Lothar Kolditz

Zur Chemie des Fluors*

1. Fluor im Vergleich zu anderen Elementen

Jedes chemische Element hat im Prinzip eine eigene Chemie. Aber es gibt wenig Elemente wie das Fluor, deren Eigenschaften so herausragen, daß ein umfassender Zweig der Chemie von ihnen geprägt wird. Nach der organischen Chemie mit dem Element Kohlenstoff im Mittelpunkt hat wohl die Fluorchemie besonders in den letzten Jahrzehnten einen hervorragenden Platz unter den Gebieten der Chemie eingenommen, die einem Element zuzuordnen sind. Begründet ist dies durch die besonderen Eigenschaften des Fluors im Vergleich zu anderen Elementen.

Fluor besitzt die höchste Elektronegativität unter allen Elementen, was bedeutet, daß das Fluor in Verbindungen mit anderen Elementen stets als elektronegativer Partner auftritt. Die Elektronendichte der Bindung verlagert sich in Richtung auf das Fluor: $X^{(+)} — F^{(-)}$.

Das Fluoratom selbst hat eine kontrahierte, sehr kompakte Elektronenhülle mit neun Elektronen, die bei Anlagerung eines weiteren Elektrons zur Bildung des einfach negativen Fluoridions etwas aufgeweitet werden muß, was eine Energieaufwendung erfordert. So kommt es, daß die mit diesem Vorgang insgesamt verbundene Energieabgabe relativ niedrig ist, niedriger als die entsprechende Energie des Chlors. Diese Energieabgabe wird Elektronenaffinität genannt. Sie gilt für die Reaktion

$$F + e^- \longrightarrow F^-$$

und ist mit $\Delta H = -335$ kJ/mol vergleichbar mit der des Broms.

Das elementare Fluor kommt als Molekül F_2 vor, in welchem zwei Fluoratome aneinander gebunden sind. Die zur Aufspaltung der F_2-Moleküle in Atome notwendige Energie, die Dissoziationsenthalpie für die Reaktion

$$F_2 \longrightarrow 2F$$

ist mit $\Delta H = 158{,}8$ kJ/mol sehr niedrig. Die höchste Dissoziationsenthalpie unter den Halogenen hat das Chlor, dann folgen mit abnehmender

* Vortrag, gehalten vor der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 15. Dezember 1994.

Enthalpie Brom, Fluor und Jod. Die energetisch leicht zu erreichende Aufspaltung der Fluormoleküle in sehr reaktionsbereite Atome findet Ausdruck in der höchsten Reaktivität, die das Fluor unter allen Elementen besitzt. Es verbindet sich in den meisten Fällen sehr heftig, häufig explosionsartig in direkter Reaktion mit anderen Elementen oder zerschlägt Verbindungen anderer Elemente unter Ausbildung der entsprechenden Fluorverbindungen. Außer mit den Edelgasen Helium und Neon sind Fluorverbindungen mit allen anderen Elementen bekannt.

Die Bindungen des Fluors mit anderen Elementen sind in der Regel sehr stark, sie bilden sich unter hoher Energieabgabe und sind daher sehr stabil, also nur mit einem entsprechenden Energieaufwand wieder zu lösen. Mit Kohlenstoff bildet das Fluor die stärksten Einfachbindungen aus. Die Bindungsenthalpie der C-F-Bindung übertrifft mit 485 kJ/mol sogar die der C-H-Bindung, deren Wert 413 kJ/mol beträgt. Für die C-Cl-Bindung gilt ΔH = 339 kJ/mol.

Der Raumbedarf des Fluors in seinen Verbindungen hängt vom jeweiligen Charakter der Bindung ab. In anorganischen Verbindungen ist das Fluor in der Größe mit Sauerstoff vergleichbar. So ist es nicht verwunderlich, daß in weit verbreiteten und häufig vorkommenden Silicatmineralien, die neben Si-O-Bindungen auch OH-Gruppen enthalten, Fluor zum Teil die OH-Gruppen ersetzt. Das gilt auch für OH-Gruppen in Phosphatmineralien wie Phosphorit und Apatit.

Das wichtigste natürliche Fluormineral ist der bereits von AGRICOLA beschriebene Flußspat, das Calciumfluorid CaF_2, dessen Eigenschaft, bei der Verhüttung von Erzen in der Hitze mit Silicaten zu reagieren und dabei eine leicht schmelzende Schlacke auszubilden, von alters her genutzt wird, wovon auch der Name für das Element abgeleitet wurde (fluere = fließen). Fluor ist unter den Halogenen das häufigste Element. Es übertrifft sogar das in den Meeren und riesigen Salzlagerstätten vorkommende Chlor.

In organischen Kohlenstoff-Verbindungen ist der Raumbedarf des Fluors mit Wasserstoff vergleichbar, was die Überführung sämtlicher H-haltiger Kohlenstoff-Verbindungen in entsprechende C-F-Verbindungen ohne Auftreten sterischer Probleme ermöglicht. Solche Verbindungen sind spezifisch schwerer als die C-H-Verbindungen, da das Fluoratom 19mal schwerer als der gewöhnliche Wasserstoff ist.

Bei einer derartig umfangreichen Chemie ist es nicht möglich, in diesen Ausführungen das gesamte Gebiet der Fluorchemie zu behandeln. Die Beschränkung soll deshalb auf Kohlenstoff-Fluor-Verbindungen erfolgen, also auf das häufig als organische Fluorchemie bezeichnete Gebiet. Der Name ist nicht voll zutreffend, weil die Kohlenstoff-Fluor-Chemie doch von

der organischen Chemie abweichende Aspekte aufweist. Betrachtungen der anorganischen Fluorchemie müssen einem späteren Beitrag vorbehalten bleiben.

Durch die hohe Elektronegativität, also die Eigenschaft, in allen seinen Bindungen Elektronen anzuziehen, verändert gebundenes Fluor viel stärker als andere Elemente die Reaktionseigenschaften von benachbarten Bindungen. In der Regel tritt eine Reaktivitätserhöhung ein, was die hohe physiologische Wirksamkeit von Kohlenstoff-Verbindungen mit niedrigem Fluorgehalt erklärt.

Ein Beispiel dafür ist das Natriummonofluoroacetat FCH_2COONa, das Natriumsalz der Monofluoroessigsäure, die sich von der Essigsäure durch den Ersatz eines Wasserstoffatoms durch Fluor unterscheidet. Die Verbindung kommt in der in Südafrika beheimateten Pflanze *Dichapetalum cymosum* vor und wurde in weiteren etwa 30 Pflanzenarten festgestellt, z. B. in der australischen Pflanze *Acacia georginae*.Es handelt sich um eine außerordentlich giftige wasserlösliche Verbindung. Für die Ratte wurde ein LD_{50} -Wert von 0,2 mg/kg ermittelt. Für Menschen wirken wenige hundert Milligramm tödlich. Die Wirkung besteht in einem Eingriff in den Zitronensäurezyklus, der Citrat-Transport in den Mitochondrien wird inhibiert [1].

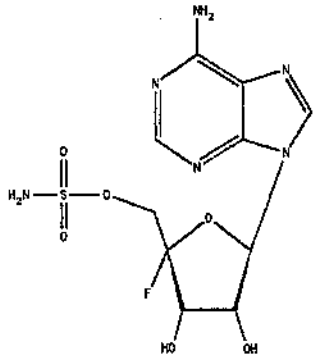


Abbildung 1 Nucleocidin (Antibiotikum)

Bis zur Entdeckung des natürlichen Vorkommens von Monofluoroacetat in den 40er Jahren war die Ansicht verbreitet, daß Fluor-Kohlenstoff-Verbindungen nur im Labor unter besonderen Bedingungen herstellbar sind. Inzwischen sind weitere Vorkommen bekannt, so das Antibiotikum Nucleocidin, das von Strahlenpilzen der Gattung *Streptomyces* produziert wird [2],[3].

2. Fluorpharmaka

Bei der hohen physiologischen Wirksamkeit niedrigfluorierter Kohlenstoff-Verbindungen ist es nicht verwunderlich, daß eine große Vielfalt von Fluorpharmaka gefunden wurde und in Anwendung ist. In jeder therapeutisch-pharmazeutischen Klasse sind fluorhaltige Heilmittel bekannt. Die Erforschung von Nebenwirkungen muß bei diesen Verbindungen besonders sorgfältig betrieben werden, vor allem ist

wesentlich, daß keine Bildung von Monofluoroessigsäure beim Abbau eintritt.

Eingehend untersucht sind vor allem fluorhaltige Steroide. Als Beispiel wird das entzündungshemmende Betamethason genannt, dessen Wirkung offensichtlich auf der Aktivierung der am Nachbar-C zur C-F-Bindung stehenden OH-Gruppe beruht.

Das Antimykotikum Fluoconazol erhält seine Aktivierung durch ortho- und paraständig am aromatischen Ring gebundenes Fluor. Da gefährliche Pilzinfektionen ansteigen und auch bei Aids häufig Pilzerkrankungen folgen [4], erlangt das gegen Pilze hochwirksame Fluoconazol immer größere Bedeutung.

Das antibakteriell breit wirkende Ciprofloxacin ist ein Gyrasehemmer. Bei dieser Verbindung aktiviert aromatisch gebundenes Fluor offensichtlich den Piperazinring.

Im Flunitrazepam steht ein Sedativum und Hypnotikum mit längerer Wirkungsdauer zur Verfügung

Das schon viele Jahre bekannte Cancerostatikum 5-Fluorouracil ist leider mit starken Nebenwirkungen behaftet. Es wird modifiziert angewendet durch Einfügen eines Zuckers (Pentose) am unteren Stickstoff.

Fluoxetin, ein Antihypotonikum, hat als Aktivierung eine CF_3-Seitenkette am aromatischen Ring. Es gehört wie auch Ciprofloxacin zu den 20 Pharmaka, deren Weltumsatz eine Milliarde Dollar im Jahr erreicht [5].

Damit wurden nur einige wenige Fluorpharmaka genannt, um auf typische Aktivierungskonstellationen hinzuweisen. Bei derartig komplizierten Verbindungen

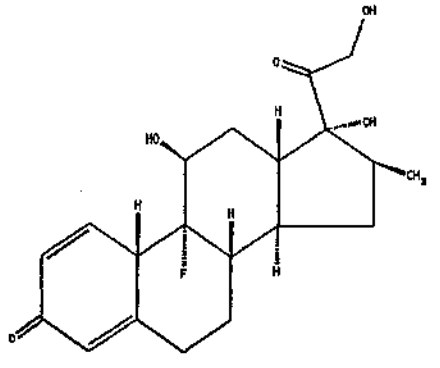


Abbildung 2: Betamethason (entzündungshemmend)

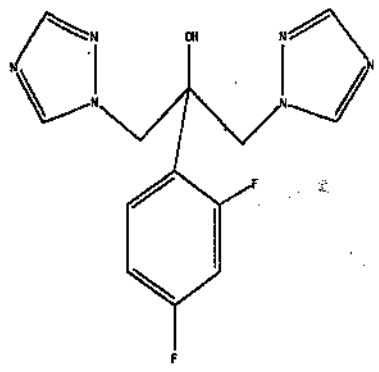


Abbildung 3:
Fluoconazol (Antimykotikum)

ist die vom Fluor ausgehende Wechselwirkung mit Reaktionsstellen im Molekül nicht allein durch einfachen Elektronenzug in Richtung auf das Fluor erklärbar. Es gibt gegeneinander wirkende Effekte, in die auch andere Gruppen des Moleküls einbezogen sind. Nicht nur Reaktivitätsveränderungen infolge Fluorsubstitution, sondern auch Beeinflussung der Löslichkeit ist für die Wirkung der Substanzen ausschlaggebend. Die Vielfalt der Fluorpharmaka eröffnet aber die Möglichkeit eines systematischen Studiums der Bindungsbeeinflussung. Es ist leicht möglich, einen Katalog an C-F-Modellsubstanzen aufzustellen, die

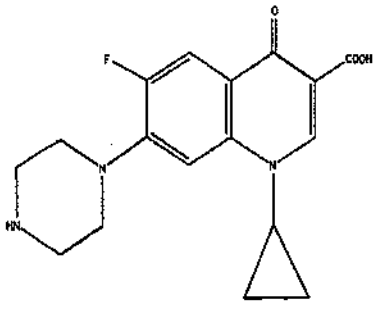


Abbildung 4: Ciprofloxacin
(Gyrasehemmer, antibakteriell)

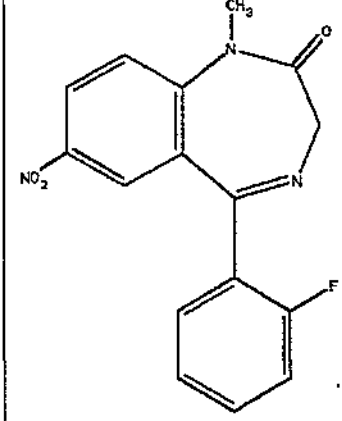


Abbildung 5: Flunitrazepam
(Sedativum, Hypnotikum)

charakteristische Merkmale der bereits erprobten Fluorpharmaka aufweisen, etwa Fluor in aliphatischer Kette, in ungesättigter Kette an verschiedenen Positionen, Ketten mit isolierten Doppelbindungen, mit konjugierten Doppelbindungen, Fluor in zyklischen Verbindungen unter Beachtung der verschiedenen sterischen Möglichkeiten, Fluor in aromatischen Systemen, Fluor in anellierten Ringsystemen usw. Viele

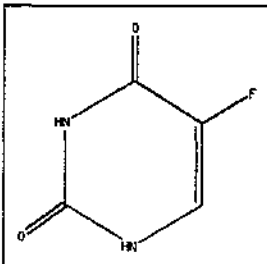


Abbildung 6: 5-Fluorouracil (Cancerostatikum)

solcher Verbindungen sind bekannt und auch hinsichtlich ihrer Molekülparameter wie Bindungsabstände und Winkel vermessen.

Fehlende Messungen sind ohne Schwierigkeiten zu ergänzen. Mit den heute zur Verfügung stehenden quantenchemischen Rechenmethoden ist es damit erreichbar, Parameter wie Ladungsverteilungen an reaktiven Stellen, Bindungsenergien und elektronische Strukturen, also für reaktives Verhalten relevante Werte zu ermitteln und mit entsprechenden Ergebnissen fluorfreier Verbindungen zu vergleichen.

Spektroskopische Messungen an reinen Verbindungen und an ihren Lösungen in verschiedenen Substanzen geben Auskunft über bindungsbezogene Wechselwirkungen, die durch Zugabe reaktiver Verbindungen weiter erforscht werden können. Die Messungen lassen sich durch Rechnungen ergänzen, wobei Kernresonanzverfahren (^{19}F, ^{13}C, ^{1}H; vgl. Abschnitt 4) besonders geeignet erscheinen.

Das Programm ist dann zu erweitern unter Einbeziehung anderer Funktionen (N, O), die in den bekannten Fluorpharmaka eine Rolle spielen. Aus einem Vergleich der Ergebnisse mit den festgestellten Eigenschaften der Fluorpharmaka sind Hinweise auf deren Wirkungsmechanismus zu erwarten, aber auch Richtlinien für eine Verbesserung der Arzneimittel und für Neuentwicklungen. Auf dieser Grundlage können Betrachtungen zum Abbau der Substanzen angestellt werden, die entsprechende Untersuchungen befruchten. Die bisher angewendeten Regeln zur Aktivierung von Bindungen durch Fluor wären zu ergänzen und auf eine solide Grundlage zu stellen, sicherlich auch zum Vorteil für die synthetische Chemie. Ein solches Programm war im Zentralinstitut für Anorganische Chemie der Akademie der Wissenschaften der DDR entworfen, die Durchführung wurde mit der Liquidierung der For-

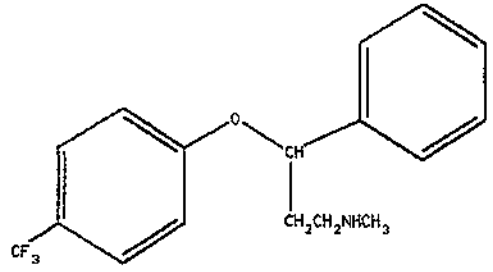


Abbildung 7: Fluoxetin (Antihypotonikum)

schungseinrichtung abgebrochen.

3. Perfluorierte Kohlenstoff-Verbindungen

Jeder Kohlenwasserstoff kann prinzipiell in die entsprechende perfluorierte Substanz überführt werden, in der jedes H-Atom durch Fluor ersetzt ist. Sterische Probleme entstehen dabei nicht, und erwartungsgemäß sind die Perfluorkohlenstoffe wegen der hohen Stärke der C-F-Bindung sehr stabil und reaktionsträge (vgl. S. 1). Eine unvollständige Fluorierung aktiviert den Restwasserstoff. Das gilt besonders für größere Moleküle mit Fluorübergewicht. Die Verbindung (Abb. 8) ist wasserlöslich und bildet eine stärkere Säure als HNO_3. Unterstützend wirkt dabei die Aromatisierung des Ringes bei Abspaltung eines Protons.

Perfluoroalkylamine zeigen im Gegensatz zu ihren H-analogen Verbindungen keine Basizität, da das Elektronenpaar am Stickstoff vom Elektronensog der Fluoratome beeinflußt wird. Auch perfluorierte Ether lagern keine Protonen an. Interessant ist die Eigenschaft perfluorierter Kohlenstoff-Verbindungen, eine hohe Löslichkeit für Gase wie Sauerstoff und Kohlendioxid zu besitzen. In Zusammenhang mit ihrem inerten Verhalten eignen sie sich damit als Grundsubstanzen für die Erzeugung von Flüssigkeiten, die in der Lage sind, wenigstens kurzzeitig die gastransportierende Funktion des Blutes zu übernehmen. In den 60er Jahren sorgte die Veröffentlichung von CLARK und GOLLAN [6] für Aufsehen, die zeigten, daß z. B. Mäuse, untergetaucht in einer mit Sauerstoff bei Atmosphärendruck gesättigten Perfluorcarbon-Verbindung, überleben können.

Perfluoroamine und Perfluoroether sind wie Perfluorocarbone hydrophob. Sie sind also nicht direkt in Verbindung mit Blut einsetzbar, sondern müssen unter Anwendung von Emulgatoren in eine geeignete Tröpfchenemulsion überführt werden, die mit Blut mischbar ist. In den 70er Jahren brachte die GREEN CROSS CORPORATION in Japan die ersten Perfluorocarbon-Emulsionen (Fluosol DA) heraus, die Perfluorodekalin $C_{10}F_{18}$ und Perfluoropropylamin $N(C_3F_7)_3$, emulgiert in einer Elektrolytlösung, enthielten. Sie wurden an freiwilligen Patienten in Japan, in den USA und in Kanada erprobt. Unter den Patienten befanden sich auch solche, die aus religiösen Gründen eine Transfusion mit natürlichem Blut auch in lebens-

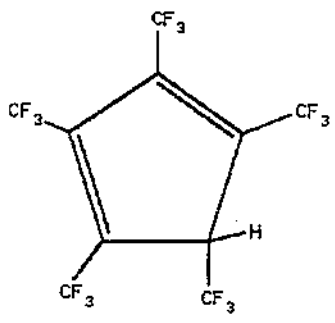
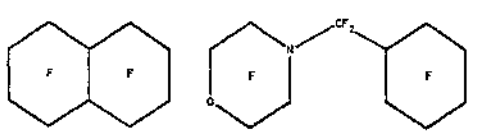


Abbildung 8

bedrohlicher Situation ablehnen. Danach erfolgte weltweit die Bearbeitung des Gebietes mit großer Intensität auch in anderen Ländern, so in Frankreich, Rußland, China und in Deutschland [7].

Die Emulsionen wurden in der Handhabbarkeit verbessert. Mußte Fluosol DA noch in zwei Mischungen bei niedrigen Temperaturen aufbewahrt werden, die kurz vor Anwendung vereinigt wurden, so bestehen spätere Emulsionen aus einer Mischung, die längere Zeit auch bei Raumtemperatur stabil bleibt. Die schon im Fluosol DA vorhandene Stickstoffkomponente verbessert die Emulgiereigenschaften des Gemisches. Das Amin wurde durch andere physiologisch günstigere Stickstoff-Verbindungen ersetzt, z.B.durch Perfluorocyclohexylmethylmorpholin,. Perfluorodekalin behauptete sich als Grundsubstanz, eine parallele Verwendung findet Perfluorooctylbromid. Die als Hauptkomponenten angewendeten Perfluorverbindungen müssen mit ihrem Dampfdruck, der mit der Molekülmasse in direktem Zusammenhang steht, in einem bestimmten Bereich liegen, damit die Ausscheidung der Perfluorkomponenten aus dem Körper gewährleistet ist, die im wesentlichen über die Lunge und zum Teil auch über die Haut erfolgt.

Ein wichtiger Parameter für ungestörtes Funktionieren ist die Tröpfchengröße der emulgierten Perfluorverbindungen. Sie hängen mit dem verwendeten Emulgator zusammen. Im Normalfall wachsen größere Tröpfchen auf Kosten der kleineren (Ostwald-Reifung) umso schneller, je höher die Temperatur liegt. Die Emulsion wird instabil. Aber auch vor der Instabilität besteht Gefahr bei der Anwendung, falls die Tröpfchen über einen mittleren Durchmesser von 250 nm hinauswachsen. Das Immunsystem des Körpers sieht die größeren Teilchen dann als Viren an und geht zu Abwehrreaktionen über. Eine wesentliche Entwicklung besteht in der Verwendung von Phospholipiden zur Umhüllung von Perfluorocarbon-Verbindungen, wobei sich stabile Tröpfchen oder Vesikeln der genannten Größenordnung bilden [8]. Die Größe der Vesikeln hängt von den oberflächenaktiven Eigenschaften der Komponenten (Phospholipid und Perfluorocarbon-Verbindungen) ab und unterliegt nicht mehr der beschriebenen Ostwald-Reifung.



Perfluorodekalin, $C_{10}F_{18}$
Perfluorocyclohexylmethylmorpholin, $C_{11}F_{21}ON$
Perfluorooctylbromid, $CF_3CF_2CF_2CF_2CF_2\ CF_2CF_2CF_2Br$

Abbildung 9

Die Vesikelbildung eröffnet die Möglichkeit, eine relativ hohe Konzentration an Perfluorverbindungen in der Emulsion aufrechtzuerhalten, was eine ausreichende Transportkapazität für Sauerstoff und Kohlendioxid gewährleistet. Die Löslichkeitskurve für Sauerstoff in Abhängigkeit vom Partialdruck hat für Blut wegen der schwachen chemischen Bindung zwischen Sauerstoff und Hämoglobin die Gestalt einer S-Kurve (Bild 1, Kurve A). Die physikalische Löslichkeit des Sauerstoffs in Perfluorocarbon-Verbindungen wird dagegen durch eine Gerade repräsentiert (Henrysches Gesetz). Ausreichende Sauerstoffversorgung von Zellgeweben ist bei Anwendung von herkömmlichen Emulsionen daher nur durch Beatmung mit sauerstoffangereicherter Luft (Bild 1, Kurve B) oder bei weiter entwickelten Emulsionen durch eine hohe Perfluorocarbon-Konzentration (Bild 1, Kurve C) zu bewerkstelligen. Puffersubstanzen und Elektrolyte sorgen in der Emulsion für den richtigen pH-Wert und osmotischen Druck. Bei Blutverlust könnte eine solche Emulsion durchaus die Transportfunktion für Sauerstoff und Kohlendioxid eine gewisse Zeit übernehmen. Ein voller Blutersatz ist es nicht, denn Immunreaktionen z.B. können durch die Emulsion nicht hervorgerufen werden.

Die Verträglichkeit aber mit noch vorhandenem Blut gleich welcher Gruppe ist gewährleistet. Die Funktion der Emulsion wird durch Kohlenmonoxid, Blausäure und andere Gifte nicht beeinträchtigt. Die Therapie schwerer Vergiftungen könnte bei rechtzeitiger Anwendung erfolgreich betrieben werden.

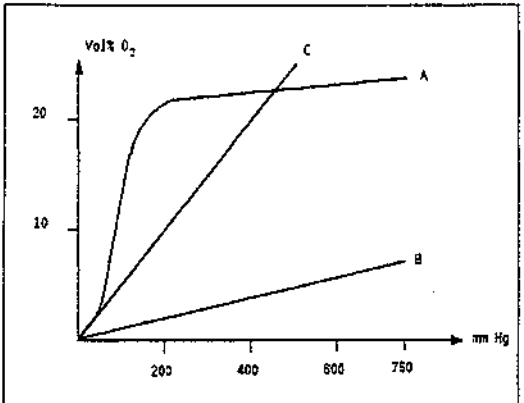


Bild 1: Sauerstofflöslichkeit (Vol.%) als Funktion des Sauerstoffdruckes
A: Blut B: Fluosol DA
C: Emulsion für Luftbeatmung

Die Größe der gastransportierenden Emulsionströpfchen beträgt etwa ein Hundertstel der von roten Blutkörperchen, so daß eine Behandlung des Schocks, des Herzinfarktes, der cerebralen Ischämie, der schweren respirativen Insuffizienz und in der Prophylaxe der Gangrän peripherer Gewebe gegeben ist.

Es hat sich gezeigt, daß die Radio- und Chemotherapie maligner Tumoren bei gleichzeitiger Applikation der beschriebenen

Emulsionen wirksam unterstützt wird. Die Anwendung wäre auch erfolgversprechend bei der Risikoverminderung von Herzoperationen und in extrakorporalen Kreisläufen. Der Schutz und die Vitalisierung von abgetrennten, transplantationswürdigen Gliedmaßen und von Organ-transplantaten sind weitere Anwendungsgebiete. Auf die Verwendung als Kontrastmittel wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Allerdings wurde die anfängliche Euphorie etwas gedämpft. Es treten Nebenwirkungen auf wie die Aktivierung des Komplementsystems und die Beeinflussung der Leukozytenaktivität. Nach massivem Austausch von Blut gegen Emulsionen kommt es nach einigen Stunden trotz erhöhtem Sauerstoffpartialdruck im Blut zu einer Sauerstoffverwertungs-Störung im Gewebe (Hypoxie), zu einer Anreicherung von Substratwasserstoff aus den Stoffwechselprozessen und zu einer Verminderung der Energiebildung. Diese Befunde deuten auf eine Behinderung der mitochondriellen Atmungskette hin, in der die Oxidation des Wasserstoffs durch Cytochrome katalysiert wird. Derartige Schwierigkeiten haben offensichtlich einen Durchbruch in der Anwendung von Emulsionen bisher behindert. Eine Reihe von offenen Fragen harren noch der Klärung.

Außerhalb dieses Bereiches finden sauerstoffbeladene Emulsionen Einsatz bei der Stimulierung aerober Zellkulturen, CO_2-beladene Emulsionen werden dagegen bei anaeroben Zellkulturen eingesetzt.

Nicht emulgierte Perfluorocarbone dienen vorteilhaft zum Tamponieren und als Hilfsmittel in der Augenchirurgie [9], [10].

Für die synthetische Chemie wurden neuerdings partiell fluorierte Kohlenwasserstoffe als Reaktionsmedium in Zweiphasen-Systemen mit Wasser vorgeschlagen [11]. Vorteile für synthetische Reaktionen in solchen Systemen sind neben der guten Löslichkeit für Gase auch die bessere Löslichkeit organischer Verbindungen.

4. Fluorverbindungen in der Tomographie und als Kontrastmittel

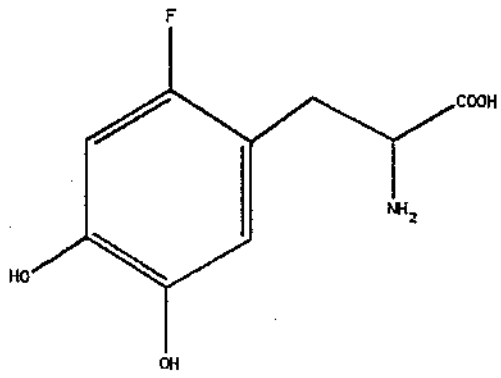


Abbildung 10:
6-[^{18}F]-dopamin^{18}F(β^+) τ =109,72±0,06 min
Positronenemissions-Tomographie

Das natürliche Fluor weist als Reinelement nur eine Isotopenart mit der Massenzahl 19 auf. Der Kernspin beträgt ½ wie beim Wasserstoff, wodurch übersichtliche und intensive ^{19}F-NMR-Signale bei Applikation von Perfluorverbindungen empfangen und tomographisch ausgewertet werden können (Kernspin-Tomographie)

Die 19fach höhere Massenkonzentration im Vergleich zu Wasserstoff macht Perfluorverbindungen zu ausgezeichneten Kontrastmitteln in der Röntgen-Tomographie (^{19}F-Röntgen-Tomographie). Das Analoge gilt für die Sonographie (Ultraschall), durch die intensiveren Signale ist die Abbildungsqualität erheblich verbessert.

Neue Möglichkeiten in der Abbildungsdiagnostik wurden durch die Positronenemissions-Tomographie erschlossen. Das künstlich radioaktive Fluorisotop der Massenzahl 18 ist ein Positronenemitter mit der Halbwertszeit τ = 109,72 ± 0,06 min. In 6-Stellung mit ^{18}F markiertes Fluorodopamin wird in der tomographischen Untersuchung der Parkinsonschen Krankheit eingesetzt.

Der Positronennachweis ist außerordentlich empfindlich durch nachfolgende von Positronen ausgelöste γ-Signale. In der neurologischen Forschung wurde ^{18}F-Glucose angewendet , sowie auch bei epileptischen Erkrankungen, ebenso in der Cardiologie, bei der Untersuchung von Gehirntumoren und beim Studium der Alzheimer-Krankheit. Die Verbindung liefert auch wertvolle Hinweise in pharmakokinetischen Untersuchungen. Das Neuroleptikum ^{18}F-Spiroperidol hat Eingang in die neurologische Forschung gefunden [12]. Es ist abzusehen, daß die Anwendung ^{18}F-dotierter Pharmaka in der medizinischen und pharmakologischen Forschung eine steigende Rolle spielen wird.

5. Inhalations- und Injektionsnarkotika

Die Ausschaltung operativ bedingter Schmerzen mit Hilfe der Narkose gehört zu den bedeutendsten Entdeckungen in der Medizin. Ether als Betäubungsmittel war im Winter 1847 im Massachusetts General Hospital bei einer Operation verwendet worden, aber wohl nicht zum ersten Mal, denn JACKSON, BIGELOW und MORTON hatten diese Methode bereits ein Jahr zuvor eingeführt, nachdem LONG am 30. Mai 1842 in Jefferson Georgia einen Patienten unter Ethernarkose operiert hatte, über seinen Erfolg aber nicht sofort berichtete. Chloroform und Distickstoffmonoxid (Lachgas) kamen bald als Narkotika dazu. Wegen seiner Brennbarkeit und der Explosionsgefahr im Gemisch mit Luft wird Ether beim Menschen im Normalfall nicht mehr angewendet. Im Gebrauch sind nunmehr halogenierte Ether wie Enfluran und Isofluran, die nicht brennbar sind.

$FClCHCF_2OCHF_2$	$CF_3CHClOCHF_2$
Enfluran	Isofluran

In der Weiterentwicklung dieser Gruppe wurden chlorfreieVerbindungen wie Sevofluran und Desfluran gefunden, die eine schnelle Wirkung und auch ein schnelles Nachlassen der Wirkung aufweisen.

$(CF_3)_2CHOCH_2F$	$CF_3CHFOCHF_2$
Sevofluran	Desfluran

Sevofluran hat wegen seiner Hydrolyseempfindlichkeit einen gewissen Nachteil. Die mit CO_2 ausgeatmeten Narkosegase werden durch alkalische Lösungen geleitet, von CO_2 befreit und wieder in den Kreislauf zurückgeführt. Dabei wird Sevofluran partiell zersetzt.

Auch das Chloroform hat wie Ether nur noch historisches Interesse. Es wurde durch Halothan ersetzt.

$CF_3CHClBr$
Halothan

Halothan hat einen Siedepunkt von 50 °C und zersetzt sich unter Lichteinfluß. Es wird durch die erwähnten fluorierten chlorfreien Ether verdrängt.

Obwohl seit der ersten Anwendung 150 Jahre vergangen sind, haben wir heute noch keine sichere einheitliche Theorie über den Wirkungsmechanismus der Narkose. Narkotika schalten Erregungsbildung und Erregungsleitung im zentralen Nervensystem aus. Dabei scheinen neben chemischen Vorgängen auch physikalische Adsorptionen oder die im Grenzgebiet zwischen Chemie und Physik angesiedelten und von der Katalyse her bekannten Chemisorptionen eine Rolle zu spielen. Anders wäre nicht die große Vielfalt an Substanzen mit narkotischer Wirkung zu verste-

hen, sogar das inerte Edelgas Xenon gehört dazu. Physikalische Veränderungen an Kontaktstellen zwischen Nervenzellen oder den Übergängen zwischen Nervenzellen und Organen können dabei maßgebend sein. Phospholipide, die für die Nerventätigkeit wichtig sind, werden in ihrem Übergang von einem Lösungszustand (Solform) in eine Gelform durch Anwesenheit von Narkotika behindert. Ionen, die für die Nervenerregung zuständig sind, werden deshalb wahrscheinlich in der Bewegung zu ihrem Wirkungsort gehemmt.

Untersuchungen mit den beiden optisch aktiven Formen von Isofluran ergaben, daß eine Lipidbeeinflussung den Narkoseeffekt nicht ausreichend erklärt. Beide Formen haben gleiche Löslichkeit in Lipiden, wirken aber stereoselektiv unterschiedlich in der Narkose sowie auf neuronale Ionenkanäle, wodurch der Schluß nahegelegt wird, daß eine gezielte Anlagerung an Proteine bei der Narkose erfolgt [13].

Narkotika sollten chemisch inert sein und möglichst unverändert wieder ausgeschieden werden. Das trifft zu für Isofluran und Desfluran, während Halothan merklich abgebaut wird und dadurch Nebenwirkungen verursacht. Enfluran und Sevofluran sind stabiler als Halothan, erreichen aber nicht die Reaktionsträgheit von Isofluran und Desfluran [14].

Die Inhalationsnarkose wird durch die Injektionsnarkose unterstützt. Eine dabei verwendete Verbindung wurde im 2. Abschnitt bereits erwähnt, nämlich Flunitrazepam. Gegenspieler für diese Verbindung und auch für andere Substanzen der Gruppe, die Benzodiazepame, ist Flumazenil, womit eine Steuerung der Injektionsnarkose möglich ist.

6. Fluorchlorkohlenstoff-Verbindungen

Perhalogenierte chlorhaltige Fluorkohlenstoff-Verbindungen wirken, wenn sie in die Stratosphäre gelangen, zerstörend auf den Ozonschild der Erde. Die Stratosphäre enthält in einer Höhe von 10 bis 50 km etwa 90 % des atmosphärischen Ozons, die übrigen 10 % kommen in der erdnahen Troposphäre vor. Das Hauptbildungsgebiet für das stratosphärische Ozon liegt über den Tropen, wo die UV-Strahlung der Sonne die größte Intensität besitzt [15].

Die Ozonbildung verläuft über die Vorgänge

$$O_2 \xrightarrow[\lambda < 242\ nm]{h\nu} O + O$$

$$O_2 + O \longrightarrow O_3$$

Der photochemische Ozonabbau erfolgt in der Stratosphäre nach den Gleichungen

$$O_3 \xrightarrow[\lambda < 850\ nm]{h\nu} O_2 + O$$

$$O_3 \xrightarrow[\lambda < 320\ nm]{h\nu} O_2 + O(^1D)$$

Die zweite Reaktion ist wesentlich für den Schutz der Erdoberfläche vor der aggressiven UV-B-Strahlung im Bereich von 280 bis 320 nm. $O(^1D)$ ist ein Symbol für energetisch angeregten Sauerstoff.

Im Nordwinter, von September bis März, transportieren die stratosphärischen Westwinde mit einer nordwärts gerichteten Komponente das Ozon aus dem tropischen Bildungsgebiet nach Norden. Im Südwinter, von März bis September, erfolgt eine Drehung des stratospärischen Windsystems, und der Ozontransport aus der tropischen Stratosphäre verläuft in Richtung auf die Südhalbkugel.

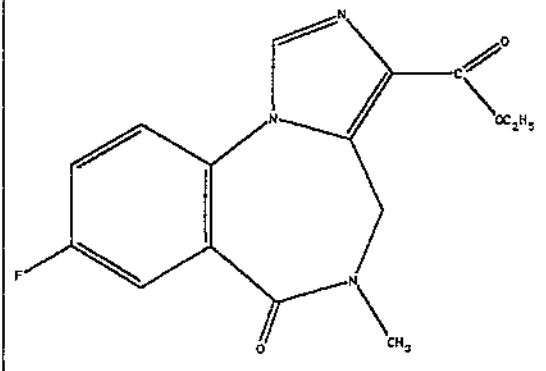


Abbildung 11: Flumazenil

Im Winter entsteht über dem jeweiligen Pol ein kalter Tiefdruckwirbel mit großen Windstärken, der den Luftaustausch mit mittleren Breiten in der Stratosphäre einschränkt. Der antarktische Tiefdruckwirbel ist stabiler als das Gegenstück im Norden und bricht im November (im südlichen Frühling) zusammen, was dann erst die Zulieferung von Ozon aus mittleren Breiten ermöglicht. Wegen der größeren Landmassen in der Nordhalbkugel schwächen stärkere Turbulenzen den nördlichen Zirkumpolarwirbel. Die Zulieferung von Ozon ist damit im Norden weniger behindert, was im arktischen Winter zu

höheren Totalozonwerten führt als im antarktischen Winter. Dies sind natürliche Vorgänge, die ohne anthropogene Einwirkungen stattfinden [16].

Von Menschen erzeugte Fluorchlorkohlenstoff-Verbindungen wie CCl_3F, CCl_2F_2 oder $C_2Cl_3F_3$ und $C_2Cl_2F_4$, die in Spraydosen oder als Lösungs- und Kältemittel Verwendung finden, sind sehr stabil und gelangen, in die Troposphäre abgegeben, schließlich auch in die Stratosphäre, wo unter Einwirkung von Sonnenstrahlen eine Spaltung der C-Cl-Bindung eintritt. Die C-F-Bindung ist dagegen stabiler, wie im Abschnitt 1 ausgeführt wurde. Bei der Spaltung der C-Cl-Bindung entstehen Cl-Radikale, die ozonzerstörend wirken, z.B. über

$$Cl + O_3 \longrightarrow ClO + O_2$$

Es treten nun Radikalkettenreaktionen auf, bei denen ClO_x -Moleküle als Katalysatoren wirken, die viele O_3 -Moleküle zerstören:

$$ClO + O_3 \longrightarrow ClO_2 + O_2$$

$$ClO_2 + O \longrightarrow ClO + O_2$$

Die Addition beider Gleichungen ergibt

$$O_3 + O \longrightarrow 2\,O_2$$

Es gibt noch eine Vielzahl weiterer Reaktionen, auf die hier nicht eingegangen wird. Es soll nur das Prinzip erläutert werden. Außer Fluorchlorkohlenstoff-Verbindungen tragen noch CCl_4 und chlorierte Kohlenwasserstoffe wie CH_3Cl und CH_3CCl_3 zur Chlorbelastung in der Stratosphäre bei.

Der ClO_x -Kreislauf ist aber nicht die einzige Ozonzerstörungskette. Bromhaltige Feuerlöschmittel wie $CClBrF_2$ oder $C_2Br_2F_4$ liefern in der Stratosphäre Br-Radikale, die zu analogen BrO_x -Kreisläufen führen. Sie haben geringere Bedeutung als die ClO_x -Kreisläufe, da die verwendeten Mengen der Bromverbindungen bedeutend niedriger liegen.

Wesentlicher ist die NO_x -Kette. Der Start kann über N_2O (Lachgas) erfolgen.

$$N_2O + O(^1D) \longrightarrow 2\,NO$$

NO kann aber auch aus den Abgasen von Flugzeugen stammen, die in der unteren Stratosphäre oder oberen Troposphäre verkehren.

Auch ein HO_x -Kreislauf ist zu erwähnen, der noch kompliziertere Verhältnisse aufweist als die bisher beschriebenen Ketten. Startreaktionen zur Bildung ozonzerstörender Radikale sind in diesem Zusammenhang:

$$H_2O + O(^1D) \longrightarrow 2\ OH$$

$$H_2O \xrightarrow[\lambda < 203\ nm]{h\nu} H + OH$$

$$H_2 + O(^1D) \longrightarrow H + OH$$

Kohlenwasserstoffe wie CH_4 ergeben mit $O(^1D)$ ebenfalls OH-Radikale.

Dank der globalen Regulierung von Emission und Produktion ozonzerstörender Substanzen (*Montrealer Protokoll*) nimmt heute der Gehalt an ozonzerstörenden chlor- und bromhaltigen Verbindungen in der Troposphäre weniger stark zu als noch vor einigen Jahren. Als Ersatz für die Chlorfluorkohlenstoff-Verbindungen wurde zunächst die zwar noch chlorhaltige Substanz $CHClF_2$ vorgeschlagen, weil sie durch den Wasserstoffgehalt eine geringere Beständigkeit und damit auch eine verminderte Verweilzeit in der Atmosphäre aufweist als die perhalogenierten Verbindungen. Schließlich aber wurden die chlorfreien Ersatzverbindungen CF_3CFH_2 und CF_3CFHCF_3 bereitgestellt, die sich sogar für medizinische Sprays als geeignet erwiesen haben, wobei der letzteren Verbindung der Vorzug gebührt [17]. Als Kältemittel finden auch Mischungen aus den Verbindungen CH_2F_2 , CF_3CF_2H und CF_3CFH_2 Verwendung [18].

Die bereits in der Atmosphäre vorhandenen Substanzen wirken aber weiter. Die maximale stratosphärische Konzentration an ClO_x wird für den Beginn des nächsten Jahrhunderts vorausgesagt. Die Entfernung reaktiver Radikale aus der Stratosphäre ist ein sehr langsamer Prozeß. Er verläuft über sogenannte Reservoirgase. Das sind Verbindungen, die durch Reaktionen von Kettenträgern untereinander entstehen und selbst kein Ozon zerstören. Als Beispiel wird die Reaktion

$$NO_2 + ClO \longrightarrow ClONO_2$$

angeführt. Reservoirgase können aber zu ozonzerstörenden Radikalen reaktiviert werden:

$$ClONO_2 \xrightarrow[\lambda < 440\ nm]{h\nu} Cl + NO_3$$

$$ClONO_2 + O \longrightarrow ClO + NO_3$$

Der langsame Transport von Reservoirgasen und auch von Kettenträgern selbst in die Troposphäre ist der für die Gesundung der Stratosphäre zu Buche schlagende Prozeß. Die Verbindungen werden in der Troposphäre als wasserlösliche Gase mit dem Niederschlag ausgewaschen.

Ozonschädigende Stoffe wie NO_2 können also bei der Reservoirgas-Bildung wiederum auch nützlich sein, was die Kompliziertheit des gesamten Prozesses verdeutlicht und die Abschätzung der Einzelanteile erschwert. In der Beschreibung der Reaktionen wurden der Einfachheit halber auch Komplikationen nicht berücksichtigt, die in einigen Fällen durch die Notwendigkeit eines weiteren Stoßpartners wie Stickstoff entstehen. Solche Stoßpartner nehmen an der Reaktion nur insofern teil, als sie überschüssige Energie abtransportieren.

Ein SO_2 -Eintrag in die Stratosphäre, der durch Vulkanausbrüche oder kontinuierlicher durch den Flugverkehr erfolgen kann, wirkt sich in der Bildung von durch Oxidation erzeugten Schwefelsäure-Aerosolen aus, an deren Oberfläche ozonzerstörende Reaktionen beschleunigt werden. Die Aerosole können aber auch eine Umwandlung von NO_x in Salpetersäure bewirken, deren Beseitigung über die Troposphäre günstig wäre. Gleichzeitig vermindert dies jedoch die Möglichkeit zur Bildung von Reservoirgasen, was den ClO_x -Kreislauf fördert.

Das BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT, BERN [19], hat zu dieser Problematik einen sehr guten Überblick veröffentlicht. Wenn auch im einzelnen fundierte Abschätzungen gegeben werden können, so ist doch die äußerst komplexe Natur der gesamten Vorgänge noch keineswegs voll überschaubar.

Die noch zu wenig diskutierte Bedeutung lokaler Konzentrationen (Raketenstarts), noch unberücksichtigte Temperaturabhängigkeiten, klimatische Besonderheiten, noch unbekannte Reaktionswege können durchaus die Sicherheit von Voraussagen beeinträchtigen und bisher angenommene Anteile verschiedener anthropogener Einflüsse verändern. Ein Abschluß in den notwendigen Untersuchungen ist noch lange nicht erreicht.

7. Fluorpolymere

Das Geburtsjahr dieser Verbindungsklasse war 1938, als PLUNKETT bei DUPONT entdeckte, daß sich monomeres Tetrafluorethylen C_2F_4 in einer Stahlflasche verfestigt hatte. Das Produkt ist ein Kettenpolymerisat und chemisch außerordentlich widerstandsfähig. Die Handhabung des aggressiven Uranhexafluorides , das bei 57 °C sublimiert und für die Abtrennung des Uranisotops 235 Bedeutung hat, wäre ohne dieses Material wohl nicht so leicht gelungen. Polytetrafluorethylen (Teflon) hielt Einzug in den chemischen Apparatebau und wegen seiner guten Isoliereigenschaften in die Elektroindustrie. Für den Maschinenbau werden wartungsfreie Lager aus Polytetrafluorethylen gefertigt, da der Reibungskoeffizient des Materials gegenüber Metallen sehr niedrig liegt. Die Verwendung als Beschichtungsmate-

rial für Bratpfannen ist eine weitere bekannte Anwendung von Teflon. Es ist bis etwa 350 °C thermisch beständig. Oberhalb dieser Temperatur ist jedoch Vorsicht geboten, da bei seiner pyrolytischen Zersetzung äußerst giftige Spaltprodukte gebildet werden.

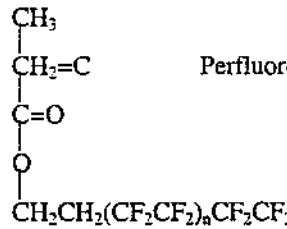
Es gibt inzwischen zahlreiche Kombinationen mit anderen perfluorierten Verbindungen, auch unter Verwendung weiterer Monomerer wie Hexafluoropropylen, die sich sämtlich durch chemische Inertheit und wertvolle physikalische Eigenschaften, besonders im Hinblick auf elektrotechnische Anwendungen, auszeichnen. Wasser- und ölabweisende Textilgewebe werden auf der Grundlage von Fluorpolymeren erzeugt. Es gibt auch chlorhaltige Vertreter unter den Fluorpolymeren.

Das Vinylidenfluorid $CH_2{=}CF_2$ ist das Monomere zur Erzeugung von Polyvinylidenfluorid, das als Bautenschutz Verwendung findet, aber besonders interessant wegen seiner piezoelektrischen Eigenschaft ist, die durch eine spezielle kristalline Anordnung im Polymeren erreicht wird. In der orthopädischen Forschung werden durch Ausnutzung dieses Effektes Druckmessungen durchgeführt, um Knochenbelastungen zu bestimmen [20].

Die Brechzahlen für Lichtwellen von Fluorpolymeren können gezielt durch entsprechende Substituenten verändert werden. Das macht diese Materialien interessant für die Herstellung von Lichtleitfasern auf Polymerenbasis.

Glas als Werkstoff für Kontaktlinsen wurde durch Polymethylmethacrylat verdrängt. Die Anwendung von Siloxyethylmethacrylat brachte Vorteile im Hinblick auf die erstrebte Erhöhung der Sauerstoffpermeabilität. Die Polymerisation von Perfluoroalkylethylmethacrylat liefert ein Material für Kontaktlinsen, das auch die Sauerstoffpermeabilität gewährleistet und eine Brechzahl von $n_D = 1{,}39$ aufweist, die der der menschlichen Tränenflüssigkeit nahekommt (DU-PONT).

Perfluoropolyethermethacrylat, ein weiteres Kontaktlinsenmaterial, wurde von der 3M Co entwickelt [21].



Perfluoroalkylethylmethacrylat

Wie alle behandelten Gebiete der Fluorkohlenstoffchemie konnte auch dieses nur in den Grundzügen behandelt werden. Noch Mitte der 30er Jahre

wurde der Fluorchemie keine breite Perspektive vorausgesagt. Fluorverbindungen hätten, abgesehen von der Aluminiumproduktion auf der Basis von Kryolithschmelzen (Na_3AlF_6), die als Lösungsmittel für Al_2O_3 dienen und so die Elektrolyse ermöglichen, nur begrenztes wissenschaftliches Interesse. Diese Voraussage ist inzwischen vollständig durch die Praxis widerlegt. Die Fluorchemie ist zur Grundlage für wichtige Wirtschaftszweige geworden und hat sich zu einem bedeutenden Wissenschaftsgebiet entwickelt.

Literatur:

[1] Banks, R. E.; Conference Fluorine in Medicine in the 21st Century; 18. - 21. April 1994, University of Manchester, Institute of Science and Technology (UK), Paper 1.

[2] S. L. Neidleman , J. Geigert: Biohalogenation, Principles, Basic Roles and Applications; Ellis Horwood, Chichester U. K., 1986.

[3] Meyer, M., O'Hagan, D.; Chem. Brit. **28** [1992] 785.

[4] Hay, R. J.; J. Antimicrob. Chemotherapy **28** (suppl. B) [1991] 17.

[5] Smith, I. R.; Conference Fluorine in Medicine s. [1], Paper 3.

[6] Clark, L. C., Gollan, F.; Science **152** [1966] 1755; vgl. a. Riess, J. G., LeBlanc, M.; Angew. Chem. **90** [1978] 654.

[7] Groß, U., Rüdiger, St., Kolditz, L., Reichelt, H.; Nachr. Chem. Tech. Lab. **38** [1990] 1461 (Mitt.bl. Chem. Ges. **37** [1990] Nr. 11).

[8] Groß, U., Kolditz, L., Papke, G., Rüdiger, St.; J. Fluorine Chem. **53** [1991] 163.- Groß, U., Rüdiger, St.; J. Fluorine Chem. **69** [1994] 31.

[9] Meinert, H.; Conference Fluorine in Medicine s. [1], Paper 23.

[10] Chang, S., Sun, J. K.; Conference Fluorine in Medicine s. [1], Paper 24.

[11] Cooper, D. L., Allan, N. L., Powell, R. L.; J. Fluorine Chem. **49** [1990] 421.

[12] Kilbourn, M. R.; Conference Fluorine in Medicine s. [1], Paper 12.

[13] Franks, N. P.; Dickinson, R., Lieb, W. R.; Conference Fluorine in Medicine s. [1], Paper 16.

[14] Gandolfi, A. J.; Conference Fluorine in Medicine s. [1], Paper 17.

[15] Chapman, S.; Memoirs Roy. Meteo. Soc. **3** No. 26 [1930] 103.

[16] Dobson, G. M. B.; Appl. Optics **7** [1968] 387.

[17] Deger, H. M.; Hoechst High Chem Magazin **16** [1994] 41.

[18] Chemische Rundschau, Wochenzeitung für Chemie, Pharmazie und Lebensmitteltechnik, Nr. 9, 48. Jahrgang, vom 3. März 1995, S. 7, Solothurn und Weinheim.

[19] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft; Umwelt-Materialien Nr. 14, Umweltgefährdende Stoffe; Die Bedrohung des Ozonschildes: Heutiger Wissensstand und Unsicherheiten, Bern 1994, Autoren: Magnus von Piechowski, Johannes Stähelin, Beat Oberholzer.

[20] Decroly, P.; Conference Fluorine in Medicine s. [1], Paper 28.

[21] Tighe, B. J.; Conference Fluorine in Medicine s. [1], Paper 30.

Eberhard Hoyer

Die katalytische Reinigung von Autoabgasen - Stand und Erwartung*

Im März 1995 tagt in Berlin das erste Folgetreffen der UN-Umweltkonferenz von Rio de Janeiro. Wenn auch Klimagas Nummer 1 Kohlendioxid und mithin sein zu mindernder anthropogener Ausstoß im Mittelpunkt von Debatten und hoffentlich Protokollen stehen, und der Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration nur teilweise durch das Kraftfahrzeug verursacht wird, so sind die vom Personenverkehr und Güterverkehr ausgehenden Belastungen offensichtlich. Und sie nehmen national und global zu. Dem deutschen Wald geht es schlecht.Trotz enormen technischen Fortschritts bleiben Kraftfahrzeuge naturbelastende Erzeugnisse, aber der Personenkraftwagen bleibt dennoch das meistgenutzte Personenverkehrsmittel in den Industrieländern (ca. 80% in Deutschland) und der Lastkraftwagen das Transportrückgrat der deutschen Wirtschaft (Prognose für 1994 ca. 85% der transportierten Gütermengen in Deutschland). Trotz Staus, hoher Preise und Steuern und trotz der unmittelbar durch Verkehrsunfälle ausgehenden Gefahren - Autos sind ein ganz wichtiger Part für die Volkswirtschaft und das Individuum.

Luftschadstoffe

Die Luftschadstoffe, an deren Zustandekommen das Kraftfahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine, also gegenwärtig OTTO- oder DIESEL-Motor beteiligt ist, zeigt Abb. 1.

Tab.1 Luftschadstoffe:

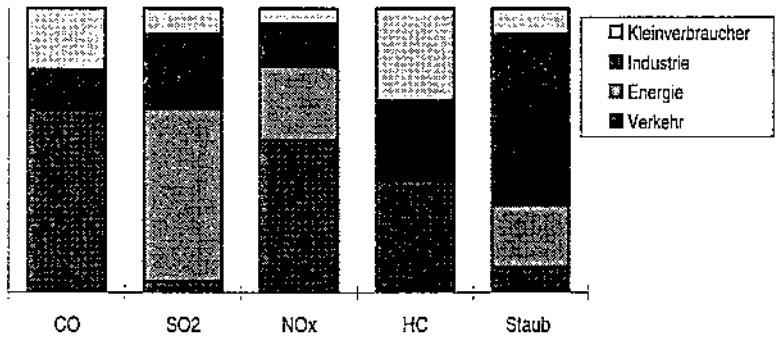
Staub	(u.a. Ruß als erwärmendes Aerosol)
Schwefeldioxid	SO_2
Stickoxide	NO_X
Kohlenmonoxid	CO
Kohlenwasserstoffe	HC u.a. organisch chemische Stoffe

Der Verkehr - und auch hier wiederum der Landverkehr per Kraftfahrzeug teilweise, wenn auch zu 2/3 bis 4/5, also größtenteils - ist Hauptverursacher der Luftschadstoffe Kohlenmonoxid CO, Stickoxide NO_X (dies ist die Sam-

* Vortrag, gehalten in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 19. Mai 1994

melsummenformel für die Stickstoffoxide NO[1] und NO_2, die im wechselnden Gleichgewicht sind mit Sauerstoff, Wasserdampf, Salpetersäure und salpetriger Säure) und Kohlenwasserstoffe. Am Schadstoff Staub ist der Kraftverkehr im Vergleich zu industriellen Prozessen nur minderbeteiligt; allerdings sind die aus den Auspuffanlagen vor allem von Dieselmotoren austretenden Partikel (PM = engl. particle moisture), „Dieselruß" 1. offensichtlich im Wortsinn und 2. alles andere als harmlos. Da die Diesel- und Vergaserkraftstoffe in den Erdölraffinerien bereits weitestgehend entschwefelt werden, ist Schwefeldioxid SO_2 nur geringfügig in den Auspuff-

Abb. 1: Anteile der Verbraucher von Schadstoffen in der Luft (BRD, Mitte der 80er Jahre)



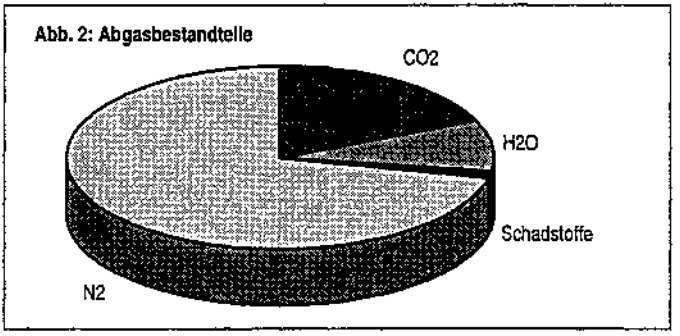
gasen enthalten.

Das Fazit der Abbildung 1 lautet: Kraftverkehr bringt (außer bei Staub) mehr Belastungen als industrielle Prozesse !

Was kommt an ungereinigten Autoabgasen aus dem Auspuffrohr? Die folgende Übersicht Abb.2 zeigt, daß es sich bei den Schastoffen nur um ca 1% der Gesamtabgasmenge handelt . Ein „nur" ist indes unangebracht, weil es sich (bei einer derzeit in Deutschland angemeldeten Kraftfahrzeugflotte von 40 Millionen Pkw) den Daten 1992/93 des Umweltberichts des Umweltbundesamts zufolge 1993 immerhin um 806 000 Tonnen Stickoxide im Personenverkehr und 733 000 Tonnen im Straßengüterverkehr, zusammen also um reichlich 1,5 Millionen Tonnen NO_X in Deutschland handelte. Be-

[1] In Spuren allerdings sind NO und sehr wahrscheinlich sogar CO für den Menschen endogene neuronale Wirk- und Botenstoffe mit wichtigen regulierenden Funktionen in und außerhalb des Gehirns. NO wurde 1992 zum „Molekül des Jahres" gewählt.[1]

also um reichlich 1,5 Millionen Tonnen NO_X in Deutschland handelte. Bemerkenswert daran ist auch, daß tendenziell der Ausstoß des Personenverkehrs seit 1987 durch Einführung und Verbreitung des Katalysatorautos geringer wurde, die NO_X-Emissionen des Lkw-DIESEL-Straßengüter-



verkehrs im gleichen Zeitraum aber diese Verbesserungen „kompensierte". Ich komme auf das zugrundeliegende Problem „Kat auch für Diesel?" zurück.

Bleiben wir bei den ungereinigten Autoabgasen: Die Hauptverbrennungsprodukte des Kraftstoffes - es handelt sich um Kohlenwasserstoffe, die letztlich unmittelbar oder mittelbar in lange zurückliegenden Erdgeschichtsperioden und über vergleichsweise lange Zeiträume hinweg gespeicherte Sonnenenergie verkörpern - sind Kohlendioxid und Wasser(dampf). Und wäre der Luftstickstoff auch chemisch gänzlich unbeteiligt (er ist es nicht, sonst gäbe es kein NO_x - Problem), so würde gemäß seinem Anteil von rund 80% in der Luft sein Anteil an den Auspuffgasen sogar noch geringfügig höher sein. Sehen wir also einmal vom zusätzlichen Treibhauseffekt durch das Verbrennungs-CO_2 ab, so sind Stickstoff und Wasser unkritisch, CO_2 problematisch aber unvermeidlich, solange Verbrennungskraftmaschinen mit Kohlenwasserstoffen betrieben werden, die Millionen Tonnen Schadstoffe aber weitgehend, nämlich zu 90 - 98% vermeidbar. Darum geht es bei der katalytischen Reinigung von Autoabgasen, also beim „KAT".

Die Chemie der heterogen katalytisierten Nachverbrennung bzw. selektiven Reduktion von Autoabgasen:

Ziel ist die rasche Umwandlung der Schadstoffe CO, HC und NO_x, nämlich während der kurzen Passage der Abgase durch die Auspuffanlage, in CO_2, H_2O und N_2

$$CO + 1/2\,O_2 \Rightarrow CO_2$$

$$C_nH_m + (n + 1/4m)\,O_2 \Rightarrow nCO_2 + 1/2m\,H_2O$$

$$CO + NO \Rightarrow CO_2 + 1/2\,N_2$$

$$C_nH_m + (1/2n + 2m)\,NO \Rightarrow nCO_2 + 1/2m\,H_2O + (n + 1/4m)\,N_2$$

Die Anforderungen an den Katalysator sind enorm. Die einem Volumen von ca. 1 - 2 m³ Kraftstoff-Luftgemisch entsprechende Menge Abgas wird über den im porösen Festbett enthaltenen Ktalysator geleitet und verweilt dort nur etwa 0,03 sec. In dieser Zeit müssen die simultanen Konvertierungsreaktionen zu über 90% abgelaufen sein. Die Mindestarbeitstemperatur am Katalysator ist 300° C. (Deshalb übrigens sollen Kraftfahrzeuge mit Kat nicht angeschoben oder angeschleppt werden, da vor dem Anspringen eine zu große Menge Kraftstoff, d.h. HC den Katalysator kalt passiert und ihn versottet.)

Die Sache wird zusätzlich kompliziert, weil die gekoppelten Reaktionen gegensinnig sind: Kohlenmonoxid und Restkohlenwasserstoffe sollen oxidiert werden zu Kohlendioxid und Wasser , dazu braucht man Luftsauerstoff. Andererseits soll genausoviel Kohlenmonoxid bzw. HC übrigbleiben, um die Stickoxide zu Stickstoff zu reduzieren. Sauerstoffüberschuß muß also vermieden werden, Sauerstoffunterschuß aber auch. [Der Kraftfahrer kennt das zu magere Gemisch bzw. zu fette Gemisch: Fährt man (auch ohne Kat) zu mager, läuft der Motor zu heiß, fährt man zu fett, so zeigt eine „Fahne" unverbrannte HC an.] Um also eine hohe Umsatzrate für alle drei Schadstoffe zu realisieren, muß das Kraftstoff /Luftsauerstoff-Verhältnis möglichst genau eingehalten werden. Es wird charakterisiert durch die sog. Luftzahl (Lambda) beim „geregelten" oder, sprachlich irreführend, "Dreiwegekatalysator".

$$\lambda = \frac{\text{zugeführte Luftssauerstoffmenge}}{\text{stöchiometrisch notwendige Luftsauerstoffmenge}}$$

Abb. 3 zeigt die Abhängigkeit des Umwandelungsgrades vom Lambda-Wert.

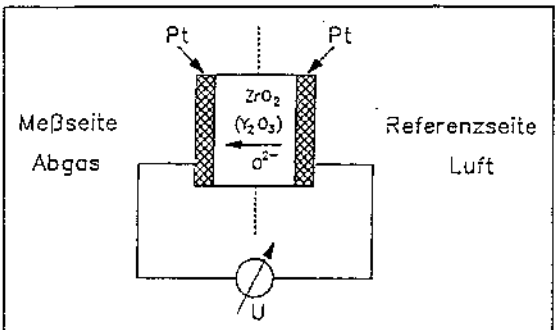
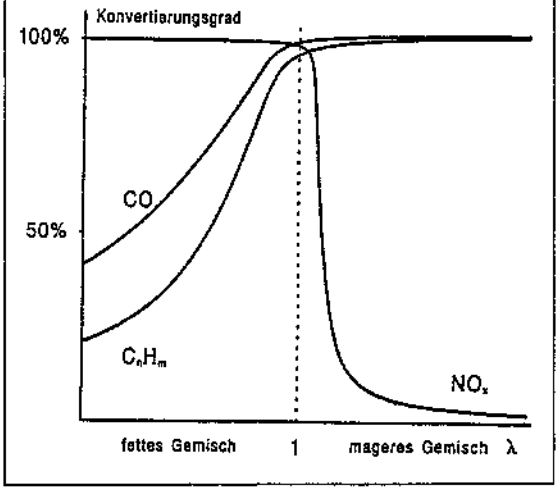


Abb. 3: Abhängigkeit des Umwandlungsgrades vom λ-Wert

Abb.4: Aufbau der λ-Sonde



Man sieht, wie schmal der Bereich, das sog. Lambda-Fenster, für eine optimale Konvertierung aller 3 Schadstoffe ist. Die Lambdazahl muß also in einem möglichst engen Bereich um den Wert 1 gehalten werden. Der linke Fensterrand liegt etwa bei 0,97 im fetten Bereich und der rechte bei höchstens 1,02 im mageren für einen guten Dreiwegekatalysator. Ein Ziel der Katalysatorforschung ist übrigens die Verbreiterung des Lambda-Fensters, der wiederum durch Stöchiometrie und Thermodynamik natürliche Grenzen gesetzt sind.

Gesteuert und geregelt wird der Prozeß über eine Sonde, die mittels elektrochemischer Feststoffzelle den Sauerstoffgehalt im Motorabgas vor dem Katalysator elektrisch mißt und über einen Regelkreis die Benzinzufuhr so regelt, daß ein λ-Wert von 1 erhalten wird

Die Lambdasonde

Ihren schematischen Aufbau zeigt Abb. 4

Herzstück ist eine ternäre nichtstöchiometrische Oxidkeramik mit sog. Oxidionenleerstellen und Defektelektronen. Diese Funktionskeramik hat etwa die Zusammensetzung $Zr_{0,85}\ Ca_{0,15}\ O_{1,85}$. (Zirkoniumoxid kann

durch Yttriumoxid ersetzt sein) und wirkt als Festkörperelektrolyt zwischen 2 Platin-elektroden, deren eine in das Abgas reicht (Meßseite), während die andere von umgebender Außenluft umspült wird (Referenzseite). Potentialbestimmend ist die Differenz der Partialdrücke des Sauerstoffs gemäß der Gleichgewichtsreaktion

$$O_2 + 4e = 2O^{2-}$$

Die Spannung zwischen beiden Elektroden ergibt sich aus der Nernstschen Gleichung. Bei fettem Motorbetrieb liegt sie bei etwa 0,8 V, bei magerem bei etwa 0,2 V. Für die notwendige rasche Konvertierung der Schadstoffe am Katalysator (Verweilzeit 0,03 sec,s.o.) ist eine relativ hohe Reaktionstemperatur erforderlich. Sie muß für hohe Umwandelungsraten mindestens die sog. Anspringtemperatur (300 - 400° C) erreiche. Dies ist bei normalem Betriebszustand des Motors unproblematisch, wohl aber in der Kaltphase nach dem Anlassen, weshalb fortgeschrittene Hersteller Katheizende Motoren anbieten, die unmittelbar nach dem Anspringen mit vergleichsweise heißem Abgas schnell viel Wärme zum Katalysator transportieren.Andererseits kommt es bei unsachgemäßem Betrieb durch Überhitzung etwa 800 ^{o}C zur Zerstörung des Katalysators.

Der geregelte Dreiwege-Katalysator ist Stand der Technik für die Abgasreinigung von OTTO-Motoren. Vor Einführung der Abgasreinigung wurden die Verbrennungsmotoren relativ fett eingestellt und betrieben, weil in diesem Bereich (0.9) die Leistungsparameter günstig lagen. Die ersten Katalysatoren waren reine Oxidationskatalysatoren, und sie bedurften für die Nachverbrennung von HC und CO der zusätzlichen Lufteinpumpung in die Auspuffleitung vor dem Katalysator. Stickoxide wurden so nicht beseitigt, im Gegenteil. Noch später wurden deshalb Doppelbettkatalysatoren, d.h. nacheinander angeordnet 2 Katalysatoren verwendet: Bei 1 werden in einem Reduktionskatalysator zunächst die Stickoxide zu Stickstoff reduziert. Dann erfolgt die Lufteinspeisung in die Auspuffleitung, und der Oxidationskatalysator (s.o.) wandelt in einem zweiten Katalysatorbett HC und CO um. Ungeregelte Katalysatoren wandeln nur ca. 50% der Abgasschadstoffe um. Der geregelte Dreiwegekat schafft 90 - 98%.

Der eigentliche Katalysator

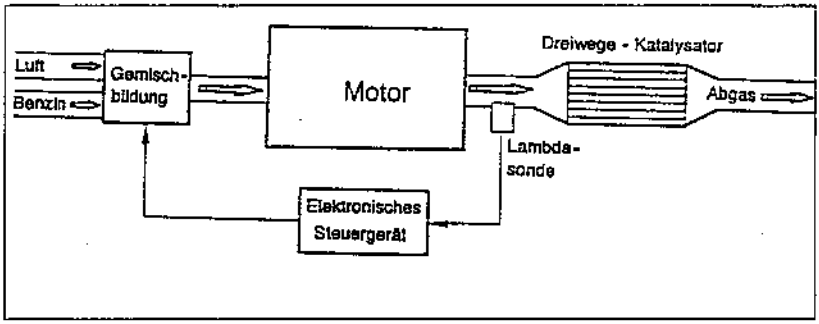


Abb. 5: Funktionsprinzip des geregelten Dreiwege-Katalysators

Wir kommen zum eigentlichen Katalysator. Der eigentliche Katalysator befindet sich auf einem porösen, wabenförmig von sehr vielen parallelen Strömungskanälen (ca 1mm) durchzogenen monolithischen Keramikkörper und dieser wiederum, meist drahtgewebeumgeben , in einem Edelstahlblechgehäuse, das anstelle des ersten Auspufftopfes in die Abgasleitung gebaut ist (Abb. 5).

Chemisch handelt es sich um eine Domäne der Oxidkeramik und Festkörperchemie: Der monolithische Träger ist eine Konstruktionskeramik, nämlich Cordierit, ein temperaturfestes Magnesiumalumosilikat mit kleinem thermischen Ausdehnungskoeffizient. Cordierit hat die Zusammensetzung $Mg[(AlO_2)_2(SiO_2)_2)]$. Er ist bedeckt mit γ-Al_2O_3, einem Aluminiumoxid mit defekter Spinellstruktur, das als sog. wash coat aufgebracht wird. Und darauf befindet sich eine Edelmetallbeschichtung aus Platin, Rhodium und Palladium. Rhodium ist ganz wichtig (und auch deshalb das teuerste Platinmetall: Platin ist etwas teurer, Rhodium fast doppelt so teuer wie Gold; es ist wirksamer Katalysator bei vielen chemischen auch homogenkatalysierten Prozessen so der Oxosynthese und dem Monsanto-Essigsäure-Verfahren): Rhodium vermag an seiner Oberfläche Sauerstoff gleichsam zu speichern und verbreitert vermöge dieser Pufferwirkung das Lambda-Fenster!

Wie alle heterogenen Katalysatoren hält auch der Autoabgaskat nicht ewig. Es gibt einen gewissen Abbrand, und es kommt nach und nach zur katalytischen Desaktivierung durch chemische Vergiftung durch in Spuren im Kraftstoff doch enthaltene Schwermetalle und z.B. Phosphorverbindungen. Einerseits sucht man deshalb nach neuen Katalysatorphasen, die immun

sind gegen solche Vergiftungen. Aussichtsreich erscheint ein Oxidsystem aus TiO_2, V_2O_5 und MoO_3.

Andererseits trägt auch die vorgeschriebene Abgasuntersuchung (in Deutschland seit 1.12.1993) dazu bei, daß vermehrt Altkats anfallen, die wiederum entsorgt werden müssen.

Auf Deutschands Straßen stehen und fahren mittlerweile rund 40 Millionen Pkw (Gesamtbestand angemeldete Pkw per 1.7.1994: 39 765402). Noch haben nicht alle davon Kats, z.B. die Zweitakter. Bei einer Austauschquote von jährlich 5% könnten allein in Deutschland etwa 350 000 Altkats in ein Recycling gehen. In Europa wird 1995 mit einer, in 2000 mit acht Millionen Stück gerechnet. Die Aufarbeitung von 350 000 Stück entsprechend ca 250 t liefert zurückgewonnenes Platin, Rhodium und Palladium im Wert von 10 Millionen DM. Dennoch ist die Entsorgung nicht kostenneutral. Letztlich muß wie stets der Endverbraucher zahlen; aber für ein vernünftiges Konzept und für Arbeitsplätze und für eine etwas bessere oder gegenwärtig für eine nicht ganz so schlechte Umwelt: „Umwelt macht Arbeit".

Ein Wort zum *Diesel:* Der Dieselmotor arbeitet mit Luftüberschuß, d.h. mit $\gamma < 1$. Konsequenterweise können deshalb aus prinzipiellen Gründen Stickoxide unter dieser Bedingung im Dieselabgas nicht reduziert werden. Trotz Luftüberschuß kann bei nichtopimierten Dieselmotoren Dieselruß entstehen, weil es wegen der Temperaturerniedrigung im Brennraum während der Expansion in partiellen Zonen zur Verschleppung bzw. Aussetzung der Verbrennung kommt. Der Diesel bleibt also hinsichtlich der Umweltbelastung problematisch, zumal die Kohlenstoffpartikel auf ihrer Oberfläche von höheren Kohlenwasserstoffen bedeckt sind, die in den Luftwegen unangenehm werden können. An verträglichen Kompromissen wird gearbeitet. Der bei Dieselmotoren eingesetzte Katalysator ist ein reiner Oxidationskatalysator, der Kohlenwasserstoffe zu Wasser und Kohlendioxid und Kohlemonoxid zu Kohlendioxid aufoxidiert. Die Stickoxidreduktion vermag er mangels reduzierender Reaktanten nicht zu begünstigen. Durch teilweise Abgasrückführung im Teillastbereich kann dennoch die Stickoxid-Emission verringert werden (Reaktion mit den HC auf den Partikeln, Seltenerdperovskite als Katalysatoren), allerdings nicht im Vollastbereich.

Im Turbodiesel ist diese Abgasrückführung im geschlossenen Regelkreis mikroprozessorgesteuert. (Parameter: Motortemperatur, Drehzahl, Last). Aber es bleibt dabei:

Partikel und Stickoxide müssen beim Diesel, insbesondere bei den „Brummis" leider in Kauf genommen werden. Was der Kat bei den PKWn in Deutschland 1993 an Stickoxiden minderte, wurde leider durch die LKW wieder überkompensiert (s.o.).

Kohlenwasserstoffe und Stickoxide sind Ozonvorläufer:

Bodennahes Ozon, das dreiatomige Allotrop der Elementarsubstanz Sauerstoff, ist ein ziemlich aggressives Reizgas und zerstört oxidativ organische Substanz und lebendes Gewebe. In 15 - 50 km Höhe wiederum ist es lebenswichtig als Schutzschild gegenüber harter ultravioletter Strahlung, die es absorbiert, und die deshalb gar nicht erst auf die Erdoberfläche trifft. Das Ozonloch darf also nicht größer werden. Der Erhaltung dieser stationären Ozonschicht dienen Maßnahmen zum Ausstieg aus den Fluorchlorkohlenwasserstoffen als Treibgas oder Kühlmittel in der Kältetechnik.

In bodennahen Schichten begünstigen in sehr komplexen Reaktionen Kohlenwasserstoffe und Stickoxide die photochemische Umwandlung von molekularem Sauerstoff in hier schädliches Ozon. Es müssen also zusammentreffen Sonnenlicht, Sauerstoff und eben die genannten Ozonvorläufer. Besonders bei Hochdruckwetterlagen im Sommer (hohe mittlere Sonnenscheindauer) kommt es in Verkehrsballungsgebieten in Großstädten zum gefürchteten Sommersmog in der Atmosphäre und in dessen unmittelbarer Folge zu gesundheitsgefährdenden Ozonkonzentrationen:

NO wirkt als Homogenkatalysator für die photochemische Umwandlung von Kohlenwasserstoffen in Oxidationsprodukte (Aldehyde, Peroxide und deren Folgeprodukte) und Ozon, z.B. nach den folgenden Bruttoreaktionsgleichungen (in Wirklichkeit handelt es sich um mehrere Gruppen von radikalischen Reaktionen und Zyklen)

$$RCH_3 + 4O_2 \quad \Rightarrow\Rightarrow \quad RCHO + 2O_3 + H_2O$$

$$CH_4 + 8O_2 \quad \Rightarrow\Rightarrow \quad CO_2 + 4O_3 + 2H_2O$$

Bei Sommersmog soll deshalb (Umweltministerkonferenz Dezember 1994 in Chemnitz) ab 1995 Fahrverbot für „Benziner" ohne geregelten Katalysator und nicht-schadstoffarme Diesel-Pkw gelten. Das erscheint vernünftig. Die Diesel-Lkw , die stark an der Ozonbildung beteiligt sind, befinden sich statistisch mehr auf Fernstraßen außerhalb geschlossener Ortschaften.

In der Volksrepublik China kommen bislang nur 1,2 Autos auf 1000 Menschen; es handelt sich aber um weit über 1000 x 1000 x 1000 Menschen, und der ehrgeizige Plan des Reiches der Mitte, ein eigenständiges chinesi

sches Volks-Familien-Auto für mehrere hundert Millionen mit Hilfe gestandener Automobilhersteller zu produzieren, mobilisiert gegenwärtig die Branche weltweit. Hochgerechnet auf den deutschen Sättigungsgrad von aktuell 510 Autos auf 1000 Einwohner sind das 600 Millionen Pkw. Sie würden sich als gigantischer Konvoi 67 mal um den Äquator schlingen. Selbst wenn das nur teilweise und mit dem anvisierten Öko-Mobil mit einer 3 vor dem Komma im Verbrauch realisiert würde: Was kommt da zusätzlich auf die Atmosphäre zu?

Der Autor dankt der Volkswagen AG Wolfsburg für freundlichst überlassene Angaben .

[1] E. Culotto, D.R. Koshland jr.; Science 258, 1862 -1865 [1992]

Siegfried Engels

Faszination Feuer. Von Prometheus bis Lavoisier*

1. Einleitung

Mit diesem Beitrag soll versucht werden, einen Überblick über den jahrtausendlangen Weg des Menschen im Ringen um das Verständnis dessen zu geben, was schließlich im 18. Jahrhundert durch ANTOINE LAVOISIER zu einer Umwälzung in der Chemie führte: Gemeint ist letzten Endes die Aufklärung der Oxidation und damit die der Funktion des Sauerstoffs im Prozeß chemischer Reaktionen.

Dieses Ringen war über lange Zeiträume ein unbewußtes; die Beschäftigung und Auseinandersetzung mit chemischen Sachverhalten (im weitesten Sinne) trug dabei keineswegs die Grundmerkmale, die allen Wissenschaften eigen sind [1]:

- Abstraktheit und Verallgemeinerbarkeit
- Allgemeingültigkeit und Intersubjektivität
- Nachprüfbarkeit, Rechtfertigung und Begründbarkeit der Erkenntnis.

Wenngleich es in der Geschichte der Philosophie zu verschiedenen Bestimmungen und Definitionen des Begriffs Wissenschaft, ihrer Ziele, Grenzen, Aufgaben, Methoden und damit auch Klassifikationen kommt, ist es für das Selbstverständnis der "Einzelwissenschaft Chemie" durchaus wichtig, daß

"die naturwissenschaftliche Tätigkeit ... nicht erst von dem Zeitpunkt an gerechnet werden ... kann, an dem naturwissenschaftliche Theorien aufgestellt, sondern von dem Tage an, an dem naturwissenschaftliche Prozesse in der Produktion des materiellen Lebensunterhalts angewandt wurden. Das theoretische Wissen spielte dabei zunächst keine Rolle, sondern wichtig war jeweils die Tatsache, daß die Zusammenhänge erkannt werden, die nötig sind, um naturwissenschaftliche Prozesse auszunutzen" [2]

Und weiter:

"... die chemische Tätigkeit ... ist so alt wie der homo sapiens und immer auf das gleiche Ziel gerichtet: Stoffumwandlungen zu erzielen" [2].

---

* Vortrag, gehalten vor der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 17.11.1994

Bei der Darstellung des Stoffes wollen wir uns - ausgehend von der **Frühzeit** - vorrangig aus chemischer Sicht - mit Aussagen, und damit Leistungen, **griechischer Naturphilosophen** [3] des 6. und 5. Jh. v. Chr. (und danach) sowie mit Theorien und chemischen Tatbeständen in den **arabischen Kalifaten** vorrangig des 9. und 10. Jh. beschäftigen. Nach einer kurzen Behandlung von Ergebnissen der praktischen Alchemie des **europäischen Mittelalters** gelangen wir dann in das **18. Jahrhundert**, das für die Herausbildung und Etablierung der Chemie als Wissenschaft von größter Bedeutung war, vgl. dazu z. B. [4].

2. Frühzeit

Fragt man nach einem der potentiellen Ursprünge der Chemie, so ist dieser zweifelsohne in der Beherrschung des Feuers durch den Menschen zu sehen, z. B. [5]. Schon frühzeitig stellte dieser das Feuer in seinen Dienst (Tab. 1). Hinsichtlich dessen Funktion als Waffe sei neben [5] besonders auf die unter [6] zitierte Arbeit verwiesen.

- Das Phänomen "Feuer" fesselte den Menschen von Anbeginn; beispielhaft seien genannt: Der *Feuerkult der Parsen*, d. h. der Anhänger des altiranischen Priesters und reformatorischen Propheten ZARATHUSTRAs, der in den Zeitraum zwischen etwa 1000 und 600 v. Chr. einzuordnen ist. Die Feuerverehrung erfolgte ursprünglich auf offenem Felde, später in Feuertempeln. Das Feuer galt als Element der Reinheit, und es mußte daher vor aller Verunreinigung bewahrt werden. Es vertrieb die Dämonen und diente somit zur Reinigung der Welt.

- Aus der Vielzahl von *Göttern im Hinduismus*, einer der ältesten Religionen (im engeren Sinn seit etwa 8. Jh. v. Chr. [7]), ragen als Hauptgötter VISHNU, der Gott der Liebe, und SHIVA, der Gott der Zerstörung, heraus. SHIVA ist die Verkörperung kosmischer Energie, ist Licht und Feuer. In bildlichen Darstellungen sehen wir ihn vierarmig, mit fliegenden Locken und gerahmt von einem Flammenkranz.

- ZEUS und WODAN (WOTAN, nord. ODIN) herrschten mit Blitz und Donner. VOLCANUS, der italienische Gott des Feuers, wurde mit dessen ungezähmter Natur (z. B. der von Vulkanen) in Verbindung gebracht. Aus Sicherheitsgründen stand der ihm geweihte Tempel stets außerhalb der Stadt. Allmählich wurde VOLCANUS mit dem griechischen Gott des Feuers und der Schmiedekunst, HEPHAISTOS, identifiziert. Dessen Schmiede glaubte man schließlich unter dem Aetna gelegen.

Tabelle 1:	Feuer: Erste Beherrschung einer Naturkraft Potentieller Ursprung der Chemie

✦ Älteste menschliche Feuerstellen (Auswahl)

1 800 000 - 1 000 000 v. Cr.	→	Swartkransker Höhlen (Südafrika)
500 000 v. Chr.	→	Choukoutien (SW von Peking)
450 000 v. Chr.	→	Vértesszöllös (N-Ungarn)
350 000 v. Chr.	→	Bilzingsleben (südl. des Kyffhäusergebirges)

✦ Funktion: Kälteschutz

Nahrungsmittelzubereitung

Waffe, Schutz vor Feinden

Beleuchtung (Altamira, Lascaux; Foz Coa*,

Combe d'Arc*

✦ Phänomen: Feuerkult der Parsen (ZARATHUSTRA)

Hinduismus: Gott SHIVA

BUDDHAS Feuerpredigt

HIPPOKRATES (460 - 377 v. Chr.):

"Inneres Feuer"

ARISTOTELES (384 - 322 v. Chr.): Himmlisches Element

VESTA-Kult

Olympisches Feuer

"Ewige Flamme"

---

* Die Höhlenzeichungen von Foz Coa (rd. 400 km NO von Lissabon; 1992 entdeckt, Ende 1994 bekanntgegeben) sind über 3 km verstreut. Sie werden von der UNESCO als die bedeutendsten Felszeichnungen Europas eingestuft.

* Die in einer Höhe von Combe d'Arc (nördlich von Avignon; entdeckt: 18.12.1994, erstmals begangen: 24.12.1994) gezählten etwa 300 Tiergemälde sind möglicherweise älter als die Höhlenmalereien von Altamira und Lascaux.

- Nach biblischen Schilderungen wurde JAHVE (Gott, Herr) ursprünglich als ein Naturgott vorgestellt, der sich im Rauch, Gewitter und Erdbeben sowie in vulkanischen Erscheinungen manifestierte [7]. Und JAHVE erschien dann MOSE im brennenden Busch (2. Mos. 3: "*... und er sah, daß der Busch mit Feuer brannte und ward doch nicht verzehrt", 2. Mos. 3.2.)* und sprach zu ihm: "*Ich werde sein, der ich sein werde.*" BUDDHA (geb. um etwa 560 v. Chr.) setzte in seiner *Feuerpredigt* das Leben mit einer Flamme gleich, die immer weiterbrennt, weil sie durch die drei Kardinalfehler Begierde, Haß und Verleumdung immer neue Nahrung erhält.

- HIPPOKRATES konnte mit seiner Vorstellung, daß in Lebewesen ein inneres Feuer wirkt, viele Vorgänge im Organismus (z. B. Wachsen des Embryos im Uterus; Verdauung) erklären: Feuer ist Leben, und Leben ist Feuer. Im übertragenen Sinn hat sich diese suggestive Gleichung bis in unsere Zeit erhalten: Ein Mensch mit "feurigem" Temperament, ein "feuriges" Pferd.

- ARISTOTELES lehrte, das Feuer "strebe" nach oben, so wie die Erde nach unten "strebe", und sei deshalb ein himmlisches Element.

- Weiterhin sei das Wirken der *Vestalinen* erwähnt, d. h. der römischen Priesterinnen der Göttin VESTA. Jene mußten nach althergebrachtem Brauch das ewige Feuer im Vestatempel (am Forum Romanum gelegen) hüten. Im Vestafeuer erblickte man ein Unterpfand für das Heil des römischen Staates.

Weitere Beispiele der Feuerverehrung bieten das "*Olympische Feuer*" und die "*Ewige Flamme*" bei Toten- und Heldengedenkstätten.

In der griechischen Sage war es PROMETHEUS, der das von ZEUS den Menschen vorenthaltene Feuer vom Himmel stahl, es ihnen zur Erde brachte und damit - wie es seinerzeit gesehen wurde - Handwerk und Künste ermöglichte. PROMETHEUS wurde in der Folgezeit zum Symbol des menschlichen Fortschritts und der Feuerraub ein Sinnbild des Glaubens an Wissenschaft und Zukunft. Aus literarischer Sicht "*... ordnete sich ... das Prometheus-Symbol schließlich ... dem Gedanken zu, daß der Mensch dasjenige Gottesgeschöpf ist, das selbst an der schöpferischen Potenz partizipiert*" [8].

Und weiter:

"*... der antike Kulturheros ist ... das Urbild der Weisheit, die ihrerseits die Entstehung von Individualität im Menschen ermöglicht*" [8, S. 109].

Kehren wir zum "Phänomen Feuer" zurück. Im Bemühen des Menschen um ein näheres Verständnis der ihn umgebenden "Natur" spielte das Feuer seit jeher eine große Rolle. Die bemerkenswerten Leistungen der *griechischen Naturphilosophie* des 6. und 5. Jh. v. Chr. (und Folgezeit, Abschn. 3) bieten hierfür wesentliche Belege. Aber noch 1775 - 1777, d. h. rund 2400 bis 2300 Jahren danach, versuchte CARL WILHELM SCHEELE, mit seiner Schrift *"Chemische Abhandlung von der Luft und dem Feuer"* die Natur des Feuers zu ergründen [9]. Und es sei vorweggenommen: 1771 hatte er mit seinen Arbeiten den Sauerstoff entdeckt (Abschn. 6). Und IMMANUEL KANT (1724 - 1804) beschrieb in der Abhandlung "De igne" (Über das Feuer), mit der er am 12. Juni 1755 an der Philosophischen Fakultät der Universität Königsberg promovierte, daß das Feuer noch immer ein nicht erklärbares Element sei. Es trage in sich die Merkmale der flüssigen Materie und habe ursprünglich in einem anderen Zustand vorgelegen. Doch kehren wir in frühere Zeiten zurück.

Die Beschäftigung des Menschen mit chemischen Sachverhalten war in früheren Zeiten u. a. durch die Gewinnung von *Metallen* und *Legierungen* (vgl. dazu [4]; [10]) gekennzeichnet (Tabellen 2 und 3). Hierfür sowie zur Herstellung von *Keramiken* und *Gläsern* waren vergleichsweise hohe Temperaturen erforderlich. So erfolgte der Brand von Keramiken (älteste Nachweise: 6./5. Jhtsd. v. Chr., Mesopotamien) anfangs am offenen Feuer. Erste Ofen"konstruktionen" sind aus dem 5. Jhtsd. v. Chr. bekannt. Die Luftzufuhr basierte auf der Nutzung von Hangwinden (Ofen in Hanglage), später kamen das Blasrohr und seit etwa 1600 v. Chr. der Blasebalg hinzu. Wie verschiedene Versuche gezeigt haben, konnten in mykenischen Brennöfen bis zu 1000 ^{o}C erreicht werden.

Die Anfänge der Herstellung von Glas im weitesten Sinne seiner Definition reichen bis in das 5./4. Jahrtausend v. Chr. zurück (Mesopotamien, Ägypten, Syrien, Iran).

3. Griechische Naturphilosophie

Auf dem Weg zu den Vertretern der ionischen Naturphilosophie müssen wir einen großen zeitlichen Schritt vollziehen, der an Hand von Zeittafeln erfolgen soll. Ausgehend von der *Mittleren Steinzeit* (Tab. 2), überleitend zur *Jungsteinzeit, Gentilordnung* bis zur *Ausbildung der Klassengesellschaft* sind wesentliche Fortschritte in der Entwicklung der Produktivkräfte (z. B. Pflug, Weberei, Rad) sowie in der Entwicklung verschiedener Schriften (Sumer, Ägypten, babylonisch-assyrischer Raum) zu verzeichnen. Im Hinblick auf sich anbahnende Entwicklungen im Bereich der späteren Chemie sei besonders auf die Aspekte der Metallgewinnung hingewiesen. In diesem

Zusammenhang soll erwähnt werden, daß die ältesten Bleifunde aus der Zeit um 6500 v. Chr. (ägäischer Raum) stammen. Sie deuten darauf hin, daß Blei nach dem "Röstreaktionsverfahren" noch vor dem Kupfer verhüttet worden ist. Daneben war in der Frühzeit unbewußtes chemisches Schaffen auch auf andere Bereiche gerichtet (z. B. Bier-, Weinbereitung; kalkhaltiger Mörtel).

Tabelle 2: Synoptische Zeittafel: Vor 4500 bis 2500 v. Chr

Mittlere Steinzeit	**Jungsteinzeit**	**Gentil-ordnung**		**Klassenge-sellschaft**
Werkzeuge Töpferei Kultisches Denken	Pflug Band/Schnur keramik	Bilderschrift-zeichen in Sumer Weberei in Ägypten	Töpfer-scheibe (Kleinasien) Rad	Staatenbildg Bilderschrift (Ägypten) Babyl.-assyr Keilschrift.
4500	4000	3500	3000	2500
Kaltverarbei-tung von *Cu* und *Au*	*Schmelzen* u. *Schmieden* von Cu und Au	Cu aus car-bonatischen Erzen *Cu-Leg. Erste Bronzen*	Gezielte Herstellung von *Zinn-bronzen*	*Bier-* und *Weinberei-tung. Gebrannter Kalk*

Und anschließend an die Zeitmarke 2500 v. Chr. (Tab. 3) gelangen wir über die *Bronzezeit* in Kleinasien, den *kretisch-mykenischen Kulturkreis, das Troia-Reich* in das *antike Griechenland* mit seinen Vertretern der *Naturphilosophie.*

Auf chemisch-praktischem Gebiet erfolgten u. a. wesentliche Fortschritte in der Metallurgie, der Textilfärberei sowie der Glasverarbeitung. Auf "theoretischem" Gebiet sollen die Ausbildung der *Vier-Elemente-Lehre* (s. u.), die *Begründung der Atomlehre* durch LEUKIPPOS aus (offenbar) Milet (Mitte und zweite Hälfte des 5. Jh. v. Chr.; um 480/460 v. Chr.?) und die Ausarbeitung des ersten durchgebildeten Systems des Atomismus durch DEMOKRIT aus Abdera (um 460 - 370 (360) v. Chr.) hervorgehoben werden.

Damit sind wir bei den Anfängen der griechischen Wissenschaft, die in Landstrichen entstand, wo der Einfluß der älteren Kulturen noch sehr spürbar war. Hier soll nicht im einzelnen der Frage nachgegangen werden, *warum* Philosophie in Griechenland entstand. Dies ist beispielsweise von SEIDEL ausführlich erörtert worden [11, S. 35 - 57]. Reizvoll ist es jedoch nachzulesen, wie schon sehr frühzeitig hierauf eine Antwort gegeben wor-

den ist. So schreibt WILHELM VON OCKHAM (um 1285/90 - um 1347/49), Literat, Theologe, Logiker und einer der großen Philosophen des Mittelalters, daß "... *der Zweck ... dieser Wissenschaft* (gemeint ist die Naturphilosophie, S. E.) *jene Absicht ist, aufgrund derer diese Wissenschaft erlernt und produziert wird, ohne die es diese Wissenschaft nicht gäbe"* [12, S. 14]. Und er fährt fort: *"Das Gesagte betrifft die Ursachen dieser Wissenschaft im strengen und eigentlichen Sinne von Ursache, das heißt also als dasjenige, von dem das Vorhandensein oder Entstehen abhängt."* Erwähnt sei noch, daß OCKHAM der Naturphilosophie vier Ursachen zuordnet [12, S. 14 - 15]: Materialursache (causa materialis), Formalursache (causa formalis), Wirkursache (causa efficiens) und Zweckursache.

Tabelle 3: Synoptische Zeittafel: 2500 bis 1 v. Chr.

2500	2000	1500	1000	500
Bronzezeit in Kleinasien Blasebalg Stonehenge	Gesetzes sammlung (HAMMURABI) **Kretisch-mykenische Kultur**	Buchstabenschrift (Phönizier) Troia-Reich Bernsteinhandel (Europa-Vorderasien)	**Griechenland:** SOLON, HOMER; olymp. Spiele **Ionische Naturphilosophie**	**Griech. Sklavenhalterdemokratie, Römisches Reich:** CAESAR, CICERO HORAZ
Anfänge der *Fe-Herstell* *Reines Ag*	*Cu* aus *sulfid Erzen.* *Sn (China, Japan).* *Glasflüsse* *Textilfärb.*	Fe (*Rennverfahren*) Sn, Zn in Indien	*Purpurfärb.* *Alaunbeize* *Treibprozeß* zur Ag-Gew	Geblasenes *Glas* *Atomtheorie* **Vier-Elemente-Lehre**

Die Anfänge der griechischen Wissenschaften fallen in eine Zeit, in der *"die Tradition nicht sehr hoch geschätzt ... wurde, dagegen konnten neue Antworten auf alte Fragen auf Gehör rechnen. Der große Wert der frühesten Periode des griechischen Denkens lag in dem Versuch, alle Fragen einfach und konkret zu beantworten"* (BERNAL [13]). Und es ist das große historische Verdienst des THALES von Milet, daß er *"als erster den Versuch unternahm, ein der bisherigen mythischen Vorstellungswelt entgegengesetztes Weltbild zu schaffen"* (11, S. 39]. Er steht in der Reihe der griechischen Naturphilosophen an erster Stelle (Tab. 4). Der Ausgangspunkt in seiner rationalen Erkenntnis der Gesetzmäßigkeiten der Natur war die Frage " *nach dem Urgrund und dem allgemeinen Substrat aller Dinge"*. Dieses *"Urelement"* hat Thales im *Wasser*, im Feuchten gesehen. Wie er zu dieser

Aussage kam, können wir nur vermuten, da von ihm keine Aufzeichnungen auf uns überkommen sind. ARISTOTELES schreibt hierzu u. a.: "Er (d. h. THALES, S. E.) *kam zu dieser Annahme wahrscheinlich deshalb, weil er sah, daß die Nahrung aller Dinge feucht ist und selbst das Warme aus dem Feuchten entsteht und durch das Feuchte lebt; bei allem aber ist das, woraus es entsteht, seine Quelle"* [14].

NIETZSCHE, dessen Geburtstag sich am 15. Oktober 1994 zum hundertsten Male jährte, würdigte THALES' Leistung in einer für den Naturwissenschaftler bestechenden Diktion [15, S. 813]: *"Die griechische Philosophie scheint mit einem ungereimten Einfalle zu beginnen, mit dem Satze, daß das Wasser der Ursprung und der Mutterschooß aller Dinge sei: ist es wirklich nöthig, hierbei stille zu stehen und ernst zu werden? Ja, und aus drei Gründen: erstens weil der Satz etwas vom Ursprung der Dinge aussagt und zweitens, weil er dies ohne Bild und Fabelei thut; und endlich drittens, weil in ihm wenngleich nur im Zustande der Verpuppung der Gedanke enthalten ist: alles ist eins. Der erstgenannte Grund läßt Thales noch in der Gemeinschaft mit Religiösen und Abergläubischen, der zweite aber nimmt ihn aus dieser Gesellschaft und zeigt uns ihn als Naturforscher, aber vermöge des dritten Grundes gilt Thales als der erste griechische Philosoph."*

Dieser elementare Materialismus des THALES findet seine Fortsetzung bei den nachfolgenden Vorsokratikern (Tab. 4). Sie führten weitere bestimmte, sinnlich faßbare "Elemente" (Prinzipien) als Urstoffe an, um die Vielfalt der Naturerscheinungen erklären zu können: *Luft*, *Feuer* bzw. *Erde* HERAKLEITOS, der Philosoph einer stetigen Veränderung der Dinge(pantha rhei, griech.: alles fließt), lehrte ebenfalls, daß *"aus Allem Eins und aus Einem Alles"* wird. Dieses Ein-und-Alles sah er im *Feuer*, das er sich als materielle Substanz und Verkörperung eines stetigen Werdens und Vergehens vorstellte, wobei *"... alles Geschehen ... infolge eines Gegensatzes ... erfolge": "Alles ist Austausch des Feuers und das Feuer Austausch von allem, gerade wie für Gold Waren und für Waren Gold eingetauscht wird"* [16].

Tabelle 4: Griechische Naturphilosophie: Vier-Elemente Lehre	
Vorsokratiker	**Ur-Element**
- THALES von Milet (um 625 - um 545 v. Chr	*Wasser*
- ANAXIMENES von Milet (um 585 - 525 v. Chr.)	*Luft*
- DIOGENES von Apolloneia (Phrygien oder Kreta?) (499/498 - 428/427 v. Chr.)	*Luft*
- HERAKLEITOS von Ephesos (um 544/540) - 480 v. Chr.)	*Feuer*
- XENOPHANES aus Kolophon (um 570 - um 480)	*Erde*
- ANAXIMANDROS aus Milet (um 611 - um 546)	*Luft, Rauch* (d. „Mittlere")
EMPEDOKLES von Akragas(Agrigent)/Sizilien (um 495 (483) - 435 (423) v. Chr.)	Vier Wurzeln der Dinge *Erde, Feuer, Luft, Wasser*

EMPEDOKLES, der mit seiner Lehre an die materialistische Naturphilosophie unmittelbar anknüpft, setzte die vier qualitativ unterschiedlichen "Elemente" Erde, Feuer, Luft und Wasser als die einzigen Grundkörper voraus. Er nennt sie *Wurzeln*. Die Grundannahme des EMPEDOKLES war dabei, *"... daß das Seiende nicht aus dem Nichts entstehen und sich nicht in ein Nichts auflösen kann. Deshalb entsteht und vergeht alles durch Mischung und Entmischung von unveränderlichen Elementen"* [17, S. 95].

Diese "Wurzeln" sind unveränderlich, in kleinste Teile zerlegbar, und die Mannigfaltigkeit möglicher Verbindungen erfolgt durch *Variation der quantitativen Verhältnisse.* Damit hat EMPEDOKLES *"... als erster den Gedanken des Aufbaus der physischen Welt aus einer beschränkten Zahl von Elementen in die Vorgeschichte der Wissenschaft eingebracht"* [18, S. 234].

PLATON, der Begründer der idealistischen Linie in der Philosophie, übernimmt die Vorstellungen des EMPEDOKLES und modifiziert sie im Sinne seiner Ideenlehre, wonach die Ideen nicht nur die ruhenden Abbilder aller materiellen Dinge, sondern auch deren Ursache und Zweck sind. Die vier Elemente sind die stofflichen Träger der Erscheinungswelt, und die Vielfalt der Dinge, die die Natur kennzeichnen, sind nichts anderes als die Modifikationen dieser vier Prinzipien.

In seinem spätesten Dialog, dem "Timaios", gibt PLATON eine mit Religion und Mystik verbundene *Erklärung der Natur durch geometrische und Zahlenproportionen.* Aus der durch die Tätigkeit eines "Gottes" (Demiurg, urspr. jemand, der öffentliche Werke durchführt (Handwerker, Künstler), dann: Weltschöpfer) geformten gestaltlosen Urmaterie entstehen mathematische Gebilde (zusammengesetzt aus Dreiecken, so auch das Quadrat), die den vier Elementen zugeordnet werden (Tab. 5). Diese sind *variabel* und *modifizierbar*, und PLATON drückt das wie folgt aus (zitiert u. a. nach [19], S. 24):

"Wir müssen uns erinnern, daß es vom Feuer viele Arten gibt; zum Beispiel die Flamme und jene Ausströmung aus Flammen, die zwar brennt, aber den Augen kein Licht gibt, und jene, die in der glühenden Asche zurückbleibt, wenn die Flamme erloschen ist ...

... und ebenso ist es mit der Luft. Die reinste ist diejenige, die man Äther nennt, und die trübste ist Nebel und Dunst, und so gibt es noch andere Arten der Luft, die keinen besonderen Namen haben - sie alle entstehen aus der Ungleichheit ihrer <<Dreiecke>>"

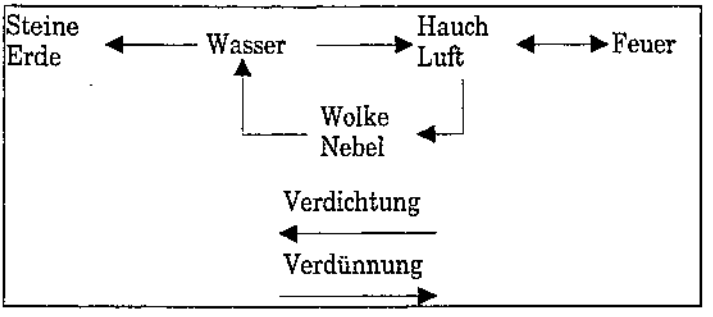


Abb. 1 Elementumwandlung nach PLATON („Timaios")

Nach Platon ist eine *Umwandlung der Elemente* durch die *Umlagerung der Dreiecke* möglich. Hierbei fällt der *Verdichtung* und *Verdünnung* eine wichtige Rolle zu (Abb. 1).

Im "Timaios" heißt es (zitiert nach [20], S. 93):

"Was zunächst den Stoff anlangt, den wir soeben als Wasser bezeichneten, so sehen wir, daß, wenn er sich verdichtet, wie wir annehmen, er zu Stein und Erde wird; wenn sich der nämliche Stoff dagegen lockert und löst, dann wird er zu Hauch und Luft; die Luft aber, wenn erhitzt, wird zu Feuer, und umgekehrt nimmt das Feuer, wenn es zusammengeballt wird und erlischt, wieder die Gestalt der Luft an, und wenn die Luft wiederum sich zusammenzieht und verdichtet, so wird sie zu Wolke und Nebel, und verdichten

sich diese noch stärker, so entwickelt sich aus ihnen strömendes Wasser und aus dem Wasser abermals Erde und Steine, und so wandeln sie sich denn im Kreislauf ineinander und eben darin besteht, wie es scheint, das Werden."

Tabelle 5: PLATON (427 - 347 v. Chr.): Naturerklärung		
- Elementpartikeln: Geometrische Gebilde		
Erde:	Quadrate	→ Würfel
Feuer:	Dreiecke	→ "Pyramide", entspr. dem Tetraeder
Luft:	Dreiecke	→ Oktaeder
Wasser:	Dreiecke	→ Ikosaeder
- Elemente: Variabel und modifizierbar		
- Umwandlung der Elemente durch Umlagerung der Dreiecke		

Wertet man die oben insgesamt nur kurz angedeuteten großartigen Leistungen der Griechen auf naturphilosophischem Gebiet, so müssen trotzdem gewisse kritische Anmerkungen getroffen werden. Wenngleich die Naturphilosophie ein beeindruckendes Bild vom Entstehen und von der Entwicklung des Kosmos, vielfach basierend auf der "Elemente-Lehre" zeichnete, die ohne Götter auskam, *"... lag ihre fundamentale Schwäche ... in der Unbestimmtheit und dem rein beschreibenden und qualitativen Charakter"* [13]. Und weiter: *"Ihre Elemente hatten zwei unvereinbare Funktionen zu erfüllen. Einerseits vertraten sie die damals bekannten Stoffe und die Vorgänge in der Welt; sie sollten ... das ganze Panorama von Land und Meer, Sonnenschein und Sturm erklären. In diesem Sinn sprechen wir ja heute noch vom Wüten der Elemente. Andererseits bezeichneten die Elemente auch Eigenschaften, wie z. B. Wärme und Kälte, Feuchtigkeit und Trockenheit, Leichtigkeit und Schwere, die allen Dingen zukommen können. Das einzelne Element war auch nicht an einen bestimmten Stoff gebunden, wie etwa die chemischen Elemente des 19. Jahrhunderts."*

Und schließlich sei angemerkt, daß zu dieser Zeit eine starke Abneigung gegen das Experiment (im Sinne der Überprüfung bereits vollzogener Überlegungen sowie als Ausgangspunkt im Prozeß der Theoriebildung und -entwicklung) bestand. Und es kam nicht von ungefähr, daß bereits in der Antike "*banausos*" (grch., Handwerker; urspr.:Ofenheizer) abwertend gebraucht wurde. Denn schließlich verachtete der Freie, der sich geistigen Tätigkeiten widmen konnte, praktisch jegliche Handarbeit (und damit auch das Experiment).

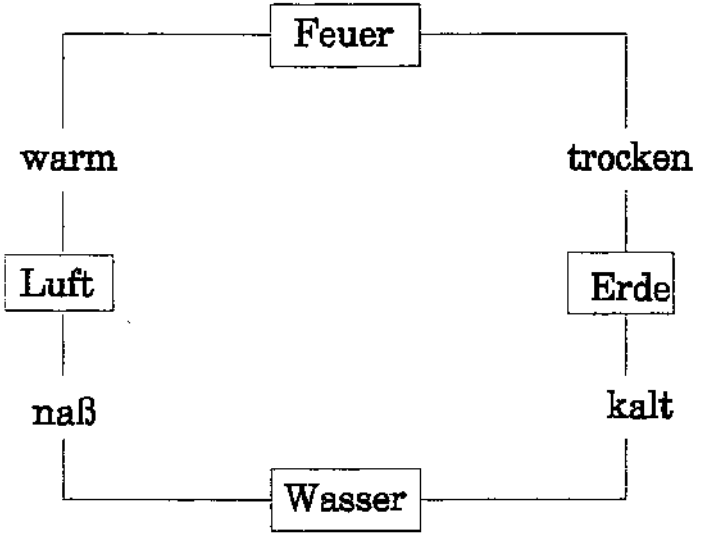


Abb. 2:
ARISTOTELES (384 - 322 v. Chr.): Vier-Element-Lehre - „Ur-Qualitäten"

Es blieb aber ARISTOTELES, dem Philosophen der Erfahrungswelt, vorbehalten, im Rahmen seiner Elemente-Lehre gerade dem Wirken der arabischen Alchemisten (Abschn. 4) sowie den lateinischen Alchemisten des Mittelalters (Abschn. 5) eine "theoretische" Begründung für ihre Arbeit gegeben zu haben.

In seiner Lehre, die die Existenz einer qualitativ einheitlichen Urmaterie beinhaltet, ordnete er allen Stoffen bestimmte sinnlich faßbare Eigenschaften zu:

"Es gibt vier elementare Eigenschaften, und diese Vielzahl läßt sich zu sechs Paaren kombinieren. Gegensätze aber können nicht gepaart werden, denn es ist unmöglich, daß ein Ding gleichzeitig heiß und kalt oder naß und trocken sein kann. So ist es klar, daß es nur vier Paare elementarer Eigenschaften gibt: Warm und trocken, warm und naß, kalt und trocken und schließlich kalt und naß. Diese vier Paare sind den Elementen zugeordnet. ... Denn das Feuer ist warm und trocken, Luft hingegen warm und naß, und Wasser ist kalt und naß, während schließlich Erde kalt und trocken ist. So sind die verschiedenen elementaren Qualitäten vernünftig und der Theorie gemäß auf die Elemente verteilt." Mit anderen Worten: Auf Grund der genannten Gegensätze ist die Urmaterie qualitativ wandelbar.

Tabelle 6: ARISTOTELES: Vier-Elemente-Lehre
- Die 4 Elemente und somit alle Stoffe sind nur eine "Form" ("Manifestation") ihrer Eigenschaften ("Qualitäten") - Die Qualitäten sind untereinander austauschbar, d. h.: Die Elemente sind ineinander überführbar - Isolierung der Qualitäten: "*Qualität an sich*" ⇓ "Theoretisch-philosophischer Ausgangspunkt" des *Transmutationsgedankens*

Wichtig an dieser Lehre war weiterhin die Aussage, daß derartige *Qualitäten untereinander austauschbar* seien (Tab. 6) und folglich die Elemente ineinander überführt werden können. Und schließlich sollte es danach auch gelingen, diese Qualitäten (stofflich) zu *isolieren* und sie *auf andere Stoffe zu übertragen*. Damit war den Vertretern nachfolgender Generationen, die sich mit chemischen Sachverhalten beschäftigten, das theoretische Rüstzeug dafür geliefert, die *Transmutation* von Stoffen im "chemischen" Experiment anzustreben. Hieraus resultierten - trotz aller Auswüchse der Goldmacherei durch Alchemisten späterer Jahrhunderte - zahlreiche bedeutsame Entdekkungen auf chemischem Gebiet. Es ist JUSTUS VON LIEBIG zu verdanken, auf diesen Sachverhalt mit Nachdruck verwiesen zu haben [21]:

"Die Alchemie ist niemals etwas anderes als die Chemie gewesen; ihre beständige Verwechslung mit der Goldmacherei des 16. und 17. Jahrhunderts ist die größte Ungerechtigkeit. Unter den Alchemisten befand sich stets ein Kern echter Naturforscher ... Die Alchemie war die Wissenschaft."

Verlassen wir den Zeitraum der Antike und wenden uns Aspekten der *angewandten Chemie und der Naturphilosophie in den arabischen Kalifaten* vorrangig des 9. und 10. Jh. zu. Die Tabellen 7 und 8 vermitteln diesen Übergang an Hand ausgewählter Daten zu kulturellen und geschichtlichen Ereignissen in Beziehung zur Entwicklung chemischer Kenntnisse und Fertigkeiten.

4. Arabische Kalifate: Naturphilosophie

Die Leistungen einer Vielzahl von Völkern in den arabischen Kalifaten auf geistig-kulturellem Gebiet haben auch der Chemie wichtige Impulse für ihre Weiterentwicklung vermittelt. Die nach dem Tode MOHAMMEDs einsetzenden Eroberungszüge (Tab. 9) führten zu einem Riesenreich, in dem das reiche Kulturerbe einer Vielzahl von Völkern (Araber; Syrer und

Tabelle 7: Synoptische Zeittafel: 1 bis 500	
Hochblüte römischer Kultur	Fensterscheiben aus *Glas* (China, um 60)
Geozentrisches Weltbild (PTOLEMÄUS, um 90 - um 160)	*Seifenherstellung* nachweislich bekannt
Beginn der germanischen Völkerwanderung (um 375)	*Talg-/Wachskerzen* (um 200)
Teilung des Römischen Reiches (395)	Einfache *Destillationsverfahren* Alchemistische Vorstellungen zur *Transmutation der Metalle*
Ende des weström. Reiches (476)	
Maya-Kultur in Mittelamerika "Klassische Zeit": 4. - 9. Jh. Sinustafeln, negative Zahlen (China)	ZOSIMOS von Panapolis (um 400 (350? - 420?)): Erster historisch belegbarer Vertreter der alexandrinischen Alchemie

Tabelle: 8 Synoptische Zeittafel: 500 bis 700	
Untergang des Ostgotenreiches nach dem Tod THEODERICHS (526)	Anfänge der *(Weich-)Porzellanherstellung* (China, nach 600)
Antike Medizin (durch Klosterschulen nach Mitteleuropa) Holzplattendruck (China, nach 600)	*Rennfeuer* in Europa (nach 600)
Herausbildung des Islam Buddhismus in Japan	"Griechisches Feuer" als Kriegswaffe (ab Ende 7. Jh.)

Ägypter; Perser, Tadshiken, Usbeken, Turkmenen, Juden u. a.) unter den Bedingungen der Kalifate weiterentwickelt wurde:

"Dem Islam verschaffte die Eingliederung des Herzstücks der bewohnten Welt in die Kalifatsherrschaft die erforderliche staatliche Basis ... Allerdings waren die Kalifen dagegen gefeit, ihre beträchtliche politische Macht zur Zwangsbekehrung ihrer christlichen, zarathustrischen und hinduistischen Untertanen zu benutzen. ... Zahler von Extrasteuern waren den mohammedanischen Herrschern lieber als Bekehrte; am Ende bestanden die nichtmohammedanischen Untertanen des Kalifats selbst darauf, die Religion ihrer Väter mit dem Islam zu vertauschen" [22, S. 632].

Tabelle: 9: Eroberungen der Araber
MUHAMMAD (MOHAMMED), um 570 (Mekka) - 632 (Medina)
Eroberungszüge: Syrien (635 Damaskus) Palästina (637 Jerusalem) Ägypten (639 - 642) Nordafrika (644 - 709) Spanien (711 - 718) Samarkand (712): Vorstoß nach Indien bis zum Industal

In diesem historisch sehr bedeutsamen Zeitraum erfolgte eine intensive Beschäftigung mit antiker, vorrangig naturwissenschaftlicher und medizinischer Literatur. Zahlreiche Werke antiker Autoren wurden in das Arabische übersetzt, und dem Bibliothekswesen widmete man größte Aufmerksamkeit. So besaß der Kalif AL-AZIZ in Kairo etwa 120000 bis 160000 Bände (Titel), wovon 6500 mathematischen und 18000 philosophischen Inhalts waren [23]. Um das Jahr 1000 zählten die Bibliotheken Cordobas 140000 Handschriften (zum Vergleich: Dombibliothek zu Konstanz (9. Jh.): 356 Bände, die zu Bamberg (1130): 96 Bände; die Vatikanische Bibliothek - die größte des christlichen Europas - hatte zu Beginn des 11. Jh. etwa 1000 Handschriften in ihrem Bestand).

Durch die Bewahrung und Weiterentwicklung der antiken, insbesondere der aristotelischen sowie persischen, indischen und chinesischen Naturphilosophie gelangte man in den arabischen Kalifaten u. a. zu weitreichenden Aussagen hinsichtlich der *"Bildung" von Metallen* (s. u.), der *Erweiterung der aristotelischen Qualitätenlehre* (Abschn. 3) und der *Entwicklung einer Art Element- und Verbindungsbegriff:* Gebilde 1. Ordnung (die 4 "Ur"elemente), zweiter Ordnung (Quecksilber, Schwefel), dritter Ordnung (Metalle) und höherer Ordnung (pflanzliche und tierische Stoffe). Die Klassifizierung und das Ordnen der Stoffe wurde nach physikalischen und chemischen Merkmalen vorgenommen: Metalle, "Geister" (Stoffe, die bei erhöhter

Temperatur sich verflüchtigen: Arsensulfide, Schwefel, Quecksilber, Ammoniumchlorid) und Steine (zunächst ohne weitere Differenzierung).

Tabelle 10: Arabische Kalifate: Angewandte Chemie
Theoretische Vorstellungen - Experiment - Wirtschaftliche Nutzung
- Weiterentwicklung der *Destillationstechnik*: u. a. Destillationsbatterien (Duftwässer, Pharmazie)
- *Pharmazie*: u. a. Salben (+ ZnO, Hg-haltig) Zucker für medizinische Zwecke
- *Papiererzeugung* (ab etwa 760; allg. Verw. 850)[1]
- *Metallurgie*: Messing ("sabah": "neues Metall") seit 900; Damaszener Stahl
- *Chemie*: Pottasche, Soda (aus Pflanzenasche) Eisen"vitriol", Alaun (→ Textilfärberei); Glaserzeugung, Seifenproduktion
[1] Erste Papiermühlen 794 in Chorosan und Bagdad; zum Vergleich: in Deutschland 1290 (Ravensburg), 1390 (Nürnberg).

Darüber hinaus erfolgte eine *Weiterentwicklung der chemischen Experimentierkunst* und deren Anwendung auf neue, der Praxis dienende "Technologien" (H. W. PRINZLER). Besonders soll in diesem Zusammenhang die enge Verflechtung von Theorie - Experiment - wirtschaftliche Nutzung der Ergebnisse hervorgehoben werden (Tab. 10). Hinsichtlich der Fortschritte auf dem Gebiet der Destillationstechnik vgl. [24]

Entsprechend dem Hauptanliegen des vorliegenden Beitrags soll nachfolgend vorrangig auf die Leistungen des Philosophen BALINÂS (arabisierter Name des (Pseudo-)APOLLONIUS VON TYANA; ausgehendes 1. Jhtsd., aus Kappadokien stammend) und des arabischen Gelehrten GABIR IBN HAYYÂN (9./10. Jh., nach anderen Quellen 8./9. Jh., z. B. um 725 bis um 810) eingegangen werden.

BALINÂS, Autor einer in arabischer Schrift abgefaßten Kosmologie ("Buch der Ursachen") gilt als Schöpfer der *Schwefel-Quecksilber-Theorie* (Abb. 3).

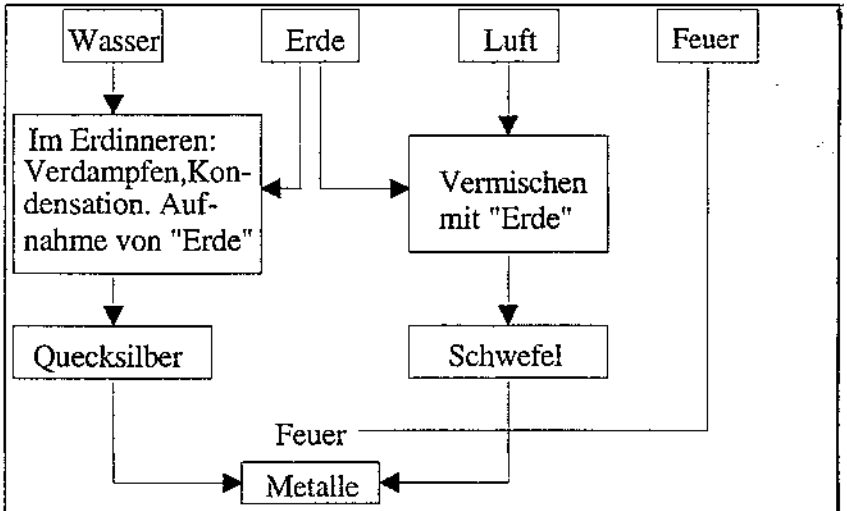


Abbildung 3: Arabische Kalifate: Schwefel-Quecksilber-Theorie (etwa 9./10. Jh.):"Synthese der Metalle"

Danach sind die Metalle über die Zwischenstadien "Quecksilber" und "Schwefel" unter dem Einfluß der Planeten hervorgegangen: Quecksilber entstünde als Produkt der Aufnahme von Erde durch Wasser, und Luft würde beim Vermischen mit Erde zu Schwefel. Unter dem "regulierenden" Einfluß des Feuers vereinigen sich Quecksilber und Schwefel zu den Metallen. Geschehe dieses unter "optimalen" Bedingungen (z. B. hinsichtlich der "Reinheit"), so entstehe das Gold. Wie dies von IBN SINA (s. u.) in der traditionellen Erklärung der Metallbildung gesehen wurde, sei durch folgendes Zitat belegt [25, S. 66/67]:

"Gold bildet sich z. B. dann, wenn der Schwefel edel und rein sowie feurig und färbend ist und das Quecksilber rein ist. Wenn das Quecksilber rein ist und der Schwefel weder schmutzig ist noch brennend wirkt, entsteht Silber. Ist der Schwefel dagegen unrein und dehnbar, erhält man Kupfer ... Blei entsteht aus schlechtem, stinkendem Schwefel und schlechtem, schwerem tonartigen Quecksilber, und seine Verdichtung hat sich nicht vollendet".

Die Anschauung, wonach alle Metalle aus Schwefel und Quecksilber bestehen sollten, entsprach zweifelsohne der damaligen Vorstellung, daß das Schmelzen der Metalle als Übergang in Quecksilber aufgefaßt wurde, zum anderen der Beobachtung, daß Schwefel (als Bestandteil sulfidischer Erze) bei der Metallherstellung eine Rolle spielen müßte.

	Äußere Qualitäten	Innere Qualitäten
Gold	warm, naß	kalt, trocken
Silber	kalt, trocken	warm, naß

Elixier
Silber → Gold
(Herauskehren der inneren Qualitäten)

Abbildung 4: GABIR-Schriften: Erweiterung der aristotelischen Qualitätslehre

GABIR IBN HAYYÂN, Haupt einer religiösen Sekte und Begründer der arabischen Alchemie, vertrat, basierend auf der Vier-Elemente-Lehre (Abschn. 3), ebenfalls die oben genannte Theorie. Diese wurde in seinen Schriften unter Beachtung der *"äußeren" und "inneren" Qualitäten* der Metalle weiterentwickelt (Abb. 4). Danach hat Gold die äußeren Qualitäten warm und naß, beim Silber ist es umgekehrt. Eine Transmutation von Silber in Gold habe somit die "inneren Qualitäten" des Silbers herauszukehren. Hierzu sei das *Elixier* (von griech: xerion = Streupulver --> arab. el iksir) erforderlich.

Eine Würdigung der philosophischen Leistungen der Völker der arabischen Kalifate muß das Wirken zweier weiterer Gelehrter einschließen, deren Lehren u. a. auch für die europäische Kultur (in derem weitesten Sinne) von außerordentlicher Bedeutung waren: IBN RUSCHD (ROSCHD) ABUL WALID (lat. AVERROËS, 1126 (Cordoba) bis 1198 (Marrakesch)) und IBN SINA (Tab. 11). Ersterer, Mediziner, Schriftsteller und Philosoph, widmete sich in seinem philosophischen Schaffen vornehmlich der Lehre des ARISTOTELES, und über dessen Philosophie schlug er eine Brücke zwischen Islam und Christentum.

Für die Geschichte der Chemie interessiert uns IBN SINA, der beispielsweise das Quecksilber unter die Metalle einordnete: *"... Das Quecksilber gehört zu den schmelzbaren Körpern und ähnelt den Stoffen, die sich hämmern lassen"* [26]. Wenngleich er, wie wir oben gesehen haben, zur Frage der Metallbildung auch den Standpunkt der Schwefel-Quecksilber-Theorie vertrat, lehnte er *"... die in den des "Corpus Gabirianum" und in den Werken von Razi* (AR-RÂZÎ, 865 - um 925, persischer Arzt, Philosoph und Naturwissenschaftler; bedeutender Vertreter der arabischen Alchemie und Medizin; S.E.) *enthaltenen Ausführungen über die Gewinnung eines Elixiers zur Verwandlung von Metallen in Gold... als puren Unsinn ab"* [25, S. 68]. Hierin und in der generellen Ablehnung der Alchemie (mit ihren negativen Auswüchsen) kann IBN SINAs Hauptbeitrag zur Entwicklung der Chemie gesehen werden.

Tabelle 11: IBN SINA (AVICENNA) 980 (Afschana, b. Buchara) - 1037 (Hamadan, W-Iran) [25]
Arzt, Philosoph, Naturwissenschaftler, Mathematiker, Musiktheoretiker **Philosophischer Standpunkt:** - Experiment in den Naturwissenschaften - Selbständige Existenz der Materie; Gesetzmäßigkeit des Naturwirkens - Unabhängigkeit materiellen Geschehens von überirdischem Einfluß - Ewigkeit der Welt - Vertreter des Nominalismus - Erkennbarkeit der Welt ——————————— Ordnete Quecksilber unter die Metalle ein. Skepsis gegenüber dem Transmutations-Gedanken: *"... aber in all diesen Prozessen bleibt die wesentliche Natur unverändert."*

Trotz der oben skizzierten und zahlreicher weiterer Leistungen auf "chemischem Gebiet" muß aber auch für den historisch bedeutsamen Zeitraum der arabischen Kalifate eingeschätzt werden, daß man in der materiellen und ideellen Auseinandersetzung mit den "Elementen" der griechischen Naturphilosophie, und dabei u. a. mit dem Phänomen "Feuer" und dem materiellen "Stoff" Luft nicht vorangekommen war. Aussagen zur Natur der Erscheinung Feuer und zur stofflichen Zusammensetzung der Luft konnten nicht getroffen werden. Schließlich war das Streben der arabischen Alchemisten nicht darauf gerichtet, die Chemie (oder genauer das, was wir auch rückschauend zur Chemie rechnen) in eine rationale Wissenschaft zu verwandeln. Diese Aussage muß auch für den Zeitraum des Mittelalters getroffen werden.

5. Zum chemischen Wissen des Mittelalters

Oftmals herrscht noch die Meinung vor, daß im Zeitraum des europäischen Mittelalters (Tab. 12) keine wesentlichen Entwicklungen auf chemischem Gebiet zu verzeichnen waren.

Tabelle 12: Europäisches Mittelalter

Entwicklungsabschnitt zwischen Altertum (Ende des Weströmischen Reiches, 476) und Neuzeit ("Wieder"-Entdeckung Amerikas, 1492)

Klostergründungen (ab 10. Jh.);
Kloster-/Domschulen; ab 12. Jh. → Universitäten

Italien: Nach arabischem Vorbild und dem Muster der Medizinschule von Salerno (aus vorarabischer Zeit) → Universitätsgründungen

1119 Bologna	1224 Neapel	1386 Heidelberg
1150 Paris	1230 Salerno[a]	1388/92 Erfurt
1167 Oxford	1287 Lissabon	1409 Leipzig
1184/1289 Montpellier	1347/48 Prag	1419 Rostock
1209 Cambridge	1364 Krakau	1456 Greifswald
1222 Padua	1365 Wien	

[a] Erhebung zur Universität, 1811 durch NAPOLEON I. aufgehoben

Dieser Einschätzung muß nachdrücklich widersprochen werden. An dieser Stelle seien hervorgehoben:

- *Erfindung des Schießpulvers* (13. Jh.); sie führte zu einer generellen Umgestaltung der Militärtechnik und (zwangsläufig) zu gesellschaftlichen Veränderungen [5, 6].

- *Verbesserung der Destillationstechnik* durch Einführung der *Wasserkühlung* (12. Jh.) durch salernitanische Ärzte: Ein abwärts gerichtetes Dämpferrohr führte durch ein mit Wasser gefülltes Gefäß; bald darauf kamen Dämpferrohre in Spiralform („Serpentina" - Schlangenkühler) in Gebrauch [24]. Durch die Wasserkühlung war es auch möglich, leicht flüchtige Stoffe (z. B. den (Ethyl)alkohol: "aqua ardens" - brennendes Wasser; "aqua vitae" - Lebenswasser) zu erfassen. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, daß dieser Umstand auch die zur *Iatrochemie* führende Entwicklung unterstützte; und es sei weiterhin auf die enge Verknüpfung der Entwicklung der Destillationstechnik mit der (ständig steigenden) Alkoholgewinnung bis etwa in die Mitte des 19. Jh. (Aufkommen der Erdölindustrie) hingewiesen.

- *Entdeckung der Mineralsäuren* (13. Jh.). Gerade ihre Entdeckung hat der Chemie in ihrer Entwicklung große Impulse vermittelt. Um 1250 beschreibt

VINCENTIUS BELLOVACENSIS (VINCENZ VON BEAUVAIS, 1190 - 1254/56 (?), Dominikanermönch und Prinzenerzieher am Hofe des französischen Königs LUDWIG IX.) erstmals die Herstellung der Schwefelsäure und deren (metall)auflösende Wirkung (*"... Kraft des destillierten Alauns ..."*).

Für die Gewinnung beispielsweise der Schwefelsäure wurden nachfolgende zwei, im Prinzip schon seit der Antike bekannte, Möglichkeiten genutzt: Thermische Zersetzung (Calcination) von "Vitriolen" bzw. "Alaun", z. B.:

$FeSO_4 \cdot 7\,H_2O$ ("grüner Vitriol") $= FeSO_4 + 7\,H_2O$
$2\,FeSO_4 + ½\,O_2 = Fe_2O_3 + 2\,SO_3$
(SO_3: Weiterreaktion mit Wasser)

sowie die Verbrennung von Schwefel.

Die Calcination von Vitriolen im Gemisch mit "Salz" diente schon frühzeitig zur Reinigung von Gold (teilweise festkörperchemisches Freisetzen von SO_2/SO_3 im Gemisch mit Chlorwasserstoff). Hierüber berichtete PLINIUS d. Ä. (GAIUS P. SECUNDUS, 23/24 - 79) im XXXIII. Buch der "Naturalis historia":

"Gold wird geröstet mit dem doppelten Gewicht an Salz und dem dreifachen an Vitriol und wieder mit zwei Teilen Salz und dem Stein, den man "schiston" (Alaunschiefer) nennt; so gibt es ... seine Unreinigkeiten in die mit ihm verbrannten Stoffe ab".

Nach PRINZLER [19, S. 136 ff.] ist es denkbar, daß die Reinigung von Gold "auf trockenem Wege", ein bereits im Alten Ägypten bekanntes Verfahren zur oxidativen Abtrennung von Silber und weiteren Goldbegleitern, dann im Mittelalter unmittelbarer Anlaß zur Entdeckung von Mineralsäuren war. Diese Reinigung beruhte auf der thermischen Behandlung von Rohgoldblättchen mit einem Ziegelmehl-(Koch)salz-Gemisch. Hierbei entsteht in einer Festkörperreaktion Chlorwasserstoff (vereinfacht):

$[AlSi_3O_8]^- + 12\,Cl^- + 6\,H_2O$ (Luftfeuchte) $= AlO_2^- + 3\,SiO_4^{4-} + 12\,HCl$

Dieser greift lediglich die im Rohgold vorliegenden unedlen Metalle an und bewirkt somit auch eine Gold-Silber-"Trennung".

Wenngleich man noch längere Zeit nach der Entdeckung der Mineralsäuren diese oft in denkbar schlechten Ausbeuten herstellte und vielfach auch keine Unterscheidung zwischen den einzelnen Säuren traf (bzw. treffen konnte), war doch der Aspekt ihrer praktischen Nutzung unbestritten. Beispielhaft seien genannt:

- die Verwendung von Salpetersäure zur Gold-Silber-Scheidung (etwa 15. Jh.)

- der - allerdings seiner Zeit weit vorauseilende - Vorschlag des "Chymisten" JOHANN RODOLF GLAUBERs (1604 - 1670), Mineralsäuren zum Erzaufschluß zu nutzen, sowie

- die Verwendung von Säuren zur Herstellung von Produkten für die Beizenfärberei ($SnCl_4$-Bedarf für Cochenille, 1630) bzw. dann später als Sulfurierungsmittel (Indigo-Sulfurierung, 1744).

Die Nutzung der Mineralsäuren brachte zugleich eine wesentliche Ausweitung der bis dahin bekannten *"Arbeitstechniken"* (Tab. 13).

Damit wurde schließlich wichtiges experimentelles Material für die Ausarbeitung theoretischer Vorstellungen in den folgenden Jahrhunderten gelegt: Durch die nun mögliche Auflösung von Metallen (in Säuren) unter Salzbildung ("Erden") und ihre Wiedergewinnung aus derartigen Lösungen ergaben sich auch Anstöße zur Auseinandersetzung mit folgenden Themenkomplexen:

- *Unzerstörbarkeit der Stoffe*

- Ausarbeitung der *Korpuskulartheorie* (17. Jh.). Wichtigste Vertreter: P. GASSEND(I) (1592 - 1655), R. DESCARTES (1596 - 1650), R. BOYLE (1627 - 1691) [27]; in Deutschland: D. SENNERT (1572 - 1637), J. JUNGIUS (1587 - 1657).

- Konkretisierung des *Elementbegriffes*

- Lehre von der *Affinität der Stoffe* (vorrangig der Metalle bzgl. Säuren; 17./18. Jh.).

Tabelle 13: Arbeitstechniken der (Al-)Chemie

- BOLOS von Mendes/Nildelta (Pseudo-DEMOKRITOS), um 300 v. Chr., ältester bekannter Vertreter der ägyptisch-hellenistischen Alchemie
→ *Feuer*, "Festkörperreaktionen"

- MARIA die Jüdin, um 300 v. Chr., syrisch-ägyptischer Raum, älteste bekannte Alchemistin → *Destillation*; Kerotakis-Geräte[**]

- ZOSIMOS von Panopolis/Oberägypten, um 400 (350? - 420?)
→ *Destillation, Sublimation*

- *Mittelalter*
→ *Mineralsäuren; durch Auflösen von Metallen → Arbeiten in wässrigen Lösungen*

[**] Zylinder- oder kugelförmige Geräte zur Umsetzung verschiedener Substanzen mit verdampfbaren Stoffen (z. B. Schwefel, Arsensulfide, Quecksilber) [4].

Im Zusammenhang mit dem Hauptanliegen des vorliegenden Beitrags sei noch auf das wohl wichtigste Werk von ROBERT BOYLE, "The Sceptical Chemist" hingewiesen [28], s. a. [27]. Es ist für die Entwicklung der Chemie in zweifacher Hinsicht von Bedeutung. Zum einen kommt BOYLE aufgrund seiner Experimente zu der Ansicht, daß die Stoffe aus kleinsten Partikeln bestehen, die sich zu größeren "Clustern" vereinigen, wobei ein Element ein derartiges Agglomerat sei. Gleichermaßen bedeutsam dürfte jedoch der stete Hinweis BOYLEs darauf sein, *"... wie nach den unveränderlichen Bestandteilen der zusammengesetzten Stoffen gesucht ..."* werden sollte [28, S. 104]. Ausgangspunkte hierfür waren Prüfung und Kritik der "Lehren" der griechischen Naturphilosophen (Abschn. 3), des PARACELSUS' (1493 - 1541; tria prima: Sulphur, Mercurius und Sal(z)) und der gängigen (Schein)Theorien der Alchemie an Hand von fünf Fragen [28, S. 104]:

1. Ist das Feuer der "allgemeine Analysator" aller Körper?
2. Sind die Erhitzungsprodukte, die man so erhält, wirklich Elemente oder Prinzipien?
3. Ist die Zahl der Produkte, die man als Elemente oder Prinzipien ansprach, wirklich drei oder vier oder fünf?
4. Gibt es wirklich das, was man Element Salz, Element Schwefel, Element Quecksilber nennen könnte?
5. Gibt es überhaupt wirkliche Elemente oder Prinzipien?

Wenngleich auch die (vollständige) Beantwortung der fünf Fragen seinerzeit offen bleiben mußte, da der exakten experimentellen Überprüfung zu jener Zeit zwangsläufig Grenzen gesetzt waren, so hat BOYLE mit seiner klaren Aufgabenstellung an die Chemiker, gezielt nach den *"unveränderlichen Bestandteilen der zusammengesetzten Stoffe"* zu suchen, jeder Willkür im experimentellen Arbeiten der Alchemisten den Boden entzogen.

6. Die Chemie des 18. Jahrhunderts

So beeindruckend auch die Denkansätze und gewisse Fortschritte auf bestimmten Gebieten der angewandten Chemie waren, "... sollte ... die Weiterentwicklung der Chemie während des größten Teils des 18. Jh. auf ganz anderen Wegen erfolgen. Man versuchte nicht, rationale Methoden auf die Chemie anzuwenden, die auf mechanischen Modellen beruhten, welcher der außerordentlichen Verschiedenheit der chemischen Erscheinungen nicht Rechnung trugen, sondern gewann mit zunehmender rationaler Durchdrin-

gung der ursprünglich magischen und animistischen Vorstellungen neue Erkenntnisse. Obgleich diese zu Anfang unvermeidlich vage waren, wiesen sie eine Elastizität auf, die es dem praktisch arbeitenden Chemiker ermöglichte, die mannigfaltigen chemischen Operationen zu erfassen und sie in einige wenige verbale Verallgemeinerungen einzuordnen" [13].

Die großen Fortschritte in der Chemie des 18. Jahrhunderts resultieren aus einem wissenschaftsstrategisch äußerst bedeutsamen Umstand: Die Hauptfragestellungen wurden lediglich auf *ein* zentrales Problem gerichtet, nämlich auf die Verbrennung und die Wirkung der "Feuerluft". Man begann zu erfragen, was mit den brennbaren Stoffen geschah, wenn sie an der Luft "verbrannten". Für eine Reihe von ihnen (z. B. Holz, Schwefel, Kohle) war die Antwort leicht gegeben: Sie gingen in "Flamme und Rauch" auf und hinterließen Asche. Was geschah aber mit den Metallen beim Erhitzen an Luft? Gab es bei der Umsetzung der verschiedenen Stoffe mit Luft nicht etwas Gemeinsames, und welche Rolle spielte hierbei die Luft?

Den indirekten Anstoß zu einer Entwicklung, die letzten Endes die Chemie als Wissenschaft begründete, gab GEORG ERNST STAHL (1659 - 1734) [29] durch die Aufstellung der *Phlogistontheorie* (griech. phlox = Flamme; eigentlich "das Verbrannte"), erstmals publiziert 1697 in "Zymotechnia fundamentalis seu fermentationis theoria generalis, Halae 1697" [30]. Zu dieser Zeit war STAHL 2. Professor der Medizin an der 1694 gegründeten Universität in Halle, wo er auch chemische Vorlesungen hielt.

Das Anliegen STAHLs in seinen Arbeiten war es, vertiefte wissenschaftliche Erkenntnisse von Prozessen der chemischen Gewerbe zu gewinnen. Er leitete seine Lehre u. a. aus der Praxis der Erzverhüttung als Theorie der Reduktion her; und erst danach wurden die Fragen des "Verkalkens" (Verbrennens) der Metalle behandelt.

STAHL konnte sich bei der Ausarbeitung seiner Lehre u. a. auf die Arbeiten des Chemikers, Mathematicus und Arztes JOHANN JOACHIM BECHER (1635 - 1682) stützen, der eine Erweiterung der "Vier-Elemente-lehre" (Abschn. 3) vorgenommen hatte. Nach BECHER waren die Ur-Elemente "Luft" und "Wasser" zu keiner Umsetzung fähig. Dagegen sei die "Erde" der eigentliche Urstoff alles Irdischen, und sie bestehe aus drei "Teil-Urhebungen" ("Erden") mit unterschiedlichen Wirkungen ("Verantwortlichkeiten"):

- *"Merkurialische" Erde* → Schmelzbarkeit der Metalle

- *"Glasartige" Erde* → glasartige Schlacken

- *"Fettige"/"ölartige" Erde: terra pinguis* → Prinzip der Brennbarkeit; Ursache der "Verkalkbarkeit" der Metalle.

Von enormer Tragweite war die Aussage BECHERs, wonach "Verkalken" (der Metalle) und "Verbrennen" (z. B. von Schwefel) *gleichartige* Prozesse seien, die im Verlust der *terra pinguis* bestehen. STAHLs grundlegendes Postulat bestand nun darin, eine in allen brennbaren Stoffen vorhandene spezifische Substanz, nämlich das *Phlogiston*, anzunehmen (Tab. 14). Die Verbrennung von z. B. Schwefel und die Calcination (das "Verkalken") der Metalle wurden in Anlehnung an BECHER als *Zerlegung* von Stoffen angesehen, bei der das *Phlogiston* freigesetzt wurde.

Tabelle 14 Die Phlogiston-Theorie: Ein Irrtum

Der Sauerstoff war noch nicht entdeckt.

STAHL: *Phlogiston*: Eine in allen brennbaren Stoffen enthaltene Substanz

Bei "Oxidation": *Abgabe* von Phlogiston

Bei "Reduktion": *Aufnahme* von Phlogiston

Beispiele:

Schwefel $\xrightarrow{\text{Verbrennung}}$ "SO_2" + Phlogiston
↓
„dephlogistierter" Schwefel

Metall $\xrightarrow{\text{Calcination}}$ "Metalloxid" + Phlogiston
↓
"dephlogistiertes" Metall

Das Neue an der STAHLschen Lehre war, daß sich bei der "Reduktion" von Metall"kalken" (Metalloxiden) das *Phlogiston* mit diesen unter Metallbildung verbindet. Hierbei spielt die Kohle (ein sehr "phlogistonreicher" Stoff) eine wichtige Rolle; beim Schmelzen *"... durch und unter die Kohlen ... wurde wirklich etwas Körperliches zu dem Metall beigetragen bzw. beigefügt"* [31].

Wenngleich STAHLs Lehre die Vorgänge der Oxidation und Reduktion genau umgekehrt darstellte (Oxidation: Zufuhr des (erst 1771 entdeckten) Sauerstoffs, Reduktion: Sauerstoff-Entzug), ist der Nutzen der Phlogiston-

Theorie für die weitere Entwicklung der Chemie im 18. Jahrhundert von herausragender Bedeutung gewesen (vgl. dazu in [29] speziell S. 66 - 71; Tab. 15). Diese Theorie "koordinierte" eine große Anzahl sehr unterschiedlicher Phänomene; sie kann als ein Paradebeispiel für konsequentes Denken auf der Grundlage eines Irrtums angesehen werden. Sehr wichtig war, daß sie die *erste* chemische Theorie überhaupt darstellte, die den *Prozeßgedanken* bei chemischen Reaktionen und deren Umkehrbarkeit erfaßte.

Tabelle 15 Bedeutung der Phlogiston-Theorie
- Erstmals wurde eine *chemische Umwandlung* auf korpuskular-mechanistischer Basis als ein *Prozeß* begriffen und verstanden. *Umkehrbarkeit* von Reaktionen.
- Zusammenhang von Oxidation und Reduktion; damit Erfassen von *"Red-Ox-Vorgängen"*: → *Neue theoretische Grundlage der Chemie*
- Versuche zur Isolierung des "principium Phlogiston" (→ Gase allgemein)
- Wissenschaftliche Einsichten in gewerblich-chemische Prozesse. *Rückwirkung der Theorie*
- Endgültige Trennung der Alchemie als "Goldmacherkunst" von der Chemie
- Theoretische Basis für die Umgestaltung des Theoriengebäudes der Chemie durch A. L. LAVOISIER ab 1772

Aus den Versuchen, das "principium Phlogiston" zu isolieren, resultierten ganz allgemein auch auf dem Gebiet der *Gaschemie* große Fortschritte (*pneumatic revolution*). Diese hatte zuvor wesentliche Impulse durch den Naturforscher, Chemiker, Arzt und Philosophen JOHANN (JEAN) BAPTIST VAN HELMONT (1577 - 1644) und den Naturforscher STEPHEN HALES (1677 - 1761) erhalten. Ersterer ist der eigentliche Begründer der Gaschemie. Er entdeckte um 1640 das Kohlendioxid, und mit seinen Untersuchungen bahnte er eine exaktere begriffliche Trennung von Luft, Wasserdampf und Gas (griech. chaos). HALES erfand 1727 die "pneumatische Wanne", wodurch erst das eigentliche "Auffangen" von Gasen ermöglicht wurde. Er stellte durch Erhitzen der verschiedensten pflanzlichen, tierischen und mineralischen Stoffe zahlreiche Gase her. Doch unterzog er keines der Gase einer genauen Untersuchung, da er alle für atmosphärische Luft hielt, die lediglich durch andere Stoffe "abgewandelt" (verunreinigt) sei. Auch andere Forscher nach ihm teilten noch jahrzehntelang seine Ansichten über die Natur der Gase.

Dies änderte sich dann - beginnend mit der Entdeckung des *Wasserstoffs* durch den Chemiker und Physiker HENRY CAVENDISH (1731 - 1810) im Jahre 1766. Er bewies in seiner Veröffentlichung "Experiments on Factitious Air", daß es von der Luft völlig verschiedene Gase gibt und teilte dazu u. a. mit, daß bei Einwirkung von Säuren auf verschiedene Metalle *"brennbare Luft"* entstehe. In ihr sah er das reinste Phlogiston. Und es ist bemerkenswert, daß dann in dem erstaunlich kurzen Zeitraum von etwa 20 Jahren die Entdeckung und Analyse wesentlicher Gase, darunter vier von (wirklich) elementarer Natur, erfolgte (Tab. 16; vgl. auch [32]).

Tabelle 16 Entdeckung/Analyse von Gasen

1766	*Wasserstoff*
1771	*Chlor*, 1774 veröffentlicht
ab 1771	*Sauerstoff*
1772	*Stickstoff*
1773/76	"Lachgas" (N_2O)
1774/75	Chlorwasserstoff, NH_3, SO_2 isoliert
1776	H_2S isoliert (Zusammensetzung: 1785), Sumpfgas (CH_4)
1780	Wassergas (CO/H_2-Gemisch)
1781	CO_2 (aus Verbrennung von Kohle): analysiert
1783	Erste genaue Luftanalyse
	(20,83 Vol.-% O_2, 79,17 Vol-% N_2)
	$\text{Wasserstoff} + \text{Sauerstoff} \xrightarrow[\text{Funken}]{\text{elektr.}} \text{Wasser}$
	$H_2O\text{-Dampf} \xrightarrow[\text{Eisen}]{\text{erhitztes}} \text{Wasserstoff (+Eisenoxide)}$
1785	$\text{Luft} \xrightarrow[\text{Funken}]{\text{elektr.}} \text{"Stickoxide" (+ } H_2O\text{: } HNO_3\text{)}$
	(inaktiver "Luft"rest: Edelgase, ab 1894)

Neben dem Wasserstoff war es weiterhin der *Sauerstoff*, der 1771 (s. u.) von dem in Stralsund geborenen späteren Apotheker und Chemiker CARL WILHELM SCHEELE (1742 - 1786) entdeckt wurde. 1772 veröffentliche dann der Schotte DANIEL RUTHERFORD (1749 - 1819) seine medizinische Doktorarbeit, in der er von der *"giftigen* Luft" (*Stickstoff*) berichtete.

Im selben Jahr erhielt auch CAVENDISH den Stickstoff ("mephitische Luft"), nachdem er das beim Überleiten von Luft über glühende Holzkohle gebildete Kohlendioxid an "Ätzkali" band. Er unterließ es jedoch, seine Ergebnisse sogleich zu publizieren. Schließlich veröffentliche 1774 SCHEELE die Ergebnisse von Untersuchungen aus dem Jahr 1771, wonach beim Behandeln von Braunstein mit "muriatischer Säure" (Salzsäure, von lat. muria = Salzlake) *"dephlogistierte muriatische Säure"* (*Chlor*) entsteht.

Und abschließend sollen von den Angaben der Tabelle 16 noch zwei Versuche aus dem Jahr 1783 hervorgehoben werden: CAVENDISH stellte im Frühling jenes Jahres die *Vereinigung* von "dephlogistierter Luft" (Sauerstoff) mit "brennbarer Luft" zu Wasser fest, und ANTOINE LAURENT LAVOISIER (1743 - 1794) *zersetzte* Wasser an hocherhitzten Oberflächen von Eisen (spiralförmiges Eisenrohr, gefüllt mit Eisenspänen). LAVOISIER berichtete darüber am 15. April 1784 in der Pariser Akademie.

Die von CAVENDISH und LAVOISIER gemachten Beobachtungen waren neben dem jeweils reinen Versuchsergebnis insofern von größter Bedeutung, als sie den endgültigen experimentellen Beweis dafür erbrachten, daß das "Ur-Element" Wasser (Abschn. 3) ein zusammengesetzter Stoff sei. Und ein gleiches "Schicksal" der Streichung in der Liste der überlieferten "Ur-Elemente" war der "Luft" beschieden.

Damit kommen wir zurück zur *Entdeckung des Sauerstoffs* und der Aufklärung seiner Rolle im Verbrennungsprozeß, zwei für die Herausbildung der Chemie als Wissenschaft nicht hoch genug einzuschätzende Ergebnisse.

Der Weg von der "Feuerprobe" bis zur Entdeckung dieses "Schlüsselelements" ist nicht frei von richtigen Annahmen und Beobachtungen sowie Fehleinschätzungen und grundlegenden Irrtümern, z. B. [9, 32]. Bereits im 13. Jh. erwähnte Pseudo-GEBER, ein in der Person (jedoch nicht in seinen bedeutsamen Schriften) weitgehend unbekannter Vertreter der lateinischen Alchemie, die Gewichtszunahme beim "Verkalken" der Metalle. Weitere Beobachtungen gleichen Ergebnisses wurden nachfolgend u. a. bei Quecksilber/Amalgamen (1490), Blei (1553), Antimon (1618) und Zinn (1630) gemacht. Der Trugschluß bei der Deutung dieser Ergebnisse lag in der Annahme, daß die gebildeten "Kalke" (Metalloxide) *Bestandteile* der Metalle seien. Um 1640 äußerte sich VAN HELMONT, daß das "Feuer" kein Element sei. Andererseits tauchte im 16./17. Jh. mehrfach der Gedanke auf, daß der "Feuerstoff" eine wägbare Substanz sein müsse. Um 1630 führte der französische Arzt JEAN REY die von ihm beobachtete Gewichtszunahme beim "Verkalken" von Metallen auf die Adsorption von Luftbestandteilen zurück. Der Engländer JOHN MAYOW (1643 - 1679) beschrieb 1674 die Metallkalke zwar als Verbindungen der Metalle mit *"Salpeterluft"*

(*"spiritus nitro-aerius"*), seine Ansichten über andere Verbrennungsvorgänge waren aber weniger schlüssig. Der Bezug auf "Salpeterluft" war insofern verständlich, als der englische Physiker ROBERT HOOKE (1635 - 1703) vermutet hatte, daß der an der Verbrennung beteiligte Bestandteil der Luft im Salpeter (auch) enthalten sei. Diese der Wahrheit sehr nahe kommenden Ansichten bzw. Ergebnisse konnten jedoch nicht verhindern, daß J. REY und J. MAYOW *"... isolierte Vorläufer waren, die die allgemeine Denkweise in der Chemie nicht zu beeinflussen vermochten"* [13]. Ein gleiches kann auch für MICHAIL VASIL'EVIC LOMONOSSOV (1711 - 1765) gesagt werden, der 1748 zu der richtigen Annahme kam, daß bei der Verbrennung keine Aufnahme von *"Feuermaterie"* (Wärme) durch die Wände der Reaktionsgefäße erfolge, sondern daß die beobachtete Gewichtszunahme beim Erhitzen von Metallen wohl aus deren "Vereinigung" mit Luftteilchen herrühren sollte.

Trotz aller dieser genannten Erkenntnisse sollte die eigentliche Wende aus einer ganz anderen Richtung kommen. 1771 entdeckte SCHEELE den Sauerstoff (Tab. 17; vgl. dazu besonders [9], aber auch [33]). Anderen Forschern gelang - unabhängig von SCHEELE - wenig später ebenfalls diese Entdeckung, ohne daß auch sie sich der ganzen Tragweite des Ergebnisses bewußt waren: PIERRE BAYEN (1725 - 1797, Pharmazeut und Chemiker), JOSEPH PRIESTLEY (1733 - 1804, Prediger, Sprachlehrer, Bibliothekar und Naturforscher). Bereits am 1. November 1772 hinterlegte nämlich LAVOISIER bei der Französischen Akademie der Wissenschaften eine (versiegelte) Mitteilung des Inhalts, wonach Schwefel und Phosphor beim Verbrennen "schwerer" werden, und er nahm an, daß die Gewichtszunahme der Metalle beim Verbrennen die gleiche Ursache haben kann. In einem am 11. November 1774 vor der Akademie gehaltenen Vortrag unter dem Titel *"Über das Verbrennen von Zinn in geschlossenem Raum und über die Ursache der Gewichtszunahme der Metalle"* kommt er u. a. zu dem Schluß, daß diese Gewichtszunahme gleich dem Gewicht der "adsorbierten" Luft sei. In diesem Jahr war LAVOISIER durch BAYEN mit der Frage konfrontiert worden, was denn bei der thermischen Zersetzung von Quecksilberchlorid entstehe. Dieser sah in der betreffenden Reaktion eine Möglichkeit, reines Quecksilber zu erhalten. Und es war PRIESTLEY, der als Privatsekretär des EARL OF SHELBURNE im Oktober 1774 in Paris weilte, wo er auch LAVOISIER traf und diesem seine Entdeckung der *"dephlogisticated* air" mitteilte.

Tabelle 17: Entdeckung des Sauerstoffs

C. W. SCHEELE ab Juni 1771	$MnO_2 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + H_2O + ½\ O_2O_7$: "Vitriolluft", später "Feuerluft"
P. BAYEN Februar 1774 bis Februar 1775	$HgO \rightarrow Hg + ½\ O_2$
J. PRIESTLEY 1. August 1774 bis März 1775	$HgO \rightarrow Hg + ½\ O_2$
A. L. LAVOISIER März/April 1774 bis Februar/März 1775	zuerst nach $3\ Fe_2O_3 \rightarrow 2\ Fe_3O_4 + ½\ O_2$ dann: $HgO \rightarrow Hg + ½\ O_2$
C. W. SCHEELE November 1775	$HgO \rightarrow Hg + ½\ O_2$

C. W. SCHEELE, "Chemische Abhandlung von der Luft und dem Feuer. Nebst einem Vorbericht von Tobern Bergman ..." (Eingereicht Dezember 1775 an den Verleger SWEDERUS in Up(p)sala; erschienen: Sommer 1777. Zur Problematik der verspätet erfolgten Publikation, vgl. speziell in [9] S. 55 ff.)

Basierend auf den Resultaten seiner *quantitativen* Experimente und ausgestattet mit diesen Informationen führte LAVOISIER in einem Vortrag vom 26. April 1775 aus, daß sich seine Untersuchungsergebnisse dadurch erklären ließen, wenn man bei der Verbrennung (*statt der Abgabe von Phlogiston*) *die Aufnahme von Sauerstoff* annahm. PRIESTLEYs und BAYENs Namen erwähnte er dabei nicht, ein - zweifelsohne - sehr kritikwürdiges Verhalten, das bei ihm leider keinen Einzelfall darstellte (hierzu vgl. man speziell [34, S. 26 - 38].

In den folgenden Jahren sicherte dann LAVOISIER seine Ergebnisse durch zahlreiche Versuche; aber erst 1783 erklärte er in seiner Veröffentlichung *"Bemerkungen über das Phlogiston. - Eine Entwicklung der 1777 bekannt gemachten Theorie des Verbrennens und Verkalkens"* die STAHLsche Lehre rund heraus für falsch [35]. Im selben Jahr gelang LAVOISIER auch die Zerlegung des bis dahin für ein "Element" gehaltenen Wassers (s. o.).

Durch seine Untersuchungen war nun erwiesen, daß die Verbrennung von Stoffen auf deren Umsetzung mit Sauerstoff beruht, daß die Metalle keine Verbindungen, die "Metallkalke" dagegen aus Metallen und Sauerstoff zusammengesetzt sind und daß das Wasser kein "Element" ist.

Es lag nahe, *"... daß diese Feststellungen zu völlig neuen Erkenntnissen über die Zusammensetzung fast aller damals bekannten Stoffe und damit zu einer Umwälzung der gesamten Chemie führen mußten. Solche entscheidenden Veränderungen konnten sich natürlich nicht ohne Widerstand vollziehen, und es war klar, daß LAVOISIER bei den nun folgenden Auseinandersetzungen und Veränderungen eine führende Rolle zukam. Er unterzog sich dieser ungeheuren Aufgabe mit viel Geschick und Energie"* [32].

So definierte er den *Elementbegriff* entsprechend den Forderungen nach analytischer Genauigkeit:

"Verbinden wir aber mit der Bezeichnung Elemente oder Grundstoffe den Begriff der letzten Grenze, bis zu der die Analyse vordringen kann, dann sind alle Substanzen, die wir noch auf keine Weise haben zerlegen können, für uns Elemente, ... und wir dürfen sie nicht eher für zusammengesetzt halten, als bis die Erfahrung und Beobachtung uns den Beweis dafür liefern" (zitiert nach [36]).

LAVOISIER ergänzte die bestehende Liste von Elementen durch den Sauerstoff (ursprünglich "oxigine", 1787 durch die Nomenklatur-Kommission der Pariser Akademie der Wissenschaften in oxigène umgeändert), der zusammen mit dem Wasserstoff (hydrogène) das "Ur-Element" Wasser bildet sowie durch den anderen Bestandteil der Luft, den das Leben nicht erhaltende Stickstoff (azote).

Der nächste

*"und vielleicht wichtigste Schritt (...*LAVOISIER*s) bei seiner Reform der Chemie"* [32]

war die in Angriff genommene Aufstellung einer *neuen Nomenklatur*, wobei er die Unterstützung seiner Akademiekollegen L. B. GUYTON DE MORVEAU (1737 - 1816), C.-L. BERTHOLLET (1748 - 1822) und A. F. DE FOURCROY (1755 - 1809) fand. Die chemische Nomenklatur erschien in Buchform (314 Seiten) im Jahre 1787 [37].

Und schließlich legte LAVOISIER seine Ansichten über die Chemie in Form eines Lehrbuches dar [38], das mehrere Auflagen und Übersetzungen erreichte und mit dem er den Siegeszug seiner "Oxidationstheorie" einleitete. Seine Lehre setzte sich in der Fachwelt unverhältnismäßig schnell durch,

wenngleich einige ältere Wissenschaftler, so auch PRIESTLEY, bis zu ihrem Tode an der Phlogistontheorie festhielten. *

Literatur

[1] A. Ulfig, Lexikon der philosophischen Begriffe, Eltville 1993.

[2] W. Strube, Der historische Weg der Chemie. Von der Urzeit bis zur industriellen Revolution. Leipzig 1976.

[3] J. Rehmke, F. Schneider, Geschichte der Philosophie. Unter dem Titel "Grundriß der Geschichte der Philosophie" 1959 im Athenäum-Verlag Junker und Dünnhaupt KG., Bonn, erschienen. W. Kranz, Die griechische Philosophie, Leipzig 1941, 2. Aufl. 1986. I. Rozânskij, Wissenschaften in der Antike, Moskau, Leipzig, Jena, Berlin 1980. A. S. Bogomolov, History of Ancient Philosophy, Moskau 1985. W. Durant, Die großen Denker, Bergisch Gladbach 1987, Lizensausgabe Bindlach 1992.

[4] Autorenkollektiv, ABC - Geschichte der Chemie, hrsg. von S. Engels. R. Stolz (federführende Herausgeber), W. Göbel, F. Nawrocki, A. Nowak, Leipzig 1989.

[5] H. W. Prinzler, Pyrobolia, Leipzig 1981.

[6] Kh. Lohs, Feuer als Waffe im Umweltkrieg. Studie im Rahmen des Projektes "Waffenwirkung und Umwelt"; durchgeführt in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum, Institut für Friedenssicherungsrecht und Humanitäres Völkerrecht, 1994.

[7] H. v. Glasenapp, Die fünf Weltreligionen, München 1992, S. 14.

[8] J. Villwock in: Propyläen Geschichte der Literatur, 3. Bd. Renaissance und Barock, Frankfurt am Main Berlin 1988.

[9] H. Cassebaum, Carl Wilhelm Scheele, Leipzig 1982.

[10] S. Engels, Zur geschichtlichen Entwicklung der anorganischen Festkörperchemie, Wiss. Z. Techn. Hochschule "Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg 27 (1985) 1, S. 21 - 32; in: Anorganische Festkörperreaktionen, 2. Aufl., Akademie-Verlag Berlin 1989.

[11] H. Seidel, Von Thales bis Platon. Berlin 1982.

[12] Wilhelm von Ockham, Kurze Zusammenfassung zu Aristoteles' Büchern über Naturphilosophie. Aus dem Lateinischen. Herausgegeben und übersetzt von H.-U. Wöhler, Leipzig 1983.

[13] J. D. Bernal, Die Wissenschaft in der Geschichte. Berlin 1967.

[14] Aristoteles, Metaphysik. Aus dem Griechischen übersetzt von F. Bassenge. Berlin 1960.

[15] F. Nietzsche, Nachgelassene Schriften 1870 - 1873, im Band 1 der "Kritischen Studienausgabe" Herausgegeben von G. Colli u. M. Montinari. München - Berlin/New York 1988.

---

* Der Beitrag basiert auf Ausarbeitungen des Verfassers zur SCHORLEMMER-Vorlesung (Technische Hochschule Merseburg, 30.9.1986), zu einem Vortrag an der Universität Oldenburg, Fachbereich Chemie (12.7.1990) sowie zur Vorlesungsreihe "Geschichte der Naturwissenschaften/ Chemie" an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachbereich Chemie.

[16] Heraklit, "Vielwisserei bringt noch keinen Verstand" in: Die Vorsokratiker. Die Fragmente und Quellenberichte. Übersetzt und mit einer Vorbemerkung versehen von W. Capelle. Berlin 1958.

[17] Enzyklopädie der Philosophie. Gruppo Editoriale Fabbri Bompiani Sonzogno Etas S.p.A. Deutsche Ausgabe: Augsburg 1992.

[18] F. Tomberg in: Philosophenlexikon, Autorenkollektiv; herausgegeben von E. Lange und D. Alexander, Berlin 1982.

[19] H. Prinzler, Hortulus Alchimiae, Leipzig 1979.

[20] D. Lübke, Platon, Leipzig Jena Berlin 1984.

[21] J. v. Liebig, Chemische Briefe, 4. Aufl., Heidelberg 1859.

[22] A. J. Toynbee in: Propyläen Weltgeschichte. 2. Bd. Hochkulturen des mittleren und östlichen Asiens. Berlin - Frankfurt am Main 1962.

[23] H. Mohr, W. Waade,, Byzanz und arabisches Kalifat, 4. Aufl., Berlin 1984.

[24] H. W. Prinzler, Summa Destillationis, Leipzig 1983.

[25] B. Brentjes, S. Brentjes, Ibn Sina (Avicenna). Leipzig 1979.

[26] M. Y. Haschmi, J. Dtsch. Morgenländ. Ges. 116 (1966) S. 44 - 59.

[27] S. Engels, Wiss. Z. Techn. Hochschule "Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg 33 (1991), S. 423 - 428.

[28] "Der skeptische Chemiker" von ROBERT BOYLE, Verkürzt herausgegeben und übersetzt von EDUARD FÄRBER und MORITZ FÄRBER. OSTWALD's Klassiker der exakten Wissenschaften, Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H., Leipzig 1929. Reprint der 1. Ausgabe, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig 1983.

[29] I. Strube, Georg Ernst Stahl, Leipzig 1984.

[30] In dt. Übersetzung: Zymotechnia fundamentalis oder Allgemeine Grunderkenntnis der Gärungskunst. Frankfurt/Leipzig 1734, Stettin/Leipzig 1748.

[31] G. E. Stahl, Zufällige Gedanken und nützliche Bedenken über den Streit von dem sogenannten Sulphure ... Halle 1718, Halle 1747. In franz. Übersetzung: Traité de soufre. Paris 1766.

[32] S. Engels, A. Nowak, Auf der Spur der Elemente, 1. Aufl., Leipzig 1971, 3. Aufl. 1983. Übersetzung ins Tschechische (Prag 1977), Russische (Moskau 1983) und Finnische (Helsinki 1992).

[33] G. Lockemann in: G. Bugge, Das Buch der großen Chemiker, 1. Bd., Verlag Chemie GmbH. 1929. Unveränderter Nachdruck, Weinheim/Bergstr. 1961, S. 274 - 290.

[34] F. Szabadváry, Antoine Laurent Lavoisier, Leipzig 1987.

[35] M. Speter in: G. Bugge, Das Buch der großen Chemiker, 1. Bd., Verlag Chemie GmbH. 1929. Unveränderter Nachdruck, Weinheim, Bergstr. 1961, S. 327 - 328.

[36] D. McKie, Antoine Lavoisier, Scientist, Economist, Social Reformer, London, New York 1952.

[37] Méthode de Nomenclature Chimique Proposée par M. M. de Morveau, Lavoisier, Berthollet, de Fourcroy, Paris 1787.

[38] A. L. Lavoisier, Traité élémentaire de chimie ..., Bd. 1 und 2, Paris 1789

Dieter Nebel

Zur Reaktorsicherheitsphilosophie sowjetischer Kernkraftwerke[1]

1. Einleitung

Im folgenden Vortrag soll an einem brisanten Thema gezeigt werden, wie eng wissenschaftlich-technischer Fortschritt und Politik, Zukunftsvisionen und Zukunftsangst, Nutzen und Risiko miteinander verknüpft sein können. Das scheint für das Beispiel Kernenergie in der Sowjetunion einfach ablesbar zu sein. Vorhandene Mängel der in der Sowjetunion projektierten Kernkraftwerke hängen irgendwie mit den Nachteilen der überzentralisierten Planung in der Sowjetunion zusammen. Damit war auch der Rahmen für ihre Wissenschaftler gegeben. Haben sie ihn ausgefüllt?

Man wird das Anliegen der folgenden Darlegungen mißverstehen, will man in ihnen nur einen Schritt der „Aufarbeitung" der Vergangenheit in einem gescheiterten, aber dennoch einmal wesentlichen Teil unserer Welt, ein Stück Opportunität, sehen. Die potentiellen Gefährdungen durch sowjetische (wie auch durch andere) Kernkraftwerke müssen ausgesprochen werden. Das wird geschehen. Und sie müssen zurückgedrängt werden. Wir dürfen aber davon ausgehen, daß Entwicklung und Bau sowjetischer Kernkraftwerke von ihren Schöpfern als ein Beitrag für eine gesündere Welt verstanden worden waren. Es gab eine bedeutende Aufbruchsstimmung damals. Man sah einen Weg, den Energiemangel in der Welt für einen historischen Zeitraum beseitigen zu können. Die Nukleartechnologie sowie den Schutz der Menschen und der Umwelt vor der Radioaktivität glaubte man, sicher beherrschen zu können. Man kann das Schicksal dieser KKW durchaus als Aufforderung an alle Wissenschaftler und Techniker betrachten, nicht nur dem technischen Fortschritt dienen zu wollen, sondern stets mit gleicher Energie und Konsequenz auch die denkbaren Schattenseiten dieses technischen Fortschritts zu durchforschen.

Die UdSSR[2] hat in der friedlichen Nutzung der Kernenergie faktisch alle Entwicklungslinien verfolgt, die aus internationaler Sicht von Bedeutung

---

1 Vortrag, gehalten in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 19. Januar 1995. Die schriftliche Fassung des Vortrags wurde gegenüber dem mündlichen Vortrag geringfügig geändert

2 Die Bezeichnung von Staaten usw. erhalten im folgenden Text nicht das Attribut „ehemalige", wenn die Staaten usw. der Vergangenheit angehören

waren. Bei den thermischen Leistungsreaktoren konzentrierte sie sich dabei auf zwei Typen, den RBMK und den WWER.

Der RBMK ist ein graphitmoderierter Siedewasserreaktor vom Röhrentyp. Das sonst übliche Druckgefäß ist hier durch eine Vielzahl von Druckröhren ersetzt. Moderator ist Graphit, Wärmeträger ist Wasser. Die Kombination von Zirkon (Brennstabhüllen), Wasser, Graphit und hohe Temperatur ist aus chemischer und sicherheitstechnischer Sicht vielleicht nicht unbedenklich.

Davon unabhängig hatte man sich Anfang der siebziger Jahre in der DDR entschieden, beim Aufbau von Kernkraftwerken auf dem Gebiet der DDR nur den anderen Grundtyp thermischer Kernkraftwerke, den WWER, zu nutzen. Zu diesem Zeitpunkt lag den Verantwortlichen eine wissenschaftlich-technische Expertise des damaligen Instituts für Kraftwerke in Berlin vor, in der ein Import von RBMK nicht empfohlen wurde [1]. Der wesentliche Grund dafür, sich auf nur einen Typ zu beschränken, waren wohl wirtschaftliche Überlegungen. So entschied man sich für den WWER.

Der heutige Vortrag wird sich faktisch nur mit den sowjetischen Kernkraftwerken vom Typ WWER (Wasser -Wasser -Energie - Reaktor) beschäftigen. Sie arbeiteten auf deutschem Boden, mit ihnen hatten wir in der Vergangenheit in der DDR zu tun.

In der Zeit zwischen dem 14.2. und 8.12.1990 wurden mit der Begründung, daß sie sicherheitstechnische Mängel haben, die Blöcke 1 - 5 der KKW Greifswald und im November 1990 das KKW Rheinsberg für immer stillgelegt. Die Fertigstellung der im Aufbau befindlichen weiteren Blöcke des Kraftwerks in Greifswald und des KKW Stendal wurde verbindlich abgebrochen. Zur Sicherheitsausstattung der KKW in Rheinsberg und in Greifswald gab es unter Fachleuten schon seit längerer Zeit ernsthafte Kritik, ich komme darauf zurück. Hinzu kam, daß sich in der Nachwendezeit der DDR eine heftige emotionale Bewegung gegen die Kernkraftwerke in Rheinsberg, Greifswald und Stendal und gegen die Kernenergieerzeugung insgesamt entwickelt hatte. Dies war ein sichtbarer Hintergrund für die Entscheidungen zum Ende der Kernenergetik im Osten Deutschlands. Welchen Sinn hat es dann heute, 4 - 5 Jahre später, nachdem inzwischen die Kernkraftwerke in Rheinsberg und in Greifswald ihre Tätigkeit beendet haben, noch einmal auf diese Kraftwerke zurückzukommen?

Die Angaben der Tabelle 1 geben eine gewisse Antwort auf diese Frage. In dieser Tabelle ist die Anzahl der Kernkraftwerke vom WWER-Typ aufgetragen, die in Osteuropa (Rußland, Ukraine, Tschechische Republik, Slowakische Republik, Bulgarien und Ungarn) noch arbeiten (jeweils erste Zahl) oder sich im Aufbau befinden (jeweils zweite Zahl)[2]. Die Zahlen werden

im einzelnen nicht exakt stimmen, da insbesondere die Fertigstellung der im Aufbau befindlichen KKW wegen der ungenügenden Wirtschaftskraft der einzelnen Länder und wegen der Sicherheitsbedenken stagniert.

Tabelle 1: KKW vom Typ WWER in Osteuropa [2]

	Rußland	Ukraine	C und S	Bulgarien	Ungarn	Gesamt
W - 230	4 / 0		2 / 0	4 / 0		10 / 0
W - 213	2 / 0	2 / 0	6 / 4		4 / 0	14 / 4
W - 320	6 / 9	10 / 6	0 / 2	2 / 0		8 / 17
Anteil an Stromerzeugung im Land		2 %	28 %	35 %	51 %	63 Anlagen (47 GWe)

Dennoch dürften die angegebenen Zahlen in etwa den realen Stand in den angeführten osteuropäischen Ländern widerspiegeln (in [3] werden höhere Zahlen als in Tabelle 1 angegeben mitgeteilt). Man kann davon ausgehen, daß insgesamt in Rußland, der Ukraine, der Tschechischen Republik, der Slowakischen Republik, in Bulgarien und in Ungarn etwa 50 Kernkraftwerke vom WWER - Typ arbeiten oder sich in einer Aufbauphase befinden. Diese Kernkraftwerke werden noch längere Zeit elektrischen Strom erzeugen, da der Strom in diesen Ländern benötigt wird und Alternativen zur Bereitstellung von Elektroenergie dort kaum existieren. Diese Kernkraftwerke gehören damit aber auch zu uns, die wir in Europa leben, und mit ihnen ihre Probleme. Wir müssen zu ihnen ein aktives Verhältnis haben. Und da diese Anlagen unter Kritik stehen, müssen wir uns mit den Fragen ihrer Sicherheit beschäftigen.

Das wird im internationalen Maßstab praktiziert. So tagte z.B. vom 2. bis 3. Februar 1995 in Garching eine Brainstorming Group von hochrangigen Wissenschaftlern der EU-Länder und einiger ost- bzw. Mitteleuropäischer Länder, um Fragen einer engen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Reaktorsicherheitsforschung und -technologie zu beraten. Schwerpunktthemen und Modalitäten der Zusammenarbeit wurden festgelegt, zwei Arbeitsgruppen (***Structural Integrity and Materials; Thermohydraulics, Reactorphysics, SA Analysis and AM Procedures)*** gebildet [4]. Die internationale

Zusammenarbeit auf den genannten Gebieten wurde auf eine höhere Basis gestellt, sie ist auf lange Sicht angelegt.

Die Probleme der einzelnen WWER-Kernkraftwerke werden denen ähneln, die wir aus dem Kernkraftwerk Greifswald kennen. Das ergibt sich auch aus den Ergebnissen der erwähnten Expertenberatung. Deshalb ist es für das Anliegen dieses Vortrags nützlich und ausreichend, wenn wir uns im folgenden hauptsächlich mit dem KKW Greifswald beschäftigen [4].

Ich möchte noch zwei Gesichtspunkte nennen, die meine Haltung zur Arbeit der sowjetischen Kernkraftwerke in der DDR berühren, wenngleich nicht bestimmen.

Die UdSSR hat 1954 mit der Aufnahme des Betriebs im Kernkraftwerk Obninsk einen mühevollen Start vollzogen (das KKW Obninsk war zum Beispiel mit einer im zweiten Weltkrieg erbeuteten SIEMENS-Turbine ausgerüstet). Damit hat sie den weltweiten Wettbewerb zur Anwendung der Atomenergie für friedliche Zwecke für die Öffentlichkeit begonnen. Bei all den Problemen, die es dann gab, war dies ein mutiger Schritt. Das Land war 1954 in einer wirtschaftlich noch schlimmen Situation, der technologische Stand in seiner Industrie war schwach. Dennoch wurde der Beginn einer friedlichen industriellen Nutzung der Kernenergie gewagt, eine mögliche Alternative zu den Atomwaffen gezeigt.

Kernkraftwerke haben sich seither in den meisten Industrieländern etabliert und verfügen heute im allgemeinen über einen relativ stabilen Sicherheitsstatus. Wenn letzteres von einem großen Teil der internationalen Öffentlichkeit anders gesehen wird, muß man das zur Kenntnis nehmen und die Motive auch respektieren. Alle Zugeständnisse von Politikern an diese Öffentlichkeitsmeinung werden wahrscheinlich nichts daran ändern, daß die KKW eine wichtige technische Rolle weiterhin spielen werden, bis sich in einem größeren Maßstab reale Alternativen verwirklichen lassen. Dies betrifft vordergründig die Rohstoff- und Energieversorgung, doch wohl aber mehr die Lebensweise der Menschen in einem Teil unserer Erde. Denn man weiß, daß die Zeit zur Verabschiedung von einer Überflußgesellschaft, die die natürlichen Umweltbedingungen und die Rohstoffvorräte unvertretbar strapaziert und gleichzeitig ein kulturvolles Leben der Mehrheit der Menschen behindert, reif ist. Solche Alternativen müßten gefunden werden. Hierbei wird auch die Rolle der Kernenergie wieder zu prüfen und neu zu bewerten sein. Es sieht so aus, daß man auf sie angewiesen sein wird. Den Beginn für ihre derzeit weltweite Entwicklung stellte die Inbetriebnahme des KKW Obninsk im Jahre 1954 dar.

Der zweite Gesichtspunkt: Seit vielen Jahren stehen die WWER-Anlagen in berechtigter internationaler fachlicher Kritik. Es ist deshalb legitim zu

prüfen, wie die KKW-Bedienungsmannschaften in Rheinsberg und in Greifswald mit ihnen zurecht gekommen sind.

2. Zu Fragen der Kernenergieentwicklung in der DDR

Die Konzeptionen und die praktischen Schritte zur Entwicklung der Kernenergieanlagen auf dem Boden der DDR waren widersprüchlich. Es begann, ausgelöst durch den Start des KKW in Obninsk, mit einer Euphorie. 1956 verkündete der damalige Minister Selbmann in einer veröffentlichen Rede auf einer Parteikonferenz der SED, daß in den damals folgenden zehn Jahren auf dem Gebiet der DDR sechs sowjetische Kernkraftwerke gebaut werden sollen[5]. Das war ein etwas verunglückter Notruf aus einer schwierigen Situation auf dem Gebiet der Energieversorgung. Die rohstoffarme DDR mußte damals aus unterschiedlichen Gründen die von ihr benötigte Energie selbst aufbringen. Man war zum Beispiel gezwungen, die sogenannte Salzkohle im mitteldeutschen Raum abzubauen. Obwohl diese Kohle bis zu 30% Asche und beträchtliche Mengen Feuchtigkeit enthielt, ihre Verbrennung große Schäden in der Umwelt und in den technischen Verbrennungsöfen verursachte, war sie so wichtig, daß man ihretwegen Dörfer und Eisenbahnlinien verlegte. Man wußte, daß die Kohle eigentlich nicht abbauwürdig war und baute sie dennoch ab. Man hatte nichts Besseres. Soweit ich mich erinnere, waren es im wesentlichen die befürchteten Folgeschäden der Braunkohleverbrennung für Menschen, Umwelt und Industrie, die als Grund für die stärkere Nutzung von Kernkraftwerken genannt wurden. Man kannte die Probleme der Braunkohle, nicht aber die der Kernenergie. Und man unterschätzte kolossal die technologischen Risiken einer sicheren Kernenergiegewinnung.

Politik und Kernkraftwerke

Die Aufteilung der Welt in Machtblöcke hatte damals die logische Folge, daß sich die DDR ausschließlich auf sowjetische Kernkraftwerke orientierte. Da man in der DDR die technologischen Schwierigkeiten in der UdSSR kannte, gab es sporadische Versuche, auch andere Wege zu finden, z.B. Kernkraftwerke aus dem Westen zu importieren. Solche Versuche wurden ziemlich hart korrigiert. Es ist hier angebracht, an Hand von zwei recht unterschiedlichen Beispielen auf politische Einflüsse einzugehen, die in der UdSSR und auch in der DDR auf die Kerntechnik ausgeübt wurden.

In der UdSSR erfolgten Entwicklung der Kerntechnik und Produktion kerntechnischer Einrichtungen jahrzehntelang in spezialisierten Einrichtungen, unabhängig davon, ob es sich um die Entwicklung von Atomwaffen oder von Kernkraftwerken handelte. So wurden die Kernkraftwerksreak-

toren vom Typ WWER in Podolsk in der Nähe von Moskau konstruiert. In der gleichen Stadt erfolgte auch die Entwicklung von Antriebsreaktoren für Unterseeboote. Solche Einrichtungen und Städte waren von der übrigen Welt sorgfältig abgeschirmt. Man nannte sie geschlossene Einrichtungen und Städte.

Der „graue" Sektor brachte der Sowjetunion für die Erreichung ihrer hochgespannten Ziele auf technischem Gebiet ganz gewiß Vorteile. Man konnte geeignete Mitarbeiter, die benötigten Mittel und auch die Arbeitsbedingungen den gegebenen Umständen gemäß optimal auswählen. Wie der Autor beim Besuch einer Produktionsstätte für Brennelemente zum WWER 1000 in Nowosibirsk 1980 feststellen konnte, wurden unter diesen Bedingungen auch ein angemessenes technologisches Niveau und eine zwar aufwendige, aber gute Arbeitskultur erreicht. Man stand entsprechenden Einrichtungen des Westens nicht nach, war in manchem vorbildlich. Bedauerlicherweise hat dies nicht oder im nur völlig ungenügenden Maße in den zivilen Sektor der Wirtschaft durchgeschlagen. Zwischen beiden Sektoren gab es starre Grenzen. Man wollte sich wohl auch vor Störungen durch den politischen Gegner schützen. So grundlos waren die gegenseitigen Befürchtungen und das allgemeine Mißtrauen jener Zeit nicht, wie man heute nach Ende des kalten Krieges in persönlichen Gesprächen mit Kollegen aus Ost und West offenherzig erfährt.

Ein großer Nachteil bestand für unsere sowjetischen Kollegen darin, daß sie international weitgehend isoliert waren. Selbst die DDR war für viele von ihnen als „Vorstufe zum Westen" nicht zugänglich. In gemeinsamer Arbeit lernte man sich später kennen und schätzen. Dennoch war für sie eine Treibhausatmosphäre typisch, die eine fachliche Kritik von außen, für jede schöpferische Tätigkeit dringend notwendig, kaum zuließ. So wurden optimale technologische Wege nicht immer gefunden. Und was mindestens gleich wichtig ist, eine Kritik der Öffentlichkeit im eigenen Land war allein deshalb nicht möglich, weil die Menschen kaum informiert waren. Sie war wohl auch nicht immer erwünscht.

Ich muß nun hier in diesem Gremium einige bittere Anmerkungen machen, die über das eigentliche Anliegen des Vortrags hinaus reichen, die aber zum Verständnis unserer Vergangenheit in der DDR notwendig sind. Ich gehe davon aus, daß eine klare und faire Auswertung unserer Erfahrungen für Gegenwart und Zukunft wichtig ist. Ich zitiere aus einem umfangreichen Papier, das 1964 von damals zwei verantwortlichen Wissenschaftlern aus dem Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf im Sinne eines Memorandums als Studie verfaßt und an hohe Leitungsgremien verschickt worden war [6]:

- Die DDR solle keine Leistungsreaktoren entwickeln. Die UdSSR garantiere der DDR die Bereitstellung modernster Leistungsreaktoren. Die DDR solle sich in Forschung, Entwicklung und Fertigung auf Ausrüstungen des Kernbrennstoffzyklus orientieren, denn die für den Brennstoffzyklus notwendigen Chemieanlagen stellen den modernsten Zweig des chemischen Anlagenbaus von morgen dar. Die Beherrschung ihrer Fertigungstechnologie wird zu einer entscheidenden Frage der Exportfähigkeit des Chemieanlagenbaus, wenn man in Rechnung stellt, daß die Kernenergie bis zum Jahre 2000 bereits 50% der Gesamtenergieerzeugung der Welt ausmacht. Das entspricht der heutigen Gesamtkapazität aller Kraftwerke der Welt ...

- Für die Wiederaufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe sind nichtwässrige Verfahren zu entwickeln ...[6]

Ich gestatte mir hier einige Zwischenbemerkungen: Das alles war 1964. Erst zwei Jahre später ist das KKW Rheinsberg, gar neun Jahre später ist der erste Block des KKW Greifswald an das Netz gegangen. Es ist selbstverständlich, daß 1964 der wesentliche Teil der Forschungskapazität des Zentralinstituts für Kernforschung Rossendorf und große Kapazitäten anderer Einrichtungen auf Probleme des thermischen Kernkraftwerks orientiert waren. Es gab zu diesem Zeitpunkt beachtliche Ergebnisse, z.T. in schon materialisierter Form.

Einen geschlossenen Kernbrennstoffzyklus gibt es weltweit heute noch nicht, das gilt besonders auch für nichtwäßrige Verfahren der Wiederaufbereitung von bestrahlten Kernbrennstoffen. Aber mit dem Export von Chemieanlagen für den geschlossenen Kernbrenstoffzyklus (KBZ) wollte man aus der Sicht von 1964 die Exportfähigkeit des Chemieanlagenbaus der DDR sichern! Mit einer solchen Demagogie sollte die gesamte kernenergetische Forschung der DDR auf etwas „ganz Neues" umorientiert werden. Und sie wurde!

Am 19.Juli 1966 verlangte der in Rossendorf für die kernenergetische Forschung Verantwortliche [7], ich zitiere:

- Eigene KBZ-Anlagen ab 1980. Die gesamte kernenergetische Forschung und Entwicklung orientiert sich auf die Wiederaufarbeitung und auf die Brennelementfertigung.

- Bis 1969 ist vorzusehen: Herstellen von Brennelementmustern mit Stahlhüllen und Urandioxid, Urannitrid bzw. Urancarbonitrid, Schaffung der Grundlagen zur Wiederaufarbeitung von SBR*)-Brennstoff nach dem chlorierenden Verfahren.

- 1975: Produktionsüberführung [7].

Das war wissenschaftlich gesehen grober Unfug. Daran ändert sich auch nichts durch die Tatsache, daß der Leiter dieser Konzeption wissenschaftlich ausgewiesen und international bekannt war, eine Persönlichkeit von Rang darstellte. Verhängnisvoll war, daß er unantastbar schien und eine Direktverbindung zur obersten politischen Führung in der DDR hatte. So wurde es möglich, daß bereits aus diesen Vorstellungen heraus weitgehende praktische Maßnahmen durchgesetzt werden konnten. Eine Fülle neuer Forschungsthemen wurde eröffnet, neue Forschungskollektive wurden gegebildet, Investitionen wurden eingeleitet. Die laufenden kernenergetischen Forschungen, Entwicklungen und Produktionen wurden, so weit es ging, der oben genannten Zielstellung angepaßt oder in der Mehrzahl zusammen mit laufenden technischen Projekten abgebrochen. Wissenschaftliche Einwände wurden aus prinzipieller Sicht nicht berücksichtigt, unter wissenschaftlichem Deckmantel wurde aus subjektiven wissenschaftspolitischen Überlegungen heraus entschieden.

Natürlich wurde nach einigen Jahren die Fehlorientierung überwunden. Man brauchte aber zu lange Zeit, um eine als unabänderlich gehandhabte Entscheidung zu korrigieren. Inzwischen waren die meisten Forschungen, technischen Entwicklungen und Produktionen zur Projektreifung des thermischen Kernkraftwerks in der DDR, die vielleicht auch internationalen Einfluß gehabt hätten, eingestellt und die Kapazitäten umorientiert worden. Der sachliche und moralische Schaden dieses Intermezzos war für die Einführung der Kernkraftwerkstechnik in die DDR-Wirtschaft für Jahrzehnte groß. Die Ursachen für diese Fehlentwicklung lagen, erläutert mit der Absicht, schnell die potentiellen Möglichkeiten der Kernbrennstoffausnutzung zu erschließen, letztlich in politischem Sendungsbewußtsein, in übersteigertem Ehrgeiz Einzelner. Das war paradoxerweise ein trauriges Beispiel für eine „Abwicklung" von Forschungskollektiven, beispielgebend auch hinsichtlich Diktion und Selbstgerechtigkeit.

In Orientierung, Ausmaß und Konsequenzen freilich war sie nicht im entferntesten vergleichbar mit jener großen und überaus kurzsichtigen Abwicklung von Instituten und Wissenschaftlern im Osten des vereinigten Deutschland 25 Jahre später. Interessant ist, daß hierbei ebenfalls namhafte Wissenschaftler Verantwortung übernommen hatten.

3. KKW-Blöcke in der DDR

Insgesamt waren auf dem Gebiet der DDR 6 KKW-Blöcke in Betrieb. Das Kernkraftwerk Rheinsberg arbeitete als Prototypanlage für die gesamte WWER - Reihe. Es war von sowjetischer und deutscher Seite als solche

geplant und auch gemeinsam genutzt worden, galt darüber hinaus als „Lehr- und Versuchskernkraftwerk". Andererseits war das KKW eine feste Größe in der Stromversorgung der DDR, um so mehr, als es stabil gearbeitet hat. Aus dieser dreifachen Funktion ergaben sich im Praktischen manche Probleme, die aber nach Auskunft ehemaliger verantwortlicher Mitarbeiter recht günstig gelöst werden konnten. Zu erwähnen ist, daß in Rheinsberg zahlreiche Erprobungen für die sowjetische WWER-Entwicklung durchgeführt wurden.

Die Blöcke 1 - 4 des Kernkraftwerks Greifswald hatten eine Leistung von je 440 MWe, sie waren vom ursprünglichen Typ W-230. Mit dem Block 5 begann für die DDR die Reihe der W-213 - Reaktoren. Er war nur kurzzeitig am Netz. Die Blöcke 6 bis 8 sollten Anfang der neunziger Jahre in Betrieb genommen werden. Für das Kernkraftwerk Stendal waren nur WWER 1000 - Reaktoren vorgesehen gewesen, die Blöcke 1 und 2 sollten Mitte der neunziger Jahre in Betrieb gehen. 1990 wurden alle in der Tabelle 2 angeführten Reaktorblöcke für immer stillgelegt, der Aufbau der weiteren Blöcke in Greifswald und in Stendal wurde abgebrochen.

4. Grundprinzipien der Sicherheit der WWER-Anlagen

Die Sicherheitsprinzipien der W-230 stammen aus den sechziger Jahren. Man ging in dieser Anfangsperiode der Entwicklung von Kernkraftwerken in der UdSSR davon aus, daß durch höchste Ansprüche an die Werkstoffe, Rohrleitungen und Aggregate die Anlagensicherheit gewährleistet und das Auftreten von Havarien verhindert werden kann [8]. Es zeigte sich aber im Betrieb der ersten Kernkraftwerksblöcke, daß mit Genügen dieser Anforderungen nicht unbedingt Schäden größeren Ausmaßes ausgeschlossen werden können. Es wurde daraufhin eine umfassende, streng verbindliche Regelung für alle Phasen des Baus, des Betriebs und der Strahlenschutzkontrolle von Atomanlagen erlassen (OPB-73).

Diese Regelung erhielt den Status „höchster Priorität" [8]. Nach ihr wurden die Kernkraftwerke W-213 und W-320 gebaut. 1982 wurde OPB-73 durch die weiterentwickelte Ordnung OPB-82 ersetzt. Nach der Havarie von Tschernobyl schließlich hat man bei gleichzeitiger Auswertung der Havarie von Three Miles Island / Harrisburg die Verordnung zur Sicherheit von Kernkraftwerken völlig neu verfaßt, sie trat 1990 als OPB-88 in Kraft. In dieser Verordnung werden alle denkbaren Störfälle bis hin zum Kernschmelzen berücksichtigt. Vergleichsweise große Aufmerksamkeit widmete man dem subjektiven Handlungsspielraum der Operatorteams.

Zunächst zur Sicherheitsauslegung des W-230.

Tabelle 2: WWER-Anlagen in Deutschland

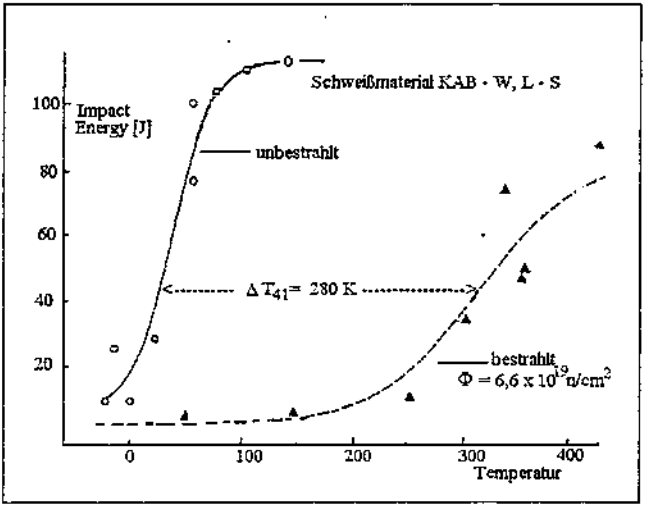
Standort	Typ	Block	Leistung MWe	Start (Baubeginn)
Rheinsberg	WWER		70	1966
Greifswald	W-230	1	440	1973
Greifswald	W-230	2	440	1974
Greifswald	W-230	3	440	1977
Greifswald	W-230	4	440	1979
Greifswald	W-213	5	440	1989
Greifswald	W-213	6	440	(1980)
Greifswald	W-213	7	440	(1981)
Greifswald	W-213	8	440	(1981)
Stendal	W-320	1	1000	(1984)
Stendal	W-320	2	1000	(1984)

Entsprechend allen Konzepten für Druckwasserreaktoren wird vorausgesetzt, daß die Integrität der Reaktordruckbehälter (RDB) nicht verletzt wird. Die Druckbehälter der beiden ersten Blöcke des KKW Greifswald waren teilplattiert, die der folgenden Blöcke vollständig plattiert. Die Hauptkühlmittelleitung (HUL) hatte die Nennweite 500. Zur Reaktorkühlung dienten sechs parallele Kühlschleifen mit je einer Hauptumwälzpumpe (HUP), zwei Hauptabsperrschiebern (HAS) und je einem liegenden Dampferzeuger. Diese Anordnung gestattete, bei laufendem Betrieb im Bedarfsfall eine Kühlschleife mit einem Dampferzeuger für Wartungszwecke außer Betrieb zu nehmen. Die Kondensatorkühlung erfolgte mit Ostseewasser.

Im folgenden die Grundpfeiler der Sicherheitsphilosophie der W-230 [1][8][9]:

- Eine hohe Qualität der eingesetzten Werkstoffe gewährleistet eine hohe Basissicherheit. So bestehen alle Rohrleitungen, auch die Heizrohre der Dampferzeuger, aus titanstabilisierten austenitischen Stählen. Der RDB wurde aus drei nahtlos geschmiedeten Ringen aus niedriglegiertem Cr-Mo-V-Stahl gefertigt, die durch Rundnähte miteinander verbunden sind. Druckhalter und Dampferzeuger bestehen aus Kohlenstoffstahl.

Abbildung 1 Primärkühlkreislauf des W-230



- Der Abriß einer HUL wurde als extrem unwahrscheinlich betrachtet.
- Als Auslegungsstörfall gilt der Abriß einer Rohrleitung mit der Nennweite 100. Durch Auslaufbegrenzer ist das einem Leck der Nennweite 32, also 8 cm², äquivalent.
- Die Gewährleistung des Sicherheitseinschlusses erfolgt durch ein spezielles Drucksystem. Die Überdruckklappen des Systems öffnen sich, wenn ein Leck > NW 32 auftritt
- Schwere Störfälle und Kernschmelzen werden ausgeschlossen.

Die wesentlichen Mängel im Sicherheitssystem des Prototypreaktors Rheinsberg und des W-230, Annahme eines zu geringen Projektstörfalls und anfällige Notkühlung, werden mit den Reaktoren W-213 und W-320 überwunden. Mit dem W-213 wurden folgende Fortschritte erreicht:

- Der doppelseitige Bruch der HUL wird als Projektstörfall angesehen
- Die Notkühlung kann das gesamte Spektrum von Störfällen beherrschen
- Die Notkühlung ist im Niederdruck- und im Hochdruckbereich dreisträngig, die Stränge sind weitgehend voneinander getrennt und unabhängig von den Betriebssytemen

- Die Probleme des Sicherheitseinschlusses sind besser als beim W-230, wenn auch nicht ideal, gelöst

Das Sicherheitssystem des W-320 entspricht in etwa dem internationalen Stand. Die Entwicklung des W-392 begann 1988, des W-407 etwas später. Mit diesen beiden Projekten wird u.a. angestrebt, daß die Sicherheitsausstattung beider KKW allen Kritiken standhält. Ihr heutiger Entwicklungsstand scheint fortgeschritten zu sein, die Gutachten der deutschen Gesellschaft für Reaktorsicherheit Köln und aus den USA zum W-407 sollen die angestrebten Ansprüche der Projekte bestätigen [10] . Damit wäre zu erwarten, daß jetzt auch die WWER - Linie zu befriedigenden Ergebnissen geführt wird.

Zur Bewertung der Sicherheitsauslegung der WWER-Anlagen

In knapper Form haben HEUSER u.a. [2,11] eine Beurteilung der sicherheitstechnischen Auslegung der Kernkraftwerke vom Typ WWER mitgeteilt. Sie stützten sich auf umfangreiche Untersuchungen, die in einer ersten Phase mit dem ehemaligen Staatlichen Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz (SAAS) Berlin, dann aber mit einer Vielzahl von Fachleuten der Gesellschaft für Reaktorsicherheit, TÜV Bayern, TÜV Norddeutschland, des Rheinisch-Westfälischen TÜV, von SIEMENS KWU, der Materialprüfanstalt Stuttgart, des Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire durchgeführt worden waren [9]. Konsultiert wurden in dieser Phase der Untersuchungen Vertreter des Ministeriums für Atomenergie und -industrie in Moskau und des Kurtschatow-Instituts.

Die gravierendsten Mängel sehen die Verfasser beim W-230, dem Reaktor der ersten Generation:

- Die Neutronenversprödung im Kernbereich
- Die geringe Redundanz und eine weitgehende Vermaschung in den Sicherheitssytemen (Notkühlung, sekundärseitige Noteinspeisung, Diesel - Notstromversorgung)
- Unzureichende Instrumentierung und Regelung, das Fehlen wichtiger Anregekriterien im Reaktorschutzsystem, z.B. für die Reaktorschnellabschaltung
- Eine geringe Redundanz z.B. bei der Verlegung von Kabeln redundanter Systemstränge.

- Unzureichende Brandschutzmaßnahmen. So kann z.B. ein Brand in den Kabelverteilungen oder im Bereich der Schaltanlagen den vollständigen Ausfall der Warte verursachen.

Tabelle 3: WWER - Entwicklungslinien

Etappe	*Beispiel*	*Inbetrieb-nahme*	*Leistung*	*Hauptmerkmale der Sicherheitstechnik*
Prototyp	Rheinsberg	1966	70 MWe	Projektstörfall: Bruch DN 50 (32). Notkühlung: HD und ND Gebäudespraysystem. Druckraumsystem ohne Klappen, ohne Naßkondensator. mangelhafter Schutz gegenüber äußerer Einwirkung
Erste Generation W-230	Greifswald Block 1	1973	440 MWe	Projektstörfall: Bruch DN 100 (32).Notkühlung: HD. Gebäude-spray-system.Druck-raumsystem mit Klappen. mangelhafter Schutz gegenüber äußerer Einwirkung
Zweite Generation W-213	Greifswald Block 5 Kola	1989 1981	440 MWe	Projektstörfall: Bruch HUL DN 500 Notkühlung: 3 x 100% HD,ND, Kernflutbehälter Gebäudespraysystem Druckraumsystem mit Naßkondensator geringer Schutz gegenüber äußerer Einwirkung

Etappe	*Beispiel*	*Inbetrieb-nahme*	*Leistung*	*Hauptmerkmale der Sicherheitstechnik*
Dritte Genera-tion W-320	Nowo-Woronesch Stendal	1989 1995	1000 MWe	Wie oben, jedoch mit Volldruckcontainment. Verbesserter Schutz gegen-über äußerer Einwirkung
Vierte Genera-tion W-407 [10]	Sosnowy Bor		ca500M We	Inhärent sicherer Reaktor, Prototyp-Anlage, wird für Sosnowy Bor vorbereitet
Fünfte Genera-tion W-392 [10]		ca. 1998 geplant	.	Projektstörfall: Bruch HUL DN 850. Doppeltcontain-ment mit passiver Kühlung. Containment-Venting über Filter. Core-Catcher

Nach HEUSER sind Nachrüstungen zwar unumgänglich, aber praktisch nicht durchführbar. Diese, ich kann hier sagen, offizielle Meinung ist wichtig, da auch heute noch eine Vielzahl von Reaktoren des Typs W-230 in Europa arbeitet.

Auch für den W-213 und den W-320 wurden die Auslegungsdefizite herausgearbeitet [2,11,12]. In diesen Fällen wird eine Nachrüstung für möglich gehalten. Die wichtigsten Maßnahmen hierzu sind in der Tabelle 4 abzulesen.

Ich möchte auch einige *Vorzüge der WWER 440 (W-230 und W-213)* nennen (vergl. Tab.5). Das sind die relativ geringe Heizflächenbelastung, die durchgängige Auslegung der Rohrleitungen auf der Basis von Austenit, die Möglichkeit, einzelne Kühlschleifen und damit auch einzelne Dampferzeuger abzusperren, und der große primär- und sekundärseitige Wasserinhalt. Die große Menge Speisewasser in den liegenden Dampferzeugern gestattet es, auch bei Stromausfall mehrere Stunden lang die Nachwärme abzuführen. Diese Vorzüge ließen sich in der Praxis überaus vorteilhaft nutzen.

Tabelle 4: Wichtige Nachrüstmaßnahmen für W-230 und W-213 [12]

	W-213	W-320
Sicherheitseinschluß	Nachweis Druckabbau über Naßkondensation	
Notkühlung	Leckü̈berwachung Saugleitung und Gebäudesumpf	ebenfalls
Dampferzeuger		Konstruktive Änderung am Detektor
FD-, SpW-, NSpW-Leitung	Räumliche Trennung der Rohrleitungen	ebenfalls
Noteinspeisung	Nachrüstung eines autarken Notstandsystems	ebenfalls

Wie hatte man in der DDR die Sicherheitsphilosophie zum WWER gesehen?

In dieser Frage spiegeln sich verschiedene Phasen der Kernenergieentwicklung in der DDR wider. Mit dem Aufbau des Kernkraftwerks in Rheinsberg war besonders in den ersten Jahren seines Betriebs eine sehr enge Zusammenarbeit mit den sowjetischen Entwicklern auf gleichberechtigter Basis verbunden. Man ging sowohl in der UdSSR als auch in der DDR davon aus, daß die DDR mit dem wachsenden Wissen und mit Vorschlägen die Sicherheitsphilosophie der WWER - Anlagen insgesamt beeinflussen könne und auch solle. Das änderte sich mit dem Aufbau des Kernkraftwerk Greifswald. Nun vertrat man in der DDR offiziell den Standpunkt, daß mit dem Import der Kernkraftwerksanlagen auch deren Sicherheitsstatus mit importiert wurde. Zwar gab es auch dann noch vielfältige Formen enger wissenschaftlicher und technischer Zusammenarbeit. In den deutschen Anlagen entstanden Erfahrungen und Verbesserungsvorschläge, die von den deutschen Technikern genutzt und von ihren sowjetischen Partnern gefragt waren. Man kannte sich aus langjähriger Zusammenarbeit. Das Partnerverhältnis blieb erhalten, wurde aber von kommerziellen Gesichtspunkten überlagert.

Vorschläge zur Rekonstruktion der Blöcke 1 - 4 des KKW Greifswald

Wenige Wochen nach der Havarie von Tschernobyl fand in der Nähe von Berlin eine mehrwöchige Klausurberatung einer größeren Anzahl von Wissenschaftlern und Technikern zu Fragen der Betriebssicherheit der Kern-

kraftwerke von Rheinsberg und Greifswald statt. Im Ergebnis wurden Empfehlungen an die Regierung übersandt. Sie sind von mir heute direkt nicht mehr nachzulesen, wohl aber die Kopie von Vorschlägen der Gruppe Energie des damaligen Forschungsrates vom Januar 1987, die ziemlich gut den Expertenempfehlungen vom Juni 1986 entsprachen. Es ist nach den Empfehlungen der Reaktorsicherheitskommission aus dem Jahre 1993 heute nicht uninteressant, aus den Forschungsratempfehlungen des Jahres 1987 zu zitieren. Ich entnehme aus den Vorschlägen der Gruppe Energie des Forschungsrats vom Januar... 1987, leicht gekürzt, den Punkt 4 „Rekonstruktion der Blöcke 1 - 4 des KKW Greifswald" [13]:

Zum Reaktor und zum Primärkühlkreislauf:

- Senkung der Neutronenbelastung der Druckgefäße durch Veränderung des Brennstoffregimes und den Einsatz von Abschirmkassetten
- Wiederherstellung der Zähigkeit des Stahls
- Ausschluß von Thermoschocks an den Reaktorwänden bei Notkühlung durch Erwärmen des Havarieborwassers und durch Schnellschaltsysteme
- Ausschluß von explosiven Gasgemischen
- Austausch der sechs Dampferzeuger des Blocks 1, die nach den Störungen der Jahre 1982 und 1983 (siehe später, Ne) nicht mehr die vollen Reserven haben
- Aufbau dritter Stränge zur Notkühlung und zur Abkühlung im Störfall

Weiter:

- Rekonstruktion und Entmaschung des Technisch-Wasser-Systems und des Zwischenkühlkreislaufs
- Aufbau eines dritten Strangs der Notstromversorgung, Entmaschung der bestehenden Stränge
- Aufbau einer Reservesteuerwarte
- Rekonstruktion des gesamten Automatisierungssystems einschließlich der technischen Diagnostik, der automatisierten chemischen und radiometrischen Betriebskontrolle
- Aufbau weiterer Systeme der automatischen Branderkennung und Brandbekämpfung

Tabelle 5: WWER Einige Kennziffern der Reaktoren 440, WWER 1000 und Konvoi 1300

		WWER 440	WWER 1000	Konvoi 1300
Thermische Leistung	MW	1375	3000	3765
Reaktorkern Heizflächen-belastung	W/cm²	44	57	61
Leistungsdichte	kW/dm³	86	107	93
Wasserinhalt primär	m³/GW	156	99	99
sekundär	m³/GW	193	88	61

Wie nicht anders zu erwarten war. entspricht die sicherheitstechnische Analyse der Reaktorsicherheitskommission des Jahres 1993 in prinzipiellen Fragen den Empfehlungen des Forschungsrates des Jahres 1987, die, da sie nicht zitiert wurden, der RSK offenbar nicht bekannt waren. Die unterschiedlichen Schlußfolgerungen sind verständlich. 1987 bestand in der DDR die Absicht, die Empfehlungen des Forschungsrates trotz des großen materiell-technischen Aufwands umzusetzen, das KKW Greifswald also zu rekonstruieren. Die Kosten wurden real abgeschätzt. Wenn die Rekonstruktion dann nur in ersten Ansätzen begann (z.B. durch die thermische Ausheilung der RDB), so lag das wohl nicht zuletzt an der allgemein angespannten politischen und wirtschaftlichen Situation in der DDR und an akuten Unsicherheiten im Verhältnis zwischen DDR und UdSSR. Es ging ja in diesen Jahren kaum noch etwas ohne weiteres.

6. Betriebserfahrungen der KKW-Blöcke in der DDR

Ein Kriterium der Wahrheit ist die Praxis. Es ist deshalb von Interesse, vor allem auch für die Bevölkerung im umliegenden Territorium, wie sicher die WWER-Anlagen auf dem Gebiet der DDR gearbeitet haben.

1. Zunächst zum Lehr- und Versuchskraftwerk Rheinsberg.

Dieses KKW war das erste Kernkraftwerk, das im Rahmen der ehemaligen RGW-Länder außerhalb der UdSSR gearbeitet hat. Es hat für die Einführung der KKW-Technik in der DDR gewissermaßen eine Pfadfinderrolle

gespielt. Wie erwähnt, diente es auch der Sowjetunion für Erprobungen unterschiedlicher Art. Es war voll am Netz und hatte eine mittlere Arbeitsverfügbarkeit von 61%, in den achtziger Jahren von etwa 80%.

2. Zu den Blöcken 1 - 4 in Greifswald [14]

(Da der Block 5, obwohl von der Konzeption her besser als die Blöcke 1 -4, nur kurzzeitig im Betrieb war, ist über ihn nicht zu berichten).

Nukleare Sicherheit und Strahlenschutz [14]

Während der Betriebsjahre des KKW Greifswald kam es zu keiner Zeit zu einer Überschreitung der international üblichen Grenzwerte für Personal und Umgebung. Eine jährliche Kollektivdosis zwischen 1 und 3 Sv pro Block ergab sich vor allem aus den Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen. Günstig zur Senkung der Strahlenbelastung war die regelmäßige Durchführung chemischer Dekontaminationen im Primärkühlkreislauf, bei denen radioaktive Ablagerungen an den Werkstoffinnenflächen beseitigt wurden. In der Kraftwerksumgebung war eine Erhöhung der Belastung über die natürliche Strahlenbelastung hinausgehend meßtechnisch nicht feststellbar [13]. Es war seitens der damals Verantwortlichen im Staatsapparat leichtfertig, die Bevölkerung über diese Dinge nicht aufzuklären. Emotionen hätten vielleicht vermieden werden können.

Die Anzahl der Störfälle im KKW hielt sich in Grenzen (Tabelle 6). Laut *ASSET - Mission* der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) wurden für 1988 und 1989 folgende außergewöhnliche Ereignisse registriert: 2 x Stufe 2, 4 x Stufe 1 (höchste Stufe:4)

Arbeitsverfügbarkeit

Die Arbeitsverfügbarkeit der Blöcke 1 - 4 lag, gemittelt über die jeweilige Lebenszeit der Blöcke, zwischen 65,8 und 78,8%. Nimmt man aus dieser Mittelung die einzelnen Einlaufphasen, die jeweils ersten Betriebsjahre, heraus (was natürlich etwas heikel ist), so erhält man Werte zwischen 70 und 83%. Die niedrigen Verfügbarkeiten der Blöcke 1 und 2 erklären sich aus konkreten Störungen der Jahre 1975 und 1976

Tabelle 6: Außergewöhnliche Ereignisse im KKW Greifswald

	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Kategorie 1	0	0	0	0	0	0	0
Kategorie 2	9	8	7	3	3	3	1

(Kategorie 2 (SAAS 1983): Redundanzminderung an Sicherheitssystemen)

Ursachen für Nichtverfügbarkeit:

Jährliche Brennstoffumladung; jährliche planmäßige Instandsetzung; planmäßige Instandhaltungsmaßnahmen: zusätzliche Instandhaltungsmaßnahmen (1975: Wechsel der Kernbrennstoffteile der Regelkassetten; 1976 - 78: Stabilisierung der Kollektoren der Dampferzeuger der Blöcke 1 und 2; 1882: Schadensbeseitigung an den Dampferzeugern des Blockes 1; 1986: Stabilisierung der Schachthalterung im Block 2).

Tabelle 7: Arbeitsverfügbarkeit des KKW Greifswald

Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
65,8%	70,6%	78,8%	78,0%

Störungen und Probleme beim Betrieb der Blöcke 1 -4

Hierzu zunächst zwei allgemeine Bemerkungen.

Die Erkenntnisse aus dem Betrieb der KKW-Blöcke und insbesondere aus aufgetretenen Störungen führten fast immer dazu, Verbesserungen in den Kraftwerksbetrieb einzuführen. Das geschah sowohl selbständig durch die im KKW tätigen Betriebsmannschaften als auch nach eingeleiteten F/E-Maßnahmen, die in der Regel bei Störungen, wenn sie nicht die Folge von Fahrlässigkeiten waren, eingeleitet wurden. An den Forschungsarbeiten für das Kraftwerk beteiligten sich unterschiedliche Einrichtungen. Genannt seien beispielhaft die Universitäten in Magdeburg, Greifswald, Dresden, Chemnitz, die Technische Hochschulen in Zittau und Warnemünde, die Institute der Akademie der Wissenschaften in Berlin. Um nicht ungerecht zu erscheinen, werde ich im folgenden nur solche KKW-bezogene Forschungsarbeiten indirekt andeuten, die mit Störungen oder Schadensfällen zusammenhängen. Die Einrichtungen, die sich an entsprechenden Untersuchungen beteiligten, werde ich nicht nennen, zumal mehrere Einrichtungen seit Jahren nicht mehr existieren oder sich neu profiliert haben. Für die Sicherheit der KKW-Blöcke war das Sicherheitsbewußtsein der Mitarbeiter von großer Bedeutung. Hierzu gibt es viele gute und auch weniger gute Beispiele. Man muß allerdings gebührend zur Kenntnis nehmen, daß auch etwas andere Einschätzungen gegeben wurden [3].

In den siebziger Jahren kam es in den RDB 1 und 2 zu einer *Narbenkorrosion.* Die Korrosionsnarben wurden ausgeschliffen, das Wasserregime wurde geändert, die Korrosion damit gestoppt.

Obwohl die *Brennelemente* sehr stabil und die Leckrate über die vielen Jahre hinweg sehr klein war, muß über einen Zwischenfall im Jahre 1975

berichtet werden. Dort waren in den Blöcken 1 und 2 infolge zu hoher Geschwindigkeit des Kühlmittels in den Kühlkanälen der Regelkassetten an je einer Regelkassette die Unterteile abgerissen worden. Die Unterteile anderer Regelkassetten zeigten sich nach ihrer Demontage beschädigt. Nach der Beseitigung der Schadensursache traten keine weiteren Störungen an den Regelkassetten auf.

Am Block 2 wurden 1988 Veränderungen im Neutronenfluß festgestellt. Durch Rauschanalyse wurden mechanische Schwingungen an Bauteilen festgestellt. Es ließen sich *Abarbeitungen an den Schachthalterungen* lokalisieren, die durch eine Drallströmung induziert worden waren. Daraufhin wurden die Halterungen an allen Blöcken erneuert.

Im Jahre 1976 kam es zu einem *Kabelbrand im Block 1.*

Zur *Leittechnik* in allen Blöcken ist zu sagen, daß sie nicht genügte. Das trifft sowohl auf die Meßsysteme, ihre technische Gestaltung als auch auf die Rechentechnik zu. Hier war eine grundsätzliche Neuerung vorgesehen. Gravierenden Einfluß auf die Sicherheit hatte dieser Mangel freilich nicht.

Von erheblichem Gewicht waren *Werkstoffprobleme*, auf die ich deshalb etwas näher eingehen möchte [15].

Zur Neutronenversprödung:

Der RDB hat einen inneren Durchmesser von 356 cm. Das ist im Vergleich zu anderen Leichtwasserreaktoren wenig. Deshalb ist auch der Zwischenraum zwischen Brennstoffkern und der Innenwand des Druckbehälters klein. Es ist also auch relativ wenig Kühlwasser auf der Strecke vom Äußeren des Brennstoffcores zur Wand der Druckbehälters vorhanden, das die schnellen Neutronen abbremsen könnte, so daß die Neutronen relativ viel Energie an den Stahl des Druckbehälters abgeben können Es kommt zur Versprödung des Stahls.

Kritische Grenzgrößen sind eine Neutronenenergie größer als 0.5 MeV und eine Neutronenfluenz von etwa 10^{20} n/cm². Für das Ausmaß der Versprödung entscheidend ist noch ein sogenannter Versprödungskoeffizient, der stark von Art und Menge anwesender Mikrokomponenten im Stahl abhängt. Offenbar waren diese Zusammenhänge bei der Konstruktion der Druckgefäße in den sechziger Jahren nicht ausreichend bekannt. Insbesondere bei Schweißnähten ist die Möglichkeit, daß die Übergangstemperatur spröd/duktil in die Nähe des thermischen Arbeitsbereichs des Reaktors gelangt, nicht zu unterschätzen. Mikrorisse sind herstellungsbedingt wohl in jedem Stahl vorhanden. Sie sind gewöhnlich ohne große Bedeutung. Da

sie aber in sprödem Material rasch und unvorhersehbar wachsen können, ist dann der Versagensgrundsatz Leck vor Bruch nicht mehr abzusichern. Natürlich kann man die Gefahr der Neutronenversprödung durch geeignete Werkstoffauswahl und Konstruktion zurückdrängen. Die WWER-Anlagen sind aber nun einmal vorhanden. Aus Vergleichsmessungen von Einhängeproben von Lovisa (Finnland) und eines KKW in Armenien war mit Wahrscheinlichkeit zu schließen, daß der RDB-Stahl der Blöcke 1 und 2 in Greifswald über Gebühr versprödet ist, also thermisch ausgeheilt werden muß (Abb. 2).

Entsprechend der vom sowjetischen Partner benannten Bedingungen (475 °C, 152 h) und nach umfangreichen F/E-Arbeiten im Lande wurden 1988 der Block 1 und 1990 die Blöcke 2 und 3 des KKW Greifswald nach sowjetischer Technologie und mit sowjetischen Ausrüstungen thermisch ausgeheilt. Hierdurch wurde die alte Werkstoffzähigkeit zu 80% wieder erreicht.

Werkstoffehler an den Dampferzeugern:

1982 und 1983 traten plötzlich gehäuft Defekte an den Heizrohren der Dampferzeuger auf. Die Ursachen dieser Defekte wurden in interessanten wissenschaftlichen Untersuchungen im Detail aufgeklärt und dann beseitigt, so daß weitere Schädigungen der Dampferzeugerheizrohre vermieden werden konnten.

Abbildung 2

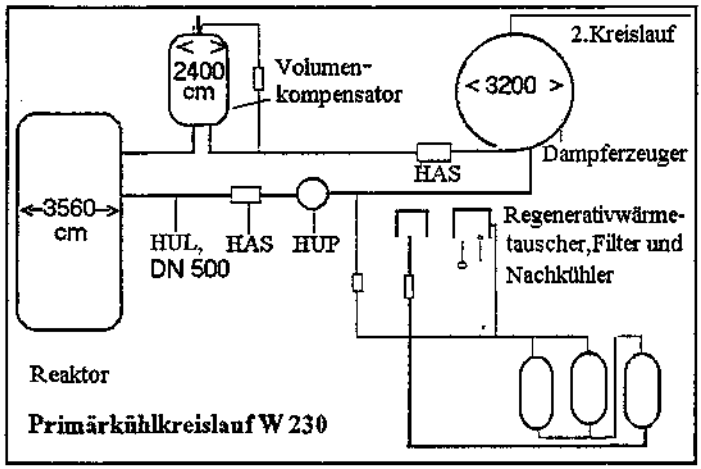


Tabelle 8: Defekte Heizrohre im KKW Greifswald

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
bis 1982	11	9	0	0
1982	126	5	0	0
1983	101	90	2	0

Eine weitgehende Schlußfolgerung aus den Werkstoffproblemen war, für die KKW-Blöcke der DDR, entsprechend den Erfahrungen der westlichen Industrieländer, für den gesamten Primärkühlkreislauf einschließlich des Reaktordruckbehälters, der Dampferzeuger und der anderen Komponenten des 1.Kreislaufs Systeme der *rechnergestützten, mechanisierten Werkstoffprüftechnik* bereitzustellen. Dazu gehörten rechnergestützte Manipulatoren, die mechanisierte Ultraschall- bzw. Wirbelstromprüfung und die automatisierte Datenerfassung und -verarbeitung, so daß die regelmäßige und sichere Erfassung des gesamten relevanten Werkstoffzustands möglