

Was man aus der Geschichte der Halbleiter- und Windkrafttechnik über das Verhältnis von Technik und Physik lernen kann

Von Peter Röben

Vorbemerkung

Technik und Physik gelten bei vielen Menschen als Begriff für Anwendung und Theorie. Die Technik wendet an, was die Physik an Erkenntnissen hervorgebracht hat. Auf den ersten Blick scheint dieses Verhältnis ziemlich plausibel, denn gerade die Innovationen der aktuellen Technik, wie z. B. der neue Mobilfunkstandard LTE Advanced, das Cloud computing, der Roboter LBR iiwa von Kuka oder auch die sogenannte „fühlende Werkzeugmaschine“, wie sie am Laserzentrum Hannover entwickelt wird, sind ohne die Erkenntnisse der Physik nicht denkbar. Wer wollte bezweifeln, dass es Computer ohne die Halbleitertechnik nicht gäbe, doch diese ist ohne die Kenntnis ihrer physikalischen Grundlage nicht zu haben. Aber andere Beispiele aktueller Technik lassen sich nicht so einfach einordnen: So sind z. B. Windkraftanlagen sicherlich einerseits Beispiele für hochaktuelle Technik, die in einem hohen Maße von den Erkenntnissen der Strömungsphysik profitieren, doch wie ist es mit ihren Vorläufern, den Windmühlen? Sind diese auch auf der Grundlage der damaligen Physik entstanden? Im Folgenden soll an zwei Beispielen, nämlich der Halbleitertechnik und der Windkrafttechnik aufgezeigt werden, wie das Verhältnis zwischen Technik und Physik sich einerseits historisch entwickelt hat, aber andererseits auch heute noch Konsequenzen für die Gegenwart bestehen.

Die Entwicklung der Quantenmechanik und Halbleitertechnik

Der Transistor (Bild 1) ist der erste Halbleiter, der es im Transistorradio¹, (Bild 2) zu allgemeiner Berühmtheit gebracht hat. Er basiert auf der gleichen physikalischen Grundlage wie die Photovoltaik: nämlich der Anwendung der Quantenmechanik auf den Festkörper. Die Quantenmechanik ist eine Theorie, die das Verhalten von Elementarteilchen wie Elektronen beschreibt und Halbleiter sind besondere Festkörper, die sich in ihrem Verhalten nicht eindeutig nur den Leitern zuschreiben lassen (obwohl sie in bestimmten Situationen gut leiten) oder den Isolatoren (obwohl sie dem Strom auch einen sehr hohen Widerstand entgegensetzen können). Der Gedanke, dass die zugrundeliegende Physik unumgänglich für das Verständnis

der technischen Artefakte wie Diode, Transistor und Solarzelle ist, hat vielfältige Bemühungen gefördert, die Halbleiterphysik didaktisch zu reduzieren. Solche Ansätze finden sowohl im



Bild 1: Der erste Transistor von 1947/48. Dies ist ein Foto eines Nachbaus aus dem Nixdorf-Museum.

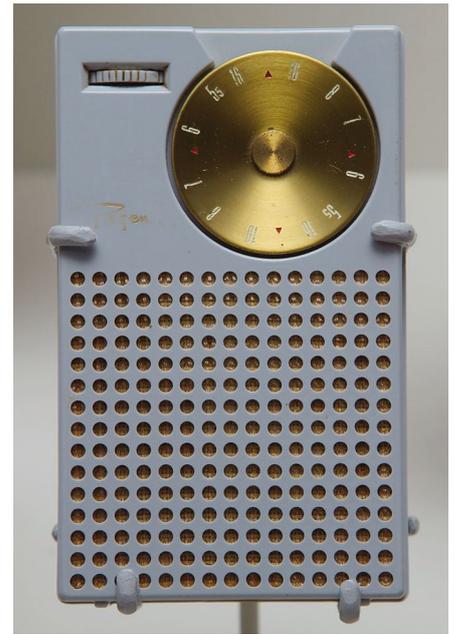


Bild 2: Das erste kommerzielle Transistorradio.

Physik- als auch im Technikunterricht breite Anwendung, wenngleich die Tücke bei der didaktischen Reduktion nicht immer hinreichend erkannt wird (vgl. Röben 2013).

Um die Sache mit der Anwendung der Physik auf Gegenstände der Technik genauer zu untersuchen, werden wir einen Rückgriff auf die Technikgeschichte machen. Wir begeben uns zunächst zurück in das Jahr 1905. Dies ist das Jahr, in dem EINSTEIN eine sehr wichtige Arbeit zum fotoelektrischen Effekt in Festkörpern publiziert hat. Einstein konnte zeigen, dass das Licht seine Energie in *Quanten*, also nur in festen Portionen und nicht in beliebigen Größen, an die Elektronen im Metall abgibt. Diese benötigen eine gewisse Mindestenergie pro Quant, um frei gesetzt werden zu können. Die Energie pro Quant entspricht der Wellenlänge des Lichts und die Quantenhypothese konnte erklären, warum Licht großer Intensität aber unterhalb einer gewissen Wellenlänge keine Elektro-

¹ 1953 kam das erste Transistorradio in den USA auf den Markt (Regency TR1). In Deutschland war es das Telefunken „Partner“ 1957. Das TR1, welches von der Firma Intermetall 1953 auf der Düsseldorfer Funkausstellung präsentiert wurde, kam wohl nicht in den Handel (<http://www.welt-der-alten-radios.de/geschichte-erste-transistorradios-293.html>).



Bild 3: Eine Folge der Erkenntnis, dass Elektronen das Licht nur in festen Portionen (Quanten) aufnehmen und abgeben können, ist die Erklärung des Linienspektrums. Die hier sichtbaren farbigen Linien stehen für verschiedene Übergänge der Elektronen des Wasserstoffatoms. Eine technische Nutzung dieses Wissens ist beispielsweise der Laser.

nen freisetzen konnte (auch wenn insgesamt mehr Energie eingestrahlt wird als für den Austritt der Elektronen nötig ist), hingegen Licht oberhalb einer gewissen Wellenlänge praktisch bei jeder Intensität Elektronen freisetzt. Die klassische Theorie konnte dies nicht.

Die Quantenmechanik entwickelte sich aus Widersprüchen heraus, die die alte Theorie der Elektrodynamik in Bezug auf das Verhalten der Elektronen im Festkörper lieferte. Nach der klassischen Theorie ist es nicht zu verstehen, warum die Elektronen nicht Energie in beliebiger Größe aufnehmen können, sondern nur in bestimmten Packungen, eben der Energie der Quanten. Die Quantenmechanik entwickelte sich mit den Arbeiten von PLANCK, HEISENBERG, SCHRÖDINGER, DIRAC, BORN etc. und feierte glänzende Triumphe als es gelang, das Spektrum des Wasserstoffatoms physikalisch zu erklären (Bild 3). Dass in diesen Spektren auffällige Regelmäßigkeiten zu entdecken waren, hatten im 19. Jahrhundert schon einige Forscher herausgefunden. Sie konnten auch jeweils Formeln für die von ihnen entdeckten Regelmäßigkeiten aufstellen: *Lyman-, Balmer-, Paschen-, Brackett-, und Pfundserie*. Doch sie scheiterten bei der *Erklärung* dieser Regelmäßigkeiten. Die Quantenmechanik hingegen war in der Lage, die Spektren des Wasserstoffgases aus grundlegenden Prinzipien zu erklären.

Die Moleküle sind in einem Gas weit voneinander entfernt und man kann sie deshalb als voneinander isoliert betrachten, was bei der Berechnung große Vereinfachungen zulässt. Im Festkörper sind die Verhältnisse allerdings verwickelter, weil die Atome sehr dicht gepackt sind und sie sich nicht als unabhängig voneinander

betrachten lassen. Das Verhalten der Elektronen in Festkörpern konnten die Quantenphysiker daher zunächst nicht berechnen.

Der Festkörper war zu der Zeit ein wichtiges Forschungsgebiet der experimentellen Physik und mit den Arbeiten von R. W. POHL zur Konduktivität in Halbleitern und seiner Vorhersage, dass die Steuerung von Elektronen in diesem Material eine große Zukunft haben wird, zeichnete sich die Bedeutung der Halbleiter auch innerhalb der Physik bereits ab und die Halbleiterphysik entwickelte sich zu einem eigenständigen Gebiet der Physik. Doch die ganze Bedeutung der Halbleiterphysik kann man nicht erkennen, wenn man sich auf die Physik beschränkt. Aus physikalischer Sicht ist die Anwendung der Quantenmechanik auf den Festkörper lediglich eine Ausweitung des Anwendungsgebietes einer bereits ausgearbeiteten Theorie. Dass die Halbleiterphysik bedeutsamer ist, war auch den Physikern jener Zeit klar. Doch der Grund für den Bedeutungszuwachs ergibt sich erst aus der Technik.

