue wissenschaftliche Erkenntnisse; in unserer Fallstudie hat die Notwendigkeit zur Verbesserung der Effektivität von Dampfmaschinen zur genaueren Untersuchung der Natur der Wärme und zur Analyse des Verhältnisses zwischen Wärme und Arbeit geführt. Oder: Neue Erkenntnisse sind fast nie allein ein plötzlicher genialer Einfall einer Einzelperson, sondern das Ergebnis eines Prozesses der Festigung und Verfeinerung vieler einzelner Beiträge, die nicht notwendigerweise linear aufeinander folgen. Im Gegenteil, manches Mal erhalten verschiedene Wissenschaftler getrennt voneinander und sogar auf unterschiedlichen Wegen ihre Ergebnisse (wie es beim Prinzip der Energieerhaltung war). Darüber hinaus bieten die Themen dieser Fallstudie viele interdisziplinäre Anknüpfungspunkte, die dazu anregen, über die komplexen Beziehungen zwischen Wissenschaft, Technik und Gesellschaft und ihren wechselseitigen Einfluss aufeinander nachzudenken.

#### Die Dampfmaschine

Als im 17. Jahrhundert wegen umfangreicher Abholzungen in England eine Holz- und Kohleknappheit auftrat, musste in den Bergwerken immer tiefer gegraben werden. Dies erforderte wiederum wegen der in der Tiefe üblichen überfluteten Schächte effektive Methoden der Entwässerung. Darüber hinaus verfügten viele der Bergwerksgesellschaften über die finanziellen Mittel, um das Problem mit effektiveren als den bis dahin üblichen mechanischen und manuellen Methoden zu lösen. Obwohl er nie zuvor mit der Lösung praktischer Probleme zu tun hatte (und obwohl bislang immer genügend Handarbeit in Form von Sklaven zur Verfügung gestanden hatte), erwog **Thomas Savery** (1650?-1715) den Einsatz von Dampf. Er war ein vielseitiger Militäringenieur und baute als erster eine nützliche und effektive Dampfpumpe. 1698 erhielt er ein Patent auf eine „neue Erfindung um Wasser zu heben und Bewegung hervorzubringen in jeglicher Art von Fabrikarbeit durch die antreibende Kraft des Feuers, die für die Entwässerung von Bergwerken von großem Nutzen und Vorteil sein wird ... und für die Arbeit aller Arten von Fabriken, wo man nicht den Nutzen der Wasserkraft oder den konstanter Winde hat“. Jedoch führte der große Nachteil von Saverys Maschine (nämlich Dampf hohen Drucks zu benötigen, der das Risiko von Explosionen mit sich brachte) dazu, dass sie schon zu Beginn des 18. Jahrhunderts außer Gebrauch geriet.

Dieser Mangel wurde von **Thomas Newcomen** (1663-1729) behoben, der eine Niederdruckmaschine erfand, die im Vergleich zu ihrer Vorgängerin sowohl Wasser pumpen als auch Gewichte heben konnte. Newcomens Maschine war unvergleichlich viel erfolgreicher als jede Maschine vorher. Um 1725 breitete sich der Gebrauch dieses Typs von Maschine sogar auf den Kontinent aus, besonders zum Wasserpumpen in Bergwerken oder um Wasser zum Betrieb von Wasserrädern zu heben, die dann wiederum Maschinen antrieben. Newcomens Maschine brachte beachtliche ökonomische Vorteile beim Entwässern von Bergwerken, aber fand wegen ihrer geringen Effizienz und ihres kleinen Leistungsgewichts wenig Gebrauch in anderen Anwendungsbereichen.; außerdem konnte sie keine Rotationsbewegung erzeugen. Trotz ihres geringen Wirkungsgrads und des enormen Kohleverbrauchs im Vergleich zur geleisteten Arbeit war sie doch für mehr als 60 Jahre

praktisch ohne Konkurrenz. Sie stellte den Hauptfaktor zur Ausbeutung der britischen Minen dar und war eine der Triebkräfte der frühen englischen Industrieentwicklung.

Die erste Person nach Newcomen, die einen wichtigen Fortschritt bei der Energieerzeugung durch Dampf erreichte, war **James Watt** (1736-1819). Er war auf Newcomens atmosphärische Maschine aufmerksam geworden und untersuchte die Eigenschaften des Dampfes in zahlreichen Versuchen. Er erkannte die Bedeutung der „latenten Wärme“, die bereits von dem schottischen Chemiker, Physiker und Arzt Joseph Black erforscht worden war und hatte die Gelegenheit, dieses Problem mit ihm zu diskutieren. Diese wenn auch flüchtige Zusammenarbeit markierte den ersten Ansatz zu einer wissenschaftlichen Untersuchung von Wärmekraftmaschinen, die bis dahin ausschließlich nach empirischen Erfahrungen gebaut wurden. Etwa 1765 erfand Watt den getrennten Kondensator, was einen grundlegenden Schritt vorwärts in der Entwicklung der Dampfmaschine darstellte: Der Dampf wurde nicht mehr im Zylinder kondensiert, in dem der Kolben läuft, sondern in einem getrennten Kondensator, wodurch ermöglicht wurde, dass der Zylinder – mit einer guten Isolation – immer heiß gehalten werden konnte, während der Kondensator kalt blieb. Die Effizienz der Maschine wurde beachtlich erhöht und der Verbrauch an Brennmaterial verringert. Watts erste Maschinen mit separatem Kondensator waren ebenfalls atmosphärische Maschinen.

