

13. Sonnen- und Windenergie

- 13.1 Allgemeine Überlegungen zur Sonnenenergie
- 13.2 Thermische Sonnenkollektoren
- 13.3 Photovoltaik
- 13.4 Photosynthese
- 13.5 Nutzung der Windenergie
- 13.6 Problem: Energiespeicher
- 13.7 Biographie: Paul Crutzen

Es ist abzusehen, dass die derzeit wichtigsten Energievorräte auf unserer Erde, d.h. die fossilen Vorräte Öl, Gas und Kohle, in den nächsten 100 bis 200 Jahren zu Ende gehen werden. Diese Aussicht alarmiert schon heute die Politik. In der Bundesrepublik geht die Regierung dieses Problem mit einer Doppelstrategie an: einmal schafft sie Anreize, um Energie einzusparen (um die Vorräte zu schonen und den CO₂ Ausstoß zu verringern) und zum anderen fördert sie stärker die Forschung zu alternativen Energiequellen, u.a. von Sonnen- und Windenergie. In dieser Vorlesung wollen wir hierzu einige physikalische Grundlagen diskutieren.

13.1 Allgemeine Überlegungen zur Sonnenenergie

Die Sonne ist ein zuverlässiger Lieferant von Energie. Ihre Oberfläche hat eine Temperatur von 5800 K und strahlt ein breites Spektrum elektromagnetischer Strahlung ab: vom Ultravioletten bis zum Infraroten mit einem Intensitätsmaximum im sichtbaren Licht bei der Farbe Grün (Wellenlänge $\lambda_{\max} = 0,5 \mu\text{m}$, die einer Quantenenergie von $E_{\max} = 2,5 \text{ eV}$ der Photonen entspricht). Da die Temperatur der Strahlung sehr hoch ist, ist die von der Sonne kommende Energie sehr „wertvoll“ in dem Sinne des theoretischen Carnot-Wirkungsgrades für die Umwandlung von Wärme in mechanische oder elektrische Energie. Er beträgt für die Sonnenstrahlung $\eta = 0,95$. Die Intensität der pro Sekunde von der Sonne eingestrahlt Energie wird durch die Solarkonstante $P_s = 1,35 \text{ kW/m}^2$ angegeben. Sie gibt die Leistung an, die auf eine außerhalb der Erdatmosphäre senkrecht zur Strahlrichtung aufgestellte Fläche von 1 m^2 trifft. Nach senkrechtem Durchtritt durch die Atmosphäre bleiben von der Solarkonstanten an einem klaren Sommertag um die Mittagszeit noch rund $(P_s)_{\text{eff}} = 1 \text{ kW/m}^2$ übrig. Auch wenn diese Leistung pro m^2 nicht sehr hoch erscheint (Die Leistung eines Bügeleisens liegt auch bei 1 kW), so ergibt sich nach Multiplikation mit der verfügbaren Fläche eine erstaunliche Zahl: Schon für die Bundesrepublik liegt das theoretische Potential der Sonnenstrahlung um einen Faktor 100 über dem aktuellen Verbrauch, und weltweit berechnet man einen Faktor 10 000 für das Verhältnis zwischen der auf die gesamte Erde eingestrahlt Sonnenenergie und dem Weltenergieverbrauch. An Energie mangelt es also nicht. Die Probleme ihrer Nutzung sind jedoch groß und liegen

1. in einer effizienten und kostengünstigen Umwandlung von Sonnenenergie in für menschliche Aktivitäten günstige Energieformen (z.B. Elektrizität) und
2. in einer Speicherung der Sonnenenergie für Nacht- und Winterzeiten.

13.2 Thermische Sonnenkollektoren

Der Energie-Endverbrauch in einem industrialisierten Land setzt sich aus den Energieformen Wärme, mechanische Energie und elektrische Energie zusammen, wie in Tab. 13.1 angegeben:

Umwandlungsprodukt	Anteil am Endverbrauch
Niedertemperaturwärme ($T < 100^{\circ}\text{C}$)	50%
Prozesswärme	20%
Mechanische Energie	20%
Elektrische Energie	10%

Tab. 13.1 Anteil der verschiedenen Energieformen am Endverbrauch in industrialisierten Ländern hier für die Bundesrepublik.

Raumheizung und Warmwasserbereitung sind für den großen Anteil an Niedertemperaturwärme verantwortlich. Da die Sonnenenergie eine geringe Leistung pro Flächeneinheit hat, ist sie ideal geeignet, um in Niedertemperaturwärme umgewandelt zu werden. Das ist auch nichts Neues: In jedem Sommer freuen wir uns an den höheren Temperaturen in Badeseen und Schwimmbädern.

Versuch: Beleuchten einer schwarzen und blanken Metallplatte bzw. Metallküvette (Sonnenkollektor)

Schwarze Flächen werden in der Sonne besonders heiß, weil sie am wenigsten reflektieren. Diesen Effekt nutzt man in den sog. thermischen Sonnenkollektoren zur Erhitzung von Wasser aus. Diese erreichen bei der Umwandlung der Sonnenstrahlung relativ hohe Wirkungsgrade - typischerweise zwischen 60 und 75%. Funktional zentraler Bestandteil des Kollektors ist der Solarabsorber, der die Strahlungsenergie der Sonne in Wärme umwandelt, wobei Temperaturen von über 200°C auftreten können. Diese Wärme wird an einen ihn durchfließenden Wärmeträger weitergegeben, aus dem Kollektor abgeführt und anschließend als Heißwasser gespeichert oder direkt verwendet. Um die unvermeidlichen Wärmeverluste zu reduzieren, ist eine gute Wärmedämmung des Absorbers gegenüber der Umgebung notwendig. Die Abbildung Abb. 13. zeigt das Schema eines Solarabsorbers.

13.3 Photovoltaik

Damit ein elektrischer Strom fließt, benötigt man eine Spannung, die man durch die Trennung von positiver und negativer Ladung erhalten kann. Bei der direkten Umwandlung von Sonnenstrahlung in elektrische Energie (also ohne den Umweg über Wärme) macht man genau das. Der entsprechende Prozess heißt Photovoltaik.

Im Prinzip handelt es sich um den schon von Einstein erklärten Photoeffekt. Ein Lichtquant genügend großer Quantenenergie überträgt seine Energie auf ein in einem Festkörper gebundenes Elektron, wobei dieses seinen Zustand verändert. Beim Photoeffekt bestrahlt man Metalle, wobei die übertragene Energie so groß ist, dass das Elektron das Metall verlassen kann. Bei der Photovoltaik benutzt man Halbleiter, wobei das zunächst im Valenzband gebundene Elektron in das Leitungsband gehoben wird und sich dort frei bewegen kann. In einem p-n-Übergang existiert schon vor der

Bestrahlung in der Grenzschicht ein elektrisches Feld, das nun die durch die Strahlung erzeugten Elektron-Lochpaare trennt. Auf diese Weise entsteht eine Spannung zwischen der p und der n-Schicht, die von außen abgegriffen werden kann.

Die mit Solarzellen in der Photovoltaik erzielten Wirkungsgrade reichen von wenigen Prozent (beispielsweise etwa 6 % für Cadmium-Tellurid-Solarmodule) bis hin zu über 35% (Konzentrator-Mehrschicht-Laborexemplar). Die Wirkungsgrade marktüblicher Solarmodule liegen zwischen 6% (Dünnschichtmodule) und 17,7 % (monokristalline Module). Wie wir oben gesehen haben, liegt die theoretische Grenze für den Wirkungsgrad bei 95%. Wenn die Photovoltaik sich noch nicht so durchgesetzt hat, wie man es sich wünschen würde, liegt das wesentlich an den Kosten für die Herstellung der Solarzellen, genauer an den Installationskosten im Verhältnis zur Ausbeute. Die folgende Tabelle gibt einen Vergleich für die Kosten, die bei den verschiedenen Energieformen auftreten.(aus Wikipedia Photovoltaik)