Die Funktechnik hatte sich um die Jahrhundertwende entwickelt. Der Ingenieur GUGLIELMO MARCONI (1874–1937) gab zum Glück nicht viel auf die Hinweise von Physikern, dass man mit elektrischen Wellen niemals große Distanzen überwinden kann. In den Augen der damaligen Physiker muss-

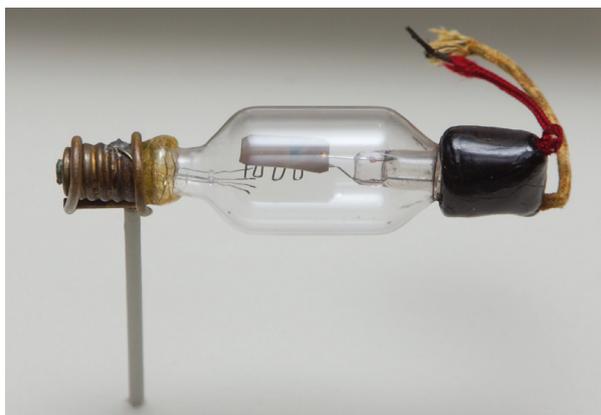


Bild 4: Dieses Foto zeigt eine der ersten Trioden von Lee de Forest (1906)

ten die sich geradlinig ausbreitenden Wellen in den Weltraum entweichen, weil die Erde eine Kugel ist und die Wellen sich nicht um dieses Kugel herum bewegen würden. Allerdings wusste es Marconi nicht wirklich besser, sondern sein Glück war es, dass die Atmosphäre eine Ionosphäre hatte, an der das Funksignal reflektiert und Richtung Erdoberfläche weitergeleitet wurde. Davon wusste allerdings noch niemand. Durch MARCONI 1901 realisierte Übertragung eines Funksignals über den Atlantik wurde nun aus Sicht der Physiker eine Erklärung notwendig und in der Atmosphärenphysik auch gefunden².

Die Funktechnik wurde zunächst nur als drahtlose Morsetechnik, z. B. für die Kommunikation mit Schiffen eingesetzt, die nicht mit den etablierten Kommunikationsmitteln erreicht werden konnten (Untergang der Titanic 1912). Doch REGINALD FESSENDEN (1866–1932) gelang schon 1906 die erste drahtlose Musik- und Sprachübertragung und damit entwickelte sich die Funktechnik in eine Richtung, die kaum ein Mensch vorhergesehen hatte (GOLLWITZER 2007). Bereits in den 20er Jahren etablierte sich ein kommerziell bedeutsamer Radiomarkt in den USA, angetrieben von Rundfunkamateuren, aber bald auch von dem Unterhaltungsbedürfnis sehr vieler Menschen, die dem Radio anders als die Rundfunkamateure als technischen Gegenstand nicht viel Interesse entgegenbrachten. Die Bedeutung der Funktechnik erschließt sich durch die Entwicklung dieses Marktes, der 1922 noch bescheidene 60.000 \$ betrug, aber schon sieben Jahre später ein Volumen von 850 Mio. \$ aufwies (HALFMANN 1984, S. 107). Solche Geschäftsaussichten riefen die großen Elektrotechnikfirmen jener Zeit auf den Plan. Ein zentrales technisches Element der Funktechnik war die Elektronenröhre, deren Physik man gut verstand (Bild 4). Die Röhre wurde für die verschiedenen Anwendungszwecke ausdifferenziert und in der Industrie entwickelte sich eine Forschung, die speziell auf industrielle Zwecke ausgerichtet war. Über die Grenzen der USA

² Dafür hat EDWARD VICTOR APPLETON (1892–1965) 1947 den Nobelpreis für Physik bekommen.

bekannt geworden ist diese Form der Forschung durch THOMAS ALVA EDISON (1847–1931), der das Erfinden wohl als Erster zu einem hoch arbeitsteiligen Prozess in einer besonderen Art von Labor entwickelt hatte. Sein Labor im Menlo Park (1876) wurde sehr berühmt und EDISON als „Zauberer vom Menlo Park“ bezeichnet, weil er es verstand, mit der von ihm entwickelten Glühbirne die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit durch effektheisende Präsentationen zu fesseln. Mit der Gründung der BELL-Laboratories (1925) wurde die Forschung in der Industrie auf eine neue Stufe gehoben, weil mit ihnen über die Forschung für industrielle Anwendung hinaus eine besondere Form der Grundlagenforschung betrieben wurde. Die Verbreitung des Telefons machte Neuentwicklungen notwendig, die sich nicht einfach aus der Physik der damaligen Zeit ableiten ließen, sondern eine eigene, auf das spezifisch technische Problem fokussierte Physikanwendung erforderten. Ein Beispiel sind die *Pupinspulen*, die das Problem der Dämpfung auf den Telefonleitungen lösten. Ohne sie wäre die Reichweite des Telefons auf Distanzen von 20 bis 30 km beschränkt geblieben, in den Augen von dem damals größten Telekommunikationskonzerns AT&T eine unhaltbare Zumutung bei ihren ökonomischen Expansionsbestrebungen. In den BELL-Laboratories entwickelte sich eine Art von Industrieforschung, die auf einem bereits gut entwickelten Stand der Physik aufsetzte. Im Fall der Pupinspulen ließ sich das Problem noch mit der klassischen Physik lösen, aber als es darum ging, die Elektronenröhre abzulösen, stellte sich das Problem, dass die Physik in den für die Entwicklung einer Alternative zur Elektronenröhre notwendigen Feldern der Physik noch nicht weit genug entwickelt war.

Sowohl in der schon gut etablierten Telefontechnik als auch in dem sich neu entwickelnden Feld der Funktechnik waren Elektronenröhren weit verbreitet (ab 1904 Vakuumdiode, 1906 Verstärkeröhre von LIEBEN und Audionröhre von LEE DE FOREST) und dabei wurden die Grenzen dieser Technik spürbar: Denn gerade ihre vielfältigen Anwendungen in Grundsaltungen als steuerbarer Schalter und als Verstärker

machte ihre Abwärme, ihr Gewicht und ihre nur beschränkte Miniaturisierungsmöglichkeit zu einem Problem. Sobald sich an ihrer Stelle eine Lösung mit Halbleitern finden ließe, so die damalige Einschätzung, könnte ein weiterer Engpass der ökonomischen Entwicklung mit Hilfe der Technik überwunden werden.

In den BELL-Laboratories wurde die Halbleitertechnik unter ihrem neuen Forschungsdirektor M. KELLY ab 1936 zu einem Forschungsprogramm. Also zu einer Zeit, als auch in den Universitäten noch intensiv an Halbleitern geforscht wurde. Schüler der damals führenden amerikanischen Festkörperphysiker JOHN SLATER vom MIT und EUGEN WIGNER von Princeton, die späteren Nobelpreisträger WILLIAM B. SHOCKLEY und JOHN BARDEEN, wurden gezielt für die BELL-Laboratories angeworben. Der Geist dieser Unternehmensforschung wird im folgenden Zitat von Kelly deutlich:

„Es wird nicht erwartet, dass dieses Programm der Festkörperphysik, bei dem die neuesten Konzepte der Festkörperstruktur angewendet werden, Resultate erbringen, die unmittelbaren Nutzen für unsere Firma haben. Dennoch ist die Herangehensweise so grundlegend und kann von so weitreichender Bedeutung sein, dass wir solche Studien als Hintergrund für unsere verschiedenen Materialentwicklungen weiter betreiben sollten. Es besteht die rationale Erwartung, dass letztendlich ein so fundamentaler Angriff den Weg zur Produktion neuer Materialien mit bedeutenden Eigenschaften für den Telefongebrauch weisen wird.“ (zitiert nach HALFMANN 1984, S. 105).

Das Argument, dass man das Ergebnis der Forschung nicht unmittelbar vorhersehen kann, wird typischerweise für die Begründung der universitären Forschung herangezogen. Gerade weil sich das Resultat der (Grundlagen) Forschung nicht unmittelbar nützlich für Unternehmensinteressen erweist, verzichten die Unternehmen darauf, dafür Geld zu investieren. Damit der Fortschritt der Wissenschaft nicht von diesem (kurzsichtigen) Gewinnkalkül behindert wird, muss dieser vom Staat gewährleistet werden. Wir sehen hier nun bei den BELL-Laboratories eine

Umkehrung dieser Argumentation: Gerade weil die Grundlagenforschung im Bereich der Festkörperphysik so dramatische Auswirkungen auf die Unternehmensinteressen haben kann, muss darin investiert werden, auch wenn das unmittelbare Resultat nicht vorhergesehen werden kann.