Später konnte Watts doppelt wirkende Dampfmaschine (die außer den oben beschriebenen Eigenschaften noch andere wichtige technische Neuerungen aufwies) nicht nur mit Pumpen verbunden werden, die eine hin und her gehende Antriebskraft erforderten, sondern sie konnten auch aufgrund ihres Rotationsprinzips alle Arten von Maschinen in Werkstätten, in der Textil- und Metallindustrie antreiben. 1775 ging Watt eine Partnerschaft mit dem Industriellen Boulton ein und es entstand ein erfolgreiches Unternehmen, das im letzten Viertel des Jahrhunderts 450 Dampfmaschinen verkaufen und installieren konnte.

### *Die industrielle Revolution*

Die Einführung der Dampfmaschine war eine der hauptsächlichen Triebkräfte für die erste industrielle Revolution. Dieser Zeitraum umfasst die Mitte des 18. Jahrhunderts bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts, und währenddessen fanden eine Reihe von radikalen Neuerungen in der Produktion, der Förderung von Bodenschätzen und der Landwirtschaft statt, die tief greifende soziale, ökonomische und kulturelle Veränderungen zur Folge hatten.

Die industrielle Revolution begann etwa in der Mitte des 18. Jahrhunderts in England und breitete sich dann nach Kontinental-Europa und Nordamerika aus. Ihre auslösenden Ursachen waren zahlreich sind noch heute Gegenstand von Diskussionen unter Historikern, aber einige wesentliche Faktoren im England des 18. Jahrhunderts trugen zu ihrem Beginn bei. Darunter waren die Verfügbarkeit von umfangreichen natürlichen und finanziellen Ressourcen, die sich zu einem großen Teil der Ausbeutung der Kolonien, dem Vorhandensein von Rohstoffen im eigenen Land, einem ökonomischen Liberalismus, der Handel und Austausch begünstigte, einer stabilen politischen und ökonomischen Lage und einer sehr mächtigen Flotte verdankte. Schließlich war die englische Gesellschaft empfänglicher gegenüber Änderungen und Umwälzungen als in anderen Teilen Europas, und es gab eine Unternehmer-Klasse, die fußend auf einer protestantischen Ethik an technischen und sozialen Fortschritt und an den Wert von Arbeit glaubte.

Aus technischer Sicht waren zahlreiche Erfindungen von herausragender Wichtigkeit:

1. Die Einführung der Newcomenschen Dampfmaschine machte es möglich, zunächst die Bergwerke zu entwässern und damit die Bodenschätze besser auszubeuten. Mit der Einführung der verbesserten und effektiveren Watt-Maschine stand eine Antriebskraft für unterschiedliche Maschinen zur Verfügung, die die Produktion (Textil, Metall) und die Förderung von Rohstoffen vom Vorhandensein von Wasserkraft für den Antrieb von Wasserrädern unabhängig machte.
2. Der Gebrauch von Steinkohle statt Holzkohle beim Metallguss und die Einführung neuer Abbauverfahren ermöglichte eine erhebliche Steigerung der Metallproduktion und der Qualität der Produkte.
3. Die Erfindung neuer Textilmaschinen („Spinning Jenny“, „Spinning Mule“ u.a.), die eine enorme Steigerung der Produktion von Garn und Stoffen mit sich brachte, führte zum Entstehen großer Textil-Komplexe, die fast vollständig mechanisiert waren.

Mit der Erfindung neuer Maschinen gingen die großen Fabriken einher: Spinnereien, Webereien, Gießereien, Eisenhütten, alle in bislang nicht für möglich gehaltenen Größenordnungen. Neue Technologien gestatteten der Bergbauindustrie eine enorme Produktionssteigerung bei gleichzeitig sinkenden Kosten. Neue Maschinen und Verfahren verbesserten die Ausbeutung des Ackerlandes. Erste chemische Fabriken erzeugten grundlegende chemische Verbindungen wie Schwefelsäure oder Soda. Seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts entwickelte sich die Gasindustrie, die die private und öffentliche Beleuchtung revolutionierte. Parallel zu diesen Innovationen wurde die Kommunikation verbessert, indem neue Straßen, neue Brücken, schiffbare Kanäle und Schleusen gebaut wurden. Die erste Eisenbahn wurde 1825 eingeweiht, der Beginn einer radikalen Umwälzung des Landtransports.

### *Die Natur der Wärme*

Die Notwendigkeit, Dampfmaschinen zu verbessern (insbesondere ihre Leistung zu erhöhen), war eins der Hauptmotive, die das Studium der Natur der Wärme anregte. In der modernen Begrifflichkeit ist Wärme als Energie definiert, die zwischen zwei Systemen in unterschiedlichen thermischen Zuständen übertragen wird. In Anwesenheit eines Temperaturgradienten fließt Wärme immer von Punkten höherer Temperatur zu solchen mit niedrigerer Temperatur, bis ein thermisches Gleichgewicht erreicht ist.

Im Laufe der Zeit gab es einige wenige Theorien über die Natur der Wärme: Sie wurde etwa als interne mikroskopische Bewegung der Materie angesehen (siehe weiter unten), aber auch als geruchs- und farblose materielle Substanz – das Phlogiston – das aus brennenden Körpern ausströmt und sie dabei in „Calx“ (Kalk, die heutigen Oxide) umwandelt. Dieser Theorie widersprach aber die Tatsache, dass die Verbrennung mancher Körper Oxide hervorbringt, die schwerer sind als der Körper selbst. Eine Theorie, die am Ende des 18. Jahrhunderts weit verbreitet war, war die des Wärmestoffs (Caloric), eine Art elastische Flüssigkeit, die in Körper eindringen und sie ausfüllen konnte. Sie wurde für die Temperatur der Körper verantwortlich gemacht: Kühlen bedeutete Verlust von Wärmestoff, der spontan vom wärmeren zum kälteren Körper übergeht. Nach Antoine Lavoisier, der die Unverträglichkeiten mit der Phlogiston-Theorie erkannte, blieb die Menge des Wärmestoffs im Universum unverändert.

Die Wärmestoff-Theorie beeinflusste die Arbeit des Chemikers Joseph Black stark, der mit Hilfe von vielen Experimenten mit erhitzten Körpern und ihrem Übergang von einem Zustand zum anderen die Existenz von latenter Wärme (zu dieser Zeit: latenter Wärmestoff!) und spezifischer Wärme. In modernen Begriffen ist dies die Energiemenge, die zum Übergang

von einem Aggregatzustand zum anderen notwendig ist (zum Beispiel von der Flüssigkeit zum Gas). Spezifische Wärme ist dagegen die Energie, die nötig ist, die Temperatur einer Masseneinheit um ein Grad zu erhöhen. Diese beiden Konzepte spielten nicht nur eine fundamentale Rolle in der Entwicklung der Wärmeforschung, sondern sie bildeten auch die Grundlage der Verbesserungen, die James Watt an der Dampfmaschine vornahm. Um diese Größen und die Wärme zu messen, die bei chemischen Reaktionen entstehen, erfand Lavoisier das Eis-Kalorimeter.

Auf der einen Seite erwies sich die Theorie des Wärmestoffs als leistungsfähig, auf der anderen Seite war sie nicht die einzige: Sie existierte neben der Theorie Francis Bacons, die im 17. Jahrhundert diskutiert wurde und die behauptete, Wärme sei eine Form der Bewegung. Im 18. Jahrhundert vertrat der russische Wissenschaftler Mikhail Lomonosov die Idee, dass Wärme auf die Bewegung mikroskopischer Teilchen in der Materie zurückzuführen sei. Viele Experimenten und grundlegende Beobachtungen hierzu wurden von dem agloamerikanischen Wissenschaftler und Erfinder Benjamin Thompson gemacht, der 1791 Count Rumford wurde. Seine sehr ereignisreiche Laufbahn führte ihn auch nach München, wo er im Dienst des Kurfürsten von Bayern unter anderem die Armee reorganisierte. Seine Experimente mit Waffen und Schießpulver brachte ihn dazu, sich auch mit Problemen der Wärme zu befassen. Thompson beobachtete, dass beim Bohren von Kanonen, bei dem beachtliche Reibung entstand, eine große Menge Wärme entstand. Seine Neugier war geweckt, und er führte ein Experiment aus, bei dem das Bohren unter Wasser stattfand. Das Wasser begann wegen der Wärmeentwicklung zu kochen; dies hielt über Stunden an, so als ob die Wärmequelle unerschöpflich wäre. Auf der Grundlage dieser und anderer ähnlicher Beobachtungen war Thompson davon überzeugt, dass die Vorstellung des Übergangs des Wärmestoffs von einem zum anderen Körper unhaltbar war: Er hätte sich erschöpfen müssen. Er glaubte nun, dass Wärme auf einer Art von Bewegung beruhen müsse. Aber seine Experimente waren nicht sehr überzeugend. Rumfords Theorie wurden von den Befürwortern der Wärmestoff-Theorie heftig angegriffen, sie wurde aber auch von Experimenten und Überlegungen von Wissenschaftlern wie Humphry Davy und Thomas Young gestützt. Davy zeigte z.B., dass man Eiswürfel teilweise schmelzen konnte, wenn man sie im Vakuum einer pneumatischen Pumpe aneinander rieb, obwohl die Temperatur bei dem Experiment unter null Grad lag. Trotzdem gingen in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts nur wenige von der Theorie des Wärmestoffs ab.

1822 veröffentlichte der französische Mathematiker und Physiker Joseph Fourier eine grundlegende analytische Studie, die ihn (mit Hilfe von trigonometrischen Reihen) zu einem mathematischen Modell der Wärmeleitung. Wie Newton mit wenigen Gesetzen und allgemeinen Konzepten die Bewegung eines Körpers in Raum und Zeit vorhersagen konnte, war Fourier in der Lage, den Wärmezustand eines Körpers anzugeben, wenn die Ausgangsbedingungen bekannt waren. Fourier äußerte sich nicht zur Natur der Wärme, aber er nahm an, dass bei der Änderung des Wärmezustands von Körpern die Gesamtmenge der Wärme erhalten bleibt. Fouriers mathematische Werkzeuge lieferten nicht nur einen wesentlichen Beitrag zur Begründung der modernen Thermodynamik, sondern erwiesen sich auch als sehr mächtige Rechenverfahren, die in zahlreichen Zweigen der Physik bedeutungsvoll wurden.

In den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts wurde nicht nur der Wärmetransport durch Leitung oder Konvektion erforscht. Der italienische Wissenschaftler Macedonio Melloni führte umfangreiche Untersuchungen über Strahlungswärme durch (heute Infrarot-Strahlen). Melloni erforschte die Eigenschaften zahlreicher Substanzen, die auf unterschiedliche Weise Strahlungswärme durchlassen, reflektieren oder brechen konnten. Da sie sogar ein Vakuum

durchquerten, wurden sie später als unsichtbarer Teil des elektromagnetischen Spektrums erkannt, mit einer niedrigeren Frequenz als das sichtbare Licht.

Im gleichen Zeitraum wurden die Thermometer verbessert, auf deren Genauigkeit und Präzision alle Wärmestudien angewiesen waren. Die Ausdehnungskoeffizienten von Quecksilber, Glas und vieler anderer Stoffe wurden exakt bestimmt. Zu Beginn des Jahrhunderts wurden die Eigenschaften und das Verhalten der Gase im Hinblick auf die Parameter Volumen und Temperatur untersucht. Grundlegende Forschungen führte Joseph Gay-Lussac über Mischungen und Verbindungen von verschiedenen Gasen und über Das Verhältnis von Druck und Temperatur bei konstantem Volumen durch. Weitere Prominente Wärme-Forscher waren John Dalton, der Begründer der Atomtheorie in der Chemie und vor allem Victor Regnault, der unter anderem die Ausdehnung der Gase, die Spannkraft des Dampfes, die latente Wärme von Wasser und seine spezifische Wärme bei verschiedenen Temperaturen untersuchte.

Pierre Dulong und Alexis Petit erforschten die spezifische Wärme von Festkörpern. Zur gleichen Zeit erschienen die ersten Studien zur Verflüssigung von Gasen, eingeleitet durch Michael Faraday. Alle diese Analysen erbrachten eine größere Vertrautheit mit der Natur der Gase und machte es möglich, grobe Gesetze zu formulieren, die ihr Verhalten in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern beschreiben und ansatzweise den Mechanismus der Phasenübergänge zwischen Gas und Flüssigkeit zu verstehen. Diese Studien öffneten die Tür zu wichtigen industriellen Anwendungen, die erst in den letzten Jahrzehnten des Jahrhunderts verwirklicht werden sollten.

### *Die Geburt der Thermodynamik*

In diesen Jahren großer wissenschaftlicher Veränderungen breitete sich der Wandel, der durch die industrielle Revolution in England seit etwa 1740 ausgelöst worden war, auch auf dem Kontinent aus, zuerst und vor allem durch die Einführung der Dampfmaschine verursacht. Es kann zu Recht behauptet werden, dass die Wissenschaft Thermodynamik – die die Umformung von Energie zwischen Wärme und (mechanischer) Arbeit behandelt – ihren Ausgang nahm in den Versuchen, mathematisch zu bestimmen, wie viel Arbeit aus einer Dampfmaschine entnommen werden kann.

Der erste Impuls in dieser Richtung ging von dem französischen Militär-Ingenieur Nicola Léonard Sadi Carnot aus, der sich der Verbesserung der Dampfmaschine gewidmet hatte, deren Konstruktion immer noch wesentlich von Erfahrungswissen bestimmt wurde. Es gab zwar unbestimmte Intuitionen, aber die wissenschaftlichen Grundlagen ihrer Funktion waren noch fast gänzlich unbekannt. Er war daran interessiert zu verstehen, wie man gute Dampfmaschinen baut. In seiner Zeit wurde die Dampfkraft zwar bereits zum Wasserpumpen in Bergwerken, zum Antrieb von Schmiedehämmern, von Mühlen und Textilmaschinen verwendet, dies aber nicht besonders effizient. Die englischen Maschinen, die nach den Napoleonischen Kriegen nach Frankreich importiert worden waren, zeigten Carnot, wie rückständig der französische Maschinenbau noch war. Darüber hinaus beunruhigte es ihn, wieso die Engländer solche großen Fortschritte mit Hilfe der rein praktischen Fähigkeiten einiger Ingenieure hatten machen können, denen eine formale wissenschaftliche Ausbildung fehlte. Die englischen Ingenieure hatten einleuchtende Daten zur Effektivität vieler Arten von Maschinen gesammelt und publiziert, und ihnen kam der Verdienst zu, Nieder- und Hochdruckmaschinen mit einem oder zwei Zylindern konstruiert zu haben. Carnot glaubte, ein wichtiger Grund für die Niederlage in den Napoleonischen Kriegen sei eine unzulängliche Verwendung der Dampfmaschine und so begann er, ein Buch über das Leistungsvermögen

der Dampfmaschine zu schreiben. Vor ihm hatten andere diese Thema behandelt und versucht, ihre Leistung dadurch zu verbessern, dass sie die Expansion und die Kompression des Dampfes mit der Arbeitsleistung und dem Treibstoffverbrauch verglichen.

1824 veröffentlichte Carnot seine „Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance“ (Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen), eine Arbeit, in der er den Kern des Prozesses behandelte, ohne sich mit Einzelheiten der Technik und Konstruktion zu befassen (wie es andere getan hatten). Carnots Wärmemaschine ist eine ideale Maschine, genauso wie der Kreisprozess, den er erfand. Um Carnots Arbeit vollständig würdigen zu können, muss man berücksichtigen, dass die Konzepte, die heute für uns grundlegend sind (wie Wärme oder Energie) damals noch gänzlich unklar waren. Carnot führte die Idee eines Kreisprozesses ein, wobei eine Substanz nach einer Reihe von Umwandlungen wieder in ihre Ausgangsbedingungen überführt wird. Er schlug auch das Prinzip der Reversibilität vor, nach dem Wärme aus dem Kondensator entnommen wird und zur Quelle zurückgeführt wird auf Kosten einer gleich großen Menge von Arbeit. Da ein perpetuum mobile unmöglich ist, schloss er, dass keine Maschine eine größere Effektivität haben kann als eine reversible.

Carnot war von der Gültigkeit der Wärmestoff-Theorie genauso überzeugt wie von der Erhaltung des Wärmestoffs. Er verglich die „bewegende Kraft“ der Wärme mit der von fallendem Wasser, das ein Wasserrad antreibt. Er behauptete, dass beide ein Höchstmaß an Kraft besitzen und zwar unabhängig - im einen Fall - von der Art der Maschine, auf die das Wasser wirkt und, im andern Fall, von der Art der Substanz, der die Wärme zugeführt wird. Die Bewegungskraft des Wassers hängt von der Menge des Wassers ab und der Höhe, aus der es herunterfällt. Die Bewegungskraft der Wärme hängt ab von der Menge des Wärmestoffs und dem Temperaturunterschied zwischen den Reservoiren, zwischen denen sie arbeitet. Wie Carnots späte Schriften (die lange Zeit nicht veröffentlicht wurden) jedoch belegen, war er ein paar Jahre später davon überzeugt, dass die Wärmestofftheorie ein Trugschluss war; er war zu einer dynamischen Wärmetheorie „konvertiert“. Überdies hatte er das Prinzip der Energieerhaltung verstanden: „Die bewegende Kraft existiert in einer unveränderlichen Menge in der Natur; sie kann weder erzeugt noch vernichtet werden.“ Obwohl die Bedeutung von Carnots Arbeit von 1824 von Benoit Paul Emile Clapeyron unterstrichen wurde, wurde sie nicht allgemein anerkannt, bis sie von William Thomson (später Lord Kelvin) aufgegriffen wurde, der die Notwendigkeit betonte, Carnots Argumentation zu modifizieren, um sie mit der neuen Theorie der Wärme vereinbar zu machen. 1848 konnte Thomson tatsächlich zeigen, dass Carnots Prinzip der zyklischen Umwandlungen zum Konzept einer absoluten Temperaturskala führte. 1849 publizierte er „On an absolute thermometric scale founded on Carnot's theory of the motive power of heat, and calculated from Regnault's observations“ (Über eine absolute Temperaturskala gegründet auf Carnots Theorie der bewegenden Kraft der Wärme und berechnet nach Regnaults Beobachtungen).

1850 informierte Rudolph Clausius die Berliner Akademie über eine Arbeit, die im wesentlichen den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik enthielt: „Wärme kann nicht spontan von einem kälteren zu einem wärmeren Körper fließen.“ Clausius war kein großer Experimentator, aber er erzielte bemerkenswerte Ergebnisse als mathematischer Physiker. Zur gleichen Zeit präsentierte der Professor für Ingenieurwesen und Mechanik William John M. Rankine der Royal Society of Edinburgh eine Arbeit, in der er erklärte, dass Wärme durch die Bewegung von Molekülen hervorgerufen wird; er kam darin zu mehreren Ergebnissen, die auch schon Clausius erreicht hatte. William Thomson veröffentlichte seine Forschungsergebnisse, in denen er einen strengen Beweis des zweiten Hauptsatzes vorlegte. Er kann in verschiedener Form ausgedrückt werden, eine mögliche Formulierung ist: „In

einem Kreisprozess ist es unmöglich, alle Wärme in Arbeit umzuwandeln“. Dieses Prinzip war definitiv das Ende der Möglichkeit, ein perpetuum mobile zu verwirklichen (es hielt aber Erfinder und Phantasten nicht davon ab, diesen unmöglichen Traum weiter zu verfolgen).

Ein weiteres grundsätzliches Thema in der Entwicklung der Thermodynamik war die Messung des mechanischen Wärmeäquivalents. Das Konzept des mechanischen Wärmeäquivalents spielte bei der Aufstellung des Prinzips der Energieerhaltung eine entscheidende Rolle, das eine der wichtigsten Verallgemeinerungen der Physik des 19. Jahrhunderts darstellt. Wie es häufig in der Geschichte der Naturwissenschaften geschieht, kamen mehrere Personen zur gleichen zu der gleichen Schlussfolgerung. Das Prinzip der Äquivalenz zwischen Arbeit und Wärme wurde tatsächlich von zahlreichen Wissenschaftlern formuliert, deren Ideen sich jedoch nicht gleich durchsetzen konnten. Es muss hier an Robert Mayer, einen Arzt aus Heilbronn, Ludwig August Colding aus Kopenhagen, James Prescott Joule in England und Hermann von Helmholtz in Deutschland erinnert werden.

Joule war Erbe einer Brauerei, entwickelte früh ein Interesse an wissenschaftlichen Themen und erwies sich als sehr fähiger Experimentator. Während vieler Jahrzehnte arbeitete er an der Messung des Äquivalents zwischen Arbeit und Wärme und benutzte dabei verschiedene Methoden. Er stellte elektrische Methoden (Messung der Wärme, die durch den Stromfluss in einem Leiter erzeugt wird) rein mechanischen Methoden gegenüber und erhielt Ergebnisse, die zumindest in der Größenordnung übereinstimmten. Dies bestärkte ihn in seiner Überzeugung, dass Arbeit in Wärme in einer konstanten Relation umgewandelt werden könne. In einem seiner berühmtesten Experimente wird eine Wassermenge durch die Reibung erwärmt, die bei der Rotation eines Schaufelrads entsteht, das durch fallende Gewichte angetrieben wird. Nachdem er unglaubliche technische Schwierigkeiten gelöst, kleinste Temperaturdifferenzen erfolgreich gemessen und seine Verfahren immer mehr verfeinert hatte, bestimmte er die Arbeit, die notwendig ist, um die Temperatur eines Gramms Wasser um ein Grad zu erhöhen - mit für seine Zeit – erstaunlicher Genauigkeit. Die Ergebnisse dieses Experiments wurden 1845 vorgestellt. Im April 1847 hielt Joule eine Konferenz in Manchester ab und gab „die erste vollständige und klare Darstellung der allgemeinen Erhaltung des Prinzips, das heute Energie genannt wird“. Im Juni des gleichen Jahres wurde dieses Thema noch einmal auf dem Treffen der British Association for the Advancement of Science in Oxford behandelt. Dies könnte unbemerkt geblieben sein, wenn nicht der junge Thomson anwesend gewesen wäre, der auf Joule aufmerksam wurde. Nach dem Treffen diskutierten sie weiter; Thomson eröffneten sich „Gedanken, die er nie zuvor gehabt hatte“, und Joule bekam die Gelegenheit, mit der Theorie von Carnot bekannt gemacht zu werden.

Im gleichen Jahr, in dem Joule seine Vision der Energie ankündigte, stellte Helmholtz einen Artikel über dasselbe Thema in der Physikalische Gesellschaft in Berlin vor, in dem er weitaus klarere Formulierungen benutzte als Mayer bis dahin. Die Veröffentlichung erweckte zunächst wenig Aufmerksamkeit, bis Clausius sie 1853 angriff. Andere warfen ihm vor, von Mayers Arbeit auf unredliche Weise profitiert zu haben, aber 1847 hatten weder Helmholtz noch Joule von Robert Mayer gehört, und sie erkannten seine Priorität später auch an. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik ist einfach eine Verallgemeinerung des Prinzips der Erhaltung der Energie. Sie kann weder erzeugt noch zerstört werden, aber sie kann verschiedene Formen annehmen. Jedes System enthält eine bestimmte Menge von Energie, die als die innere Energie des Systems bezeichnet wird. In einem Gas ist dies im wesentlichen die gesamte kinetische Energie der bewegten Moleküle. Die innere Energie eines Gases kann entweder geändert werden durch Zuführung von Wärme (z.B. durch Erhitzen) oder indem man Arbeit daran leistet (etwa durch Kompression). Der erste Hauptsatz drückt also aus, dass die Variation der inneren Energie jedes thermodynamischen Systems – sei es eine

Wärmekraftmaschine, ein chemischer Reaktor, ein anderes isoliertes System – dem Unterschied zwischen den Mengen von Arbeit und Wärme entspricht, die dem System zugeführt werden.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde die Thermodynamik schrittweise vervollkommen, erhielt eine zunehmend ausgeklügelte und komplexe mathematische Struktur und begann, eine grundlegende Rolle auch außerhalb der Physik zu spielen. Dank der Entwicklung der Thermodynamik wurde der Entwurf und der Bau von Wärmekraftmaschinen (Dampfmaschinen, Maschinen mit interner Verbrennung, Turbinen) immer weniger empirisch und immer mehr das Ergebnis von Rechnungen und angewandter Theorie. Allerdings muss man sich darüber im klaren sein, dass die mathematischen Formalismen der Thermodynamik von den Ingenieuren stets modifiziert werden müssen, wenn sie in der Technik angewendet werden sollen. Am Ende des 19. Jahrhunderts trieben gewaltige Dampfmaschinen transatlantische Schiffe, Kraftwerke und riesige Maschinen in jeder Art von Fabriken an. Verglichen mit diesen Tausenden von Pferdestärken erschien die Leistung der Newcomen-Maschinen geradezu lächerlich.

## **6. Zielgruppe, curriculare Relevanz und pädagogischer Nutzen**

Die Idee, sich mit dem Thema Thermodynamik zu beschäftigen, entstand während des ersten nationalen Treffens, das in der FST durchgeführt wurde. In einer brainstorming-Phase sollten Lehrkräfte Vorschläge für neues Lehrmaterial sammeln. Diese sollten einerseits eine wichtige Rolle im Lehrplan spielen und auf der anderen Seite zu den Exponaten der Physiklabor-Sammlung der FST passen. Thermodynamik wurde von zwei Physiklehrerinnen vorgeschlagen, Paola Falsini vom Liceo Scientifico Enriques Agnoletti in Sesto Fiorentino und Silvia Pirollo vom Liceo Artistico Alberti in Florenz; sie hatten kürzlich selbständig die Unterrichtseinheiten „Von Wärmekraftmaschinen zu den Prinzipien der Thermodynamik“ und „Einführung in das Energieprinzip“ entwickelt.

Die Entscheidung über die Art des Lernmaterials und die Struktur der „Dampf, Arbeit, Energie“-Einheit wurde sukzessive getroffen, indem die Mitglieder der HIPST-Arbeitsgruppe ihre Meinungen diskutierten, beteiligt waren vor allem Barbara Bellaccini und Ivan Casaglia vom Liceo Scientifico Castelnovo in Florenz. Es wurde der Versuch gemacht, Material zu entwickeln, das wirkungsvoll die Vermittlung eines zentralen Themas des Physiklehrplans – trotz der Gefahr der Abstraktheit – mit einer historischen Sichtweise verbindet und gleichfalls Überlegungen zur *Nature of Science* anregt.

Das Lernmaterial, das in dieser Fallstudie beschrieben wird, ist für Physiklehrer der Oberschule bestimmt (Alter der Schülerinnen und Schüler: 14-19), es kann aber auch für interdisziplinäre Projekte, besonders zusammen mit Geschichts- oder Philosophielehrkräften (in Geschichte mit Bezug zur industriellen Revolution, in Philosophie zu Aufklärung und Positivismus). Ebenso können Verbindungen zur Literatur und zur Darstellenden Kunst geknüpft werden.

Unsere Vorschläge besitzen eine spezifische curriculare Relevanz, indem sie Bezug nehmen auf eine Grundforderung in den Physikkursen aller höheren Schulen. Wir hoffen, dass sie ein Werkzeug darstellen, das Lehrerinnen und Lehrer dabei effektiv ermutigt und unterstützt, ihre Klassen in die Wissenschaftsgeschichte einzuführen und ihr Interesse daran zu wecken. Dies ist aber nicht alles: Bei der Evaluation der HIPST-Arbeitsgruppe stellte sich heraus, dass den jungen Menschen der Weg zu einem reicheren und klareren Verständnis der Physik eröffnet wird, das nicht in den meisten Fällen – wie es zumindest in italienischen Schulen ist – mit

einem sterilen, mathematischen Formalismus endet, der von den konkreten Fakten völlig getrennt ist. Dies lässt die Schülerinnen und Schüler oft enttäuscht zurück von einer Wissenschaft, die, wie man meinen sollte, natürliche Phänomene erklären sollte anstatt bei mathematischen Abstraktionen stehen zu bleiben.

Der Zweck der hier vorgestellten Fallstudie ist es daher, den Lehrern und damit auch den Schülern ein Werkzeug anzubieten, mit dem sie sich den Inhalten der Physik unter einem sehr konkreten Blickwinkel nähern können. Dieser Blickwinkel sollte die Motivation und die Komplexität der Forschungswege zeigen, die zu neuen Wissensbeständen über die Naturgesetze geführt haben, er sollte die Kreativität der wissenschaftlichen Arbeit belegen, die Persönlichkeiten präsentieren, die ihre Akteure waren, die Bedeutung der experimentellen Arbeitsweise in der Wissenschaft unterstreichen und ihre tief greifende Wechselwirkung mit Technik, Ökonomie und Gesellschaft.

### **7. Aktivitäten, Methoden und Medien des Lernens**

Der „Dampf, Arbeit, Energie“-Materialsatz ist ein flexibles Werkzeug für die selbständige Nutzung durch Lehrerinnen und Lehrer im Unterricht. Er enthält Informationen zur Planung von einer oder mehreren Unterrichtsstunden oder eines ganzen Kurses, der mehrere Wochen dauern kann. Es bleibt der Kreativität und dem besonderen Interesse der Lehrkräfte überlassen, wie sie es einsetzen wollen: Es kann den Entwurf für einen oder mehrere Lehrervorträge bilden; es kann Anregung für interdisziplinäre Projekte mit anderen Lehrern sein; es kann als Ausgangspunkt für Laboraktivitäten dienen; es kann Gelegenheit für außerschulische Aktivitäten bieten (wie etwa einen Besuch in der Physik-Sammlung der FST). Ein besonders bedeutungsvoller Zusatznutzen wird durch die Videofilme bereit gestellt, die den Lehrerinnen und Lehrern die Möglichkeit eröffnen, die Funktion verschiedener Maschinen-Modelle zu visualisieren und sehr konkret zu veranschaulichen, wie bestimmte physikalische Phänomene erzeugt und wie bestimmte Messungen durchgeführt werden.

### **8. Lernschwierigkeiten und Probleme**

Wenn man den Aussagen der Lehrkräfte folgt, scheint das größte Hindernis beim Lehren nach den hier vorgeschlagenen Prinzipien das Fehlen einer historischen Dimension in der Physiklehrer-Ausbildung zu sein. Falls sie nicht selbst an ihrer Qualifizierung arbeiten, betrachten sie es als schwierig, eine historische Sicht in ihren Unterricht auf eine Weise einzubringen, die nicht banal ist. In Ergänzung zu den Zusatzmaterialien, die in Kapitel 4 erwähnt wurden, sollen Seminare mit Kleingruppenbetreuung von der Fondazione veranstaltet werden, die eine zunehmende Vertrautheit der Lehrenden mit Inhalten der Wissenschaftsgeschichte zum Ziel haben.

### **9. Evaluation**

Der Evaluationsprozess ist noch in einem vorläufigen Stadium. Die Lehrkräfte der HIPST-Gruppe fanden den Prototyp der „Dampf, Arbeit, Energie“-CD gut strukturiert, umfangreich und originell. Einige haben auf die Schwierigkeiten hingewiesen, die in Kapitel 8 benannt wurden; diese sind kaum zu lösen, wenn man Physiklehrer dazu motivieren will, historische Inhalte in ihren Unterricht aufzunehmen. Deshalb haben wir beschlossen, mehr Material für vertiefte Beschäftigung zu erstellen. Aus dem gleichen Grund werden wir Anschlusskurse für Lehrerinnen und Lehrer konzipieren, die das inhaltliche Material-Angebot erweitern und ergänzen. Dies wird in großem Maßstab möglich sein, da die toskanische Schulverwaltung nach einer Evaluation der im Projekt erhaltenen Ergebnisse weitere Aktivitäten zur

Verbreitung der Produkte finanzieren wird. Folglich wird im laufenden Jahr eine Evaluation des gesamten Projekts möglich sein.

## 10. Quellen für das Lehrmaterial

Der gesamte Inhalt der CD kann hier herunter geladen werden: <ftp://79.34.91.73/>.

## 11. Videoquellen

1. Ein Modell der Wattschen Dampfmaschine, ihr Aufbau und Wirkungsweise wird gezeigt. Wir erkennen, dass Maschinenmodelle im 19. Jahrhundert in den Laboratorien der Schulen und Universitäten weit verbreitet waren; sie dienten zur Demonstration der physikalischen Phänomene und Gesetze sowie deren Anwendung. Das hier gezeigte Gerät ist ein verkleinertes Modell einer doppelt-wirkenden stationären Dampfmaschine nach Watt, die während des gesamten 19. Jahrhunderts verwendet wurde.
2. Der Tyndall-Apparat war weit verbreitet in den Physik-Sammlungen des 19. Jahrhunderts. Er wurde in rein qualitativen Experimenten benutzt, um zu zeigen, wie mit der Hilfe von Reibung mechanische Arbeit in Wärme umgewandelt werden kann.
3. Das Luftfeuerzeug ist ein eigenartiges Gerät, das seit dem frühen 19. Jahrhundert in Europa bis zur Erfindung von verlässlichen Streichhölzern (ca. 1820) üblich war. Mit seiner Hilfe ist es möglich, eine leicht entflammbare Substanz praktisch sofort zu entzünden dank der schnellen Kompression eines kleinen Luftvolumens, das dabei stark erhitzt wird. Dieses Prinzip wurde als physikalischer Demonstrationsapparat noch lange benutzt, da es eine spektakuläre Vorführung der Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme aufgrund der adiabatischen Kompression eines Gases gestattet.
4. Die Funktion des Jouleschen Schaufelrad-Experiments wird mit einem für Ausbildungszwecke gebauten Aufbau veranschaulicht. Joule erfand ihn 1845, um das mechanische Wärmeäquivalent zu messen.
5. Das gezeigte Modell einer typischen Horizontal-Dampfmaschine war in der Industrie weit verbreitet und ist ein Beispiel technischer Reife einer Maschine.
6. Pronys Leistungsbremse wurde 1821 von dem französischen Ingenieur und Mathematiker Gaspard Clair François Marie Riche de Prony vorgeschlagen. Es ist das erste Beispiel einer großen Zahl von dynamometrischen Apparaten, die zwischen dem 19. und 20. Jahrhundert erfunden wurden, um die Leistung von Dampfmaschinen und verschiedenen anderen Antrieben zu messen.
7. Der Puluj-Apparat wurde von dem ukrainischen Physiker und Erfinder Johann Puluj (1845-1918) macht die näherungsweise Bestimmung des mechanischen Äquivalents einer Calorie möglich. Da er kleiner und besser zu handhaben war als der Joulesche Aufbau, wurde er besonders für Lehrzwecke eingesetzt.

## 12. Internet-Quellen

Die folgende Liste gibt einige nützliche Quellen zu den geschichtlichen Ursprüngen der Thermodynamik wieder, die im Internet zugänglich sind.

- Über Thomas Savery:  
[http://library.thinkquest.org/C006011/english/jsites/steam\\_thomas\\_savery.php3?f=2&b=50&j=1&fl=1&v=2](http://library.thinkquest.org/C006011/english/jsites/steam_thomas_savery.php3?f=2&b=50&j=1&fl=1&v=2)

- Über Newcomen:  
[http://library.thinkquest.org/C006011/english/jsites/steam\\_thomas\\_savery.php3?f=2&b=50&j=1&fl=1&v=2](http://library.thinkquest.org/C006011/english/jsites/steam_thomas_savery.php3?f=2&b=50&j=1&fl=1&v=2)  
<http://www.animatedengines.com/newcomen.shtml>
  - Über James Watt:  
<http://www.kuhf.org/cdprojects/steam/track9.html><http://www.egr.msu.edu/~lira/supp/team/wattengine.htm>
  - Über den Carnotschen Kreisprozess:  
<http://www.cs.sbccc.ca.us/~physics/flash/>  
<http://www.educylopedia.be/education/mechanicsjavamachine.htm>
- Über das Perpetuum Mobile: <http://www.hp-gramatke.net/perpetuum/index.htm>

### 13. Wesentliche Buchquellen

- Angelo Baracca, Ugo Besson, Introduzione storica al concetto di energia, Le Monnier, Firenze, 1990
- Paolo Brenni, Il Gabinetto di Fisica dell'Istituto Tecnico Toscano, Edizioni Polistampa, Firenze, 2009
- Floriano Cajori, Storia della fisica elementare con l'evoluzione dei laboratori fisici, Remo Sandron, Palermo, 1930
- David Knight, Le scienze fisiche nell'Ottocento, in R. Shea (a cura di), Storia delle Scienze, Banca Popolare di Milano, Milano, 1990
- Donald S. L. Cardwell, Tecnologia, scienza e storia, Il Mulino, Bologna, 1976
- Donald S. L. Cardwell, The development of science and technology in Nineteenth-Century Britain, Ashgate, Aldershot, 2003
- Anna Giatti e Stefania Lotti (Hrsg.), Le stanze della scienza. Le collezioni dell'Istituto Tecnico Toscano a Firenze – Fondazione Scienza e Tecnica, Artigraf, 2006
- Amédée Guillemin, Les applications de la physique aux sciences, a l'industrie et aux arts, Hachette, 1874
- Charles Singer, E.J. Holmyard, A. R. Hall, T. I. Williams (Hrsg.), Storia della tecnologia, Volume 4, La rivoluzione industriale, Boringhieri, Torino, 1964
- Gerard L'E. Turner (Hrsg.), Storia delle scienze, Gli strumenti, Einaudi, Torino, 1991