	Photovoltaik	Steinkohle	Wind (onshore)	Wind (offshore)
spez. Investitionskosten (in €/kWp)	4200	1200	1000	1500
jährliche Volllaststunden (in h/a)	1000	4000	2000	4000
jährliche Betriebskosten (fix) (bez. Inv.)	0,5 %	4 %	2 %	2 %
Brennstoffkosten + dynamische Betriebskosten (in ct/kWh)	-	3	-	-

Aus dieser Tabelle erkennt man, dass bei der Photovoltaik die Investitionskosten pro installierter Peak-Leistung (in kW_p) um einen Faktor 3 bis 4 höher sind als die bei Steinkohle und Windenergie. Weiterhin ist die Sonnenenergie auch in der Zahl der jährlichen Volllaststunden um einen Faktor 2 bis 4 benachteiligt.

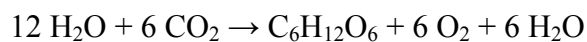
Versuch: Solarzelle

13.4 Photosynthese

Als Beispiel für die Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Energie haben wir die Photosynthese gewählt, die Methode, die die Natur entwickelt hat. Es ist interessant zu erfahren, welche Wirkungsgrade sie erreicht. Außerdem basiert unsere Nahrungskette auf der Photosynthese. In steigendem Maße werden auch fossile Energieträger (die natürlich auch aus diesem Prozess stammen) durch nachwachsende Biomasse ersetzt werden müssen.

Die Photosynthese kann in drei Schritte untergliedert werden. Im ersten Schritt wird die elektromagnetische Energie in Form von Licht unter Verwendung von Farbstoffen (Chlorophylle, Phycobiline, Carotinoide, Bacteriorhodopsin) absorbiert, indem ein in diesen Substanzen gebundenes Elektron in einen höheren Energiezustand gehoben wird. Direkt hieran anschließend erfolgt im zweiten Schritt eine Umwandlung der elektronischen Anregungsenergie in chemische Energie, d.h. in eine neue, energiereichere Verbindung. Im letzten Schritt wird diese chemische Energie zur Synthese energiereicher organischer Verbindungen verwendet, die den Lebewesen sowohl im Baustoffwechsel für das Wachstum als auch im Energiestoffwechsel für die Gewinnung von Energie dienen.

Die Synthese dieser Stoffe geht überwiegend von der sehr energiearmen anorganischen Kohlenstoff-Verbindung Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus. In jedem Fall müssen diese Ausgangsstoffe reduziert werden. Als Reduktionsmittel dienen oxidierbare Stoffe z.B. Wasser (H₂O). Die Gesamtreaktion der Photosynthese lässt sich im Fall von CO₂ als Ausgangsstoff allgemein und vereinfacht wie folgt formulieren:



Bei der Photosynthese werden nacheinander zwei Lichtquanten, eines im Roten ($\lambda = 700 \text{ nm}$) und eines im Blauen ($\lambda = 400 \text{ nm}$) absorbiert, während das grüne Licht nicht absorbiert wird, weshalb die Pflanzen grün erscheinen. Wir wollen nicht weiter in die Chemie dieses Prozesses eindringen, sondern den elementaren und den globalen Wirkungsgrad des Prozesses betrachten.

Versuch: Absorptionsspektrum von Chlorophyll

Der Wirkungsgrad für Absorption der Photonen und die Umwandlung ihrer elektromagnetischen Energie in chemische Energie ist relativ groß, er beträgt für das blaue Licht 20% und für das rote sogar 35%.

Für die Berechnung des globalen Wirkungsgrades der Photosynthese (manchmal auch globale Effektivität genannt) wird die jährliche Nettoprimärproduktion an Biomasse zur Energie der jährlich einfallenden Sonnenstrahlung ins Verhältnis gesetzt. Dabei gehen viele Faktoren ein, z..B, auch die suboptimale Kohlenstoffdioxid- oder Wasserkonzentration. Man findet für den globalen Wirkungsgrad Werte von 1,4 bis 4,3% über kurze Zeit, d.h. in der Wachstumsphase, je nach Pflanze (Biomasseproduktion 11 bis 54 g m⁻² d⁻¹) und über ein ganzes Jahr je nach Pflanze und geografischer Lage Werte von 0,1 bis 2,4 %.

Diesen Wert wollen wir mit dem entsprechenden Wirkungsgrad der Solarzellen vergleichen: Bei einem Wirkungsgrad von 12%, einer Volllast von 1000h/a ergibt sich ein Wert von 1 % , der mit dem der der Photosynthese vergleichbar ist.

13.5 Nutzung der Windenergie

Im Grunde ist Windenergie auch eine Form der Sonnenenergie, da die Winde durch lokale Temperatur- und damit Druckunterschiede entstehen. Wir wollen zunächst einmal untersuchen, in welchen Größenordnungen die Windenergie auf der Erde zur Verfügung steht, und sie mit der Energie der Sonnenstrahlung vergleichen. Bei Wind mit der Geschwindigkeit u steckt die Energie in der Bewegung. Windenergie ist kinetische Energie, wobei eine Volumeneinheit V eine nutzbare Energie von $E = \frac{1}{2}$

$\cdot \rho \cdot V \cdot u^2$ enthält. Da pro Zeiteinheit die durch eine senkrecht gegen die Windrichtung aufgestellte Fläche A eine Luftmasse $M = A \cdot u \cdot \rho$ fließt, berechnet sich die vom Wind auf eine Flächeneinheit „eingestrahlte“ Leistung zu

$$P_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^3.$$

Man beachte, dass diese Leistung mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit wächst. Bei welcher Geschwindigkeit ist die Windleistung P_W gleich der effektiven Solarkonstante von 1 kW/m^2 ? Erst bei einer Geschwindigkeit von $u = 11,5 \text{ m/s}$ oder 41 km/h wird diese Windleistung erreicht. Aus der Abb. sieht man, dass solche Windgeschwindigkeiten in Deutschland erst oberhalb der höchsten Berge oder über dem Meer auftreten. Im Allgemeinen muss man deshalb mit wesentlich kleineren Geschwindigkeiten rechnen, was wegen der u^3 -Abhängigkeit stark negativ zu Buche schlägt.

Die maximale Nutzenergie hängt von dem Leistungsbeiwert c_p der Anlage, einer Art Wirkungsgrad, ab. Die Luft, die mit der Geschwindigkeit u die Rotorblätter anströmt, wird auf die Geschwindigkeit v abgebremst, woraus ein Staudruck auf die Rotorblätter ausgeübt wird. Der Leistungsbeiwert c_p für die Nutzung hängt von den Geschwindigkeiten u und v ab nach

$$c_p = (1+v/u) \cdot (1-v^2/u^2)/2 < 0,59$$

und nimmt seinen Maximalwert für $v = u/3$ an. Moderne Windkraftanlagen kommen auf einen Leistungsbeiwert von $c_p = 0,45$ bis $0,51$.

Die heutigen Windkraftanlagen zur Stromerzeugung sind aerodynamisch angetriebene Anlagen. Man unterscheidet Schnell- und Langsamläufer, wobei der Unterschied in dem Verhältnis $\lambda = \text{Geschwindigkeit der Blattspitzen der Rotoren} / \text{Windgeschwindigkeit}$ liegt. Dieses Verhältnis bestimmt auch die Form der Rotorblätter. Während bei den Langsamläufern ($\lambda < 1$) die Rotoren als Schaufeln ausgelegt sind (z.B. bei den früheren Windmühlen), sind die heutigen Windkraftanlagen als Schnellläufer konstruiert und erreichen bei einer Schnelllaufzahl von $\lambda = 7$ bis 8 den größten Wirkungsgrad. Daraus resultieren Blattspitzengeschwindigkeiten in der Größenordnung von etwa 250 bis 300 km/h . Ihre Rotoren gleichen den Flugzeugpropellern und arbeiten nach dem Auftriebsprinzip. Die heute übliche Zahl von drei Rotorblättern hat konstruktive Gründe: Die auftretenden mechanischen Belastungen sind leichter zu beherrschen als bei Ein-, Zwei- oder Vierblattrotoren. Die Werte für die heutigen Rotordurchmesser liegen zwischen 40 und 90 m .

Die Nutzung der Windenergie wächst in Deutschland schnell. Heute wird schon etwa $5-6 \%$ der elektrischen Energie in Windenergieanlagen gewonnen (Abb.)

Einige statistische Angaben zur Windenergie in Deutschland für die Jahre 2001 bis 2006

	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Stromverbrauch gesamt (TWh)	580,5	581,7	588,0	600,6 ^{a)}	610,0	540,0
Windstromerzeugung (TWh)	10,7 (1,8 %)	16,5 (2,8 %)	18,6 (3,2 %)	25,0 (4,2 %) ^{a)}	26,5 (4,3 %)	30,5 (5,6 %) ^{b)}
installierte Anlagenleistung am Jahresende (GW)	8,7	11,8	14,6 ^{d)}	16,6 ^{d)}	18,4 ^{d)}	20,6 ^{d)}
Anlagenzahl am Jahresende; d)	11.438	13.759	15.387 ^{d)}	16.543 ^{d)}	17.574 ^{d)}	18.685 ^{d)}
durchschnittl. Nennleistung pro Anlage (kW)	763	864	949 ^{d)}	1.005 ^{d)}	1.049 ^{d)}	1.103 ^{d)}
scheinbare durchschnittl. Auslastung (% der Nennleistung) ^{c)}	14,0	16,0	14,5	17,1	16,6	17,3
<p>Quelle: VDN/VdEW, DEWI, ^{a)} Schätzung AGEE-Stat, ^{b)} VDEW, ^{c)} Wert zu gering, da bei Jahreswerten der anteilige Beitrag der Neuinstallationen nicht korrigiert wird, ^{d)} DEWI</p>						

Versuch: Modell eines Windrads

13.6 Offenes Problem bei der Nutzung der Sonnen- und Windenergie: Speicherung

Das Hauptproblem bei der Nutzung von Sonnen- und Windenergie, jedenfalls in unseren Breiten, besteht in ihrer Unzuverlässigkeit. Wir wissen selbst, wie oft sich Sonnenschein und Wind täglich und auch jährlich verändern. Damit verändert sich auch die Leistung der Sonnen- und Windkraftanlagen. Eine Industriegesellschaft ist jedoch auf eine konstante und zuverlässige Bereitstellung von Energie angewiesen. Abb. zeigt für eine gewisse Periode die Windenergieeinspeisung im Vergleich zum gesamten Energiebedarf. Achtung: Die Skalen für die beiden Energien sind verschieden!

Die „Unzuverlässigkeit“ der Sonnen- und Windenergie spielt heute noch keine große Rolle, da sie relativ zum Gesamtverbrauch wenig Leistung in das Netz einspeisen. Dennoch müssen die Energieversorger immer schnell ein- und abschaltbare

Kraftwerkkapazitäten bereithalten, um die Schwankungen auszugleichen. Kohle- und Kernkraftwerke sind relativ träge, weshalb man heute verstärkt auf Wasserkraft (u.U. aus Speicherseen) oder auf Gasturbinen (neuerdings auch auf der Basis komprimierter Luft), setzt, um Spitzenlast aufzufangen.

Eine ganz wichtige Aufgabe für die künftige Nutzung der Sonnen- und Windenergie besteht darin, geeignete Medien zu finden, die die Energie speichern, die bei günstigem Wetter anfallen, um sie dann abzurufen, wenn man sie braucht. Es werden viele Möglichkeiten verfolgt, u.a. die Speicherung in chemischer oder elektrischer Form, als Wärme oder als kinetische Energie. Es hat sich noch kein ideales Verfahren durchgesetzt.

13.7 Biographie: Paul Crutzen (* 1933)

"Heute wissen wir eigentlich genug, um zu sagen, dass die Menschheit so nicht weitermachen darf."

Paul Crutzen zum unverändert hohen Kohlendioxid-Ausstoß

Wir möchten nun den Lebenslauf eines Mannes vorstellen, der nicht unmittelbar auf dem Gebiet der Sonnen- und Windenergie gearbeitet hat, aber zu den führenden Atmosphären- und Klimaforschen gehört. Er hat u.a. die Ursache für das Ozonloch entdeckt, wofür er im Jahre 1995 zusammen mit seinen Kollegen Mario Molina und Frank Sherwood Rowland den Nobelpreis für Chemie erhalten hat.

Geboren wurde Paul Crutzen in Amsterdam, doch von seiner Abstammung vereinigte er einige Nationalitäten in seinem Blut. Sein Vater stammte aus einer kleinen holländischen Stadt in der Nähe von Aachen, also aus dem Dreiländereck Deutschland-Belgien-Holland. Er hatte Verwandte in allen drei Ländern. Die Vorfahren der Mutter waren teils deutscher, teils polnischer Herkunft; sie waren gegen Ende des 19. Jahrhunderts aus Ostpreußen ins Ruhrgebiet gezogen. Von dort war die Mutter von Paul mit 17 Jahren nach Amsterdam gegangen, um dort als Haushaltshilfe zu arbeiten. Hier traf sie Jozef Crutzen, den sie einige Zeit später heiratete. Aus der Ehe gingen zwei Kinder hervor, Paul und seine Schwester.

Ein einschneidendes Ereignis in Pauls Kindheit war die Besetzung der Niederlande durch die deutschen Truppen im Jahre 1940. So wurde seine Grundschulzeit geprägt durch die Kriegswirren. Das Schulgebäude war von der deutschen Wehrmacht konfisziert und der Unterricht musste in verschiedenen Ausweichquartieren in Amsterdam abgehalten werden. Besonders schrecklich war die Zeit gegen Ende des Krieges – von Herbst 1944 bis zum Tag der Befreiung im Mai 1945. Im sog. Hungerwinter gab es kaum Nahrungsmittel und Heizmaterial. Da auch das Trinkwasser knapp wurde, verschlechterten sich die hygienischen Verhältnisse immer mehr. In diesen Monaten starben viele Menschen, so auch etliche von Pauls Schulkameraden. Die Lage wurde etwas besser, als Anfang 1945 das Schwedische Rote Kreuz Nahrungsmittel mit Fallschirmen über Holland abwarf. In dieser Zeit gab es keinen geregelten Unterricht



und nur sehr wenige Schüler - unter ihnen Paul - konnten die Grundschule beenden, ohne ein weiteres Jahr anhängen zu müssen.

Im Jahre 1946 ging Paul Crutzen dann nach bestandener Aufnahmeprüfung auf die sog. "Höhere Bürgerschule", eine Mittelschule, die in einem 5-jährigen Unterrichtsgang die Schüler auf die Universität vorbereitete. In dieser Schule wurde besonderer Wert auf die naturwissenschaftlichen Fächer gelegt, was nicht ausschloss, dass die Schüler außerdem 3 Fremdsprachen erlernen mussten: Englisch, Französisch und Deutsch. Für Paul waren hierfür die Eltern eine große Hilfe, die Mutter für Deutsch, der Vater für Französisch. So ist es nicht verwunderlich, dass der Junge in den Fremdsprachen sehr gute Leistungen zeigte. Seine Lieblingsfächer jedoch waren Mathematik und Physik, die Chemie konnte ihn damals noch nicht begeistern.

Während der Schulzeit war Paul auch gern sportlich aktiv: er spielte gern Fußball, fuhr Rad und nahm im Winter mit Begeisterung an Schlittschuhläufen über große Distanzen auf den holländischen Kanälen teil. Außerdem spielte er mit Vergnügen Schach und las gern Bücher zu verschiedensten Themen. Unglücklicherweise befiel ihn während der Abschlussprüfung ein heftiges Fieber, so dass seine Noten nicht für ein Universitätsstipendium ausreichten. In der damaligen Zeit wurden nur wenige Stipendien vergeben, da in Holland die Mittel relativ knapp waren.

Paul Crutzens Eltern lebten damals in bescheidenen Verhältnissen; der Vater arbeitete als Kellner und war des öfteren arbeitslos, die Mutter hatte eine Stelle in der Küche eines Krankenhauses. Um nun die Eltern nicht länger finanziell zu belasten, verzichtete Paul auf die Universität und ging stattdessen auf die "Middelbare Technische School", eine Akademie zur Ausbildung von Ingenieuren. Der dreijährige Ausbildungsgang enthielt ein praktisches Jahr, in dem er soviel Geld verdiente, dass er zwei Jahre davon leben konnte.

Nach dem Examen arbeitete Crutzen von 1954 bis 1958 bei einer Amsterdamer Brückenbaufirma, die ihn allerdings in dieser Zeit für den 21-monatigen Wehrdienst freistellen musste. Auf einer Ferienreise in die Schweiz traf er die finnische Geschichts- und Literaturstudentin Terttu Soinen, die er im Februar 1958 heiratete. Nach der Hochzeit zog es das junge Paar nach Schweden, wo die beiden sich in Gävle, einer kleinen Stadt 200 km nördlich von Stockholm, niederließen und wo Paul eine Anstellung bei einer Hochbaufirma fand. Nachdem seine Frau zwei Töchter geboren hatte, war für Paul Crutzen das Glück vollkommen. In seiner Autobiographie lobt er seine Frau in den höchsten Tönen als den Mittelpunkt seiner glücklichen Familie. Offen bekennt er, dass er ohne ihre Unterstützung niemals soviel Zeit für seine Studien und die Wissenschaft hätte aufbringen können.

Obwohl sich Crutzen in seinem Beruf als Bauingenieur nicht unwohl fühlte, sehnte er sich doch nach einer akademischen Karriere. Als er dann 1958 eine Anzeige las, in der das Meteorologische Institut der Universität Stockholm einen Programmierer suchte, bewarb er sich ohne zu zögern, auch wenn er keine bis dahin keine Kenntnisse auf diesem Gebiet hatte. Zur damaligen Zeit gab es noch keine benutzerfreundlichen Programmiersprachen und sämtliche Programme mussten im Maschinencode geschrieben werden. Doch Crutzen hatte das Glück, aus einer großen Kandidatenschar ausgewählt zu werden. Er zog nach Stockholm und begann im Juli 1959 in seinem zweiten Beruf zu arbeiten. In dieser Zeit war die Stockholmer Meteorologie sehr angesehen, so dass viele Spitzenforscher für längere Aufenthalte in die schwedische Hauptstadt kamen. So ist es nicht verwunderlich, dass an der Stockholmer Universität

die weltweit schnellsten Computer installiert waren. In diesem Umfeld war Paul Crutzen bis 1966 an verschiedenen meteorologischen Projekten beteiligt, u.a. an den ersten numerischen Wettervorhersage-Programmen.

Da er in einem Institut der Universität arbeitete, gab man ihm die Möglichkeit, Vorlesungen zu besuchen. Dies nutzte er in den Fächern Mathematik, mathematische Statistik und Meteorologie und erfüllte 1963 die Anforderungen, die für ein Master of Science degree gestellt waren. Er hätte gern auch die Fächer Physik und Chemie studiert, doch sein Beruf ließ es wegen der damit zusammenhängenden zeitaufwendigen Praktika nicht zu. So wurde er zunächst ein reiner Theoretiker, auch wenn er sich stark zur experimentellen Arbeit hingezogen fühlte. Dieser Wunsch sollte sich später sowohl am National Center of Atmospheric Research in Boulder als auch am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz noch erfüllen.

Da Crutzen in einem meteorologischen Forschungsinstitut arbeitete, war es nur natürlich, für eine weiterführende Arbeit (philosophie licentiat thesis), die in etwa einer Doktorarbeit glich, ein meteorologisches Thema zu wählen. Obwohl er angeboten bekam, an einer Weiterführung seiner numerischen Modelle zu arbeiten, war er inzwischen mehr an der Chemie der Stratosphäre interessiert. Dieses Interesse war entzündet worden durch die Zusammenarbeit mit einem amerikanischen Wissenschaftler, dem er geholfen hatte, ein numerisches Modell für die Sauerstoffverteilung in verschiedenen Schichten der Atmosphäre zu entwerfen. Obwohl zur damaligen Zeit andere Themen wie z.B. das Problem des "sauren Regens" zu den Forschungsschwerpunkten in Stockholm gehörten, entschied sich Crutzen für das stratosphärische Ozon, ohne zu ahnen, was dabei herauskommen sollte. Mit seinen Arbeiten auf diesem Gebiet promovierte er 1968 im Fach Meteorologie und wurde 5 Jahre später zum Professor an der Universität Stockholm ernannt.

In den Jahren 1974 - 1980 war er zunächst als Mitarbeiter und Berater an verschiedenen Stellen in Boulder tätig, später als Professor am Atmospheric Sciences Department der Colorado State University in Fort Collins und als Direktor der Air Quality Division des National Center of Atmospheric Research (NCAR) in Boulder. Sein weiterer Weg führte ihn dann an das Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz, das nach dem Kriege die Nachfolge des ursprünglich in Berlin gegründeten Kaiser-Wilhelm-Instituts angetreten hatte, das von Otto Hahn, Lise Meitner und Fritz Strassmann durch die Entdeckung der Kernspaltung zu Weltruhm gelangt war. Hier war Paul Crutzen von 1980 bis zu seiner Emeritierung im Jahre 2000 als Leiter der Abteilung "Chemie der Atmosphäre" und von 1983 bis 1985 als Direktor des Instituts tätig. In seiner Abteilung wurden u.a. Laborversuche zur Bestimmung der Absorption von Ultraviolett- und Infrarotstrahlung durch atmosphärische Spurenstoffe durchgeführt, und Prozesse, die an stratosphärischen Partikeln ablaufen, im Labor simuliert. Auf diese Weise gelangte man zu einem Verständnis der Entstehung des arktischen und antarktischen Ozonlochs. Außerdem untersuchte Crutzen im Jahre 1981 im Auftrag der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften die Auswirkungen eines Atomkrieges auf die Atmosphäre. Ab 1987 war er zeitweise auch an anderen Stellen als Professor tätig: und zwar von 1987 - 1991 an der Fakultät für Geophysik der Universität Chicago, von 1992 - 1997 an der Scripps Institution der Universität von Kalifornien in La Jolla und von 1997 - 2000 an der Universität Utrecht.

Paul Crutzen hat viele Preise und Ehrungen erfahren, er ist vielfacher Ehrendoktor und Mitglied vieler wissenschaftlicher Akademien und Vereinigungen, u.a. der Academia

Nazionale die Lincei in Rom, der schon Galilei angehörte. Auch nach seiner Emeritierung ist er weiterhin in vielen Gremien zum Verständnis und Schutz der Umwelt tätig.

Quellen:

1. http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1995/crutzen-autobio.html
2. http://www.allgemeine-zeitung.de/rhein-main/objekt.php3?artikel_id=1302397
3. http://www.chemgapedia.de/vsengine/popup/vsc/de/biography/c/cr/crutzen_00045paul_000451933_0004512_0004503.bio.html
4. <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~elbert/geschichte.htm#crutzen>