Die Entwicklung des Transistors kann als eine solche technisch inspirierte, ökonomisch getriebene Grundlagenforschung angesehen werden. Unter der Leitung des Theoretischen Physikers WILLIAM B. SHOCKLEY wurde 1945 eine Arbeitsgruppe mit einem Experimentalphysiker, einem Chemiker und einem Elektronikingenieur eingesetzt, die allerdings noch im selben Jahr beim Experiment mit ihrem ersten Feldeffekttransistor³ scheiterte. Es ist die theoretische Erklärung des Fehlers in diesem Experiment, die den entscheidenden Fortschritt ermöglichte: Der Kontakt zwischen dem Halbleiter und dem Metall führt nämlich zu einem unerwarteten Effekt, der erst durch die Vervollständigung der MOTT-SCHOTTKY-Theorie verstanden wurde und auch erst dann die Weiterentwicklung des Transistors ermöglichte. Das entscheidende Experiment gelang BRATTAIN im November 1947. SHOCKLEY, BARDEEN und BRATTAIN erhielten 1956 den Nobelpreis für Physik.

Die Entwicklung der Solarzelle findet nur wenige Jahre später ebenfalls in den BELL-Laboratories statt. DARYL CHAPIN, CALVIN S. FULLER UND GERALD PEARSON entwickeln 1953 die erste mit Arsen dotierte Solarzelle auf Siliziumbasis und eröffnen damit den Eingang der Halbleitertechnik in die Energietechnik, auch wenn das zu ihrer Zeit noch utopisch erschien.

Zusammenfassend: Am Beginn des Transistors stand ein technisches Problem, einen Ersatz für die Elektronenröhre zu finden. Aber zur Lösung dieses Problems konnte nicht einfach auf die Physik als Wissenslieferantin zurückgegriffen werden, denn diese

³ Hier ist mit Absicht die Formulierung „ihrem ersten Feldeffekttransistor“ gewählt worden, denn HERBERT MATARÉ und HEINRICH WELKER haben zeitgleich ebenfalls einen solchen entwickelt und sind erst spät dafür geehrt worden (Handel, 1999).

musste zunächst selbst weiterentwickelt werden. Die Vergabe des *Physiknobelpreises* für die Entwicklung des Transistors ist demnach auch der Weiterentwicklung der Physik zu verdanken, obwohl es den Bell-Laboratories darum ging, tatsächlich ein technisches Artefakt zu entwickeln⁴.

Es ist daher keineswegs so, dass die Rollen von Physik und Technik klar verteilt wären: Hier der Zulieferer von Wissen und dort der Anwender. Die Physik hatte allerdings in den vierziger Jahren schon ein solches Niveau erreicht, dass die vorherige Zurückhaltung der Unternehmen in diesem Feld der Grundlagenforschung aufgegeben wurde. In dem Wissen, dass sich die Probleme, die der ökonomisch getriebene technische Fortschritt durch die Verbreitung von Telefon und Funktechnik sich selbst bereitete, nur durch die Weiterentwicklung der Physik selbst zu lösen sind, wurde die Grundlagenforschung auch in die eigene Hand genommen (BELL-Laboratories). Die Quantenmechanik selbst ist das Resultat einer Grundlagenforschung, deren Nützlichkeit sich niemand zu ihrem Beginn ausmalen konnte, die also niemals für unternehmerische Investitionen interessant gewesen wäre. Aber mit dem Fortschritt dieser Theorie und der durch sie erst möglich gemachten Schaffung von völlig neuen Halbleitermaterialien mit definierten Eigenschaften wurde ihre Weiterentwicklung zu einem Geschäftsinteresse der großen Kommunikationsunternehmen der USA. Durch die Entwicklung von technischen Artefakten wie dem Transistor werden aber auch Teilbereiche der Anwendung der Theorie der Quantenmechanik bedeutsam, die, aus der Perspektive der reinen Physik betrachtet, nicht so vordringlich sind. Die korrekte Erklärung der Phänomene eines Metall-Halbleiter-Kontakts erhält ihre volle Bedeutung nicht aus dem System der Physik, dort sind sie ein weiterer Anwendungsfall einer bereits erfolgreichen Theorie, sondern durch die Leistung, die sie für die Weiterentwicklung des technischen Artefakts Transistor erbringt. Die BELL-Laboratories sind damit der Beginn der Entwicklung eines naturwissenschaftlichen-technischen Komplexes, in dem die Unterscheidung der Rollen



Bild 5: Eine sogenannte Holländer Windmühle, der Höhepunkt des erfahrungsgelenkten Mühlenbaus, der zum Zeitpunkt des Baus der abgebildeten Moorseeer Mühle in der Nähe von Nordenham schon im Niedergang begriffen war.

zwischen Physik und Ingenieurwissenschaften sekundär ist. Eine Seite als Wissenslieferant und die andere als Empfänger von Wissen zu betrachten, wird der Rollenverteilung nicht gerecht. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit ist allerdings nicht identisch mit einer Gleichsetzung der Disziplinen. Der Schwerpunkt der Ingenieurwissenschaft ist die Schaffung von funktionstüchtigen Artefakten, die sich in den Anwendungsfällen außerhalb des Labors bewährend müssen, während die Physik einen wichtigen Teil der Voraussetzungen dafür schafft, entsprechende Prototypen im Labor zu entwickeln und zu optimieren.

Die Entwicklung der Windenergietechnik

Der zweite Fall unserer Betrachtung, die Windenergietechnik, ist auch für den Laien als eine Technik begreiflich, die – zumindest von ihrer Entstehung her – nicht auf der Anwendung von Physik beruhen kann, ganz einfach, weil es die Physik als Wissenschaft bei der Entstehung dieser Technik noch gar nicht gab. Ob man dem Hinweis in den Gesetzbüchern von Hammurapi folgt und die erste Nutzung eines Windrades als Arbeitsmaschine auf 1750 v. Chr. datiert⁵, die Windmaschine von Heron um 60 n. Chr., die ersten

Windräder in Persien um 900 oder erst die Bockwindmühle ab dem 12. Jahrhundert als echte Windmaschine gelten lässt: Die Physik konnte zu ihrer Entwicklung nichts beitragen, da es diese Wissenschaft noch nicht gab oder da, wo sie sich entwickelte, aus gutem Grund eher mit den Sternen als mit dem Wind beschäftigt war.

Die erste ernsthafte Befassung der Physik mit dem Wind, d. h. mit der Strömung von Luft, findet erst recht spät statt und resultierte in dem Werk *Hydrodynamika* (1738) von BERNOULLI, dessen gleichnamiges Gesetz auch heute noch gilt. Doch zur Anwendung im Windmühlenbau wurde es nicht herangezogen, weil die Erbauer von Windmühlen mit einem solchen Gesetz nichts anfangen konnten. Ihre Herangehensweise an den Bau einer Windmühle basiert auf Erfahrung und Tradition (Bild 5). Gelernt wurde von einem Meister und seine Vorgehensweise wurde weitgehend beibehalten. Veränderungen wurden nur mit Bedacht vorgenommen, das Risiko eine nicht funktionsfähige Windmühle zu bauen, konnte man nicht eingehen, da der Auftraggeber sich dann geweigert hätte, zu zahlen. Es entstand im Laufe der Jahrhunderte ein Windmühlen-

4 Das Testament von ALFRED NOBEL sieht ja auch ausdrücklich vor, dass der Preis „an diejenigen ausgeteilt werden soll, die im vergangenen Jahr der Menschheit den größten Nutzen erbracht haben“. Der Nutzen zeigt sich bei vielen Entdeckungen von Kandidaten oft erst Jahre später, manchmal sogar Jahrzehnte und so kommt es zu großen Verzögerungen zwischen dem Zeitpunkt der Entdeckung und der Preisverleihung. JACK KILBY erhielt den Physiknobelpreis zum Beispiel erst 2000 (zusammen mit HERBERT KRÖMER und ZHORES I. ALFEROW) für die erste Realisierung einer Schaltung von mehreren Transistoren auf einem Halbleiterplättchen. Ob sich dagegen die Entdeckung des Higgs-Mechanismus' (Theorie 1964, Entdeckung am LHC 2012, Nobelpreis 2013) einmal als nützlich für die Menschheit herausstellen wird, scheint dem Nobelpreiskomitee keine Frage zu sein. Jedenfalls wurde der Preis ein Jahr nach der experimentellen Bestätigung verliehen.

5 vgl. wikipedia.de.wikipedia.org/wiki/Windmühle#cite_note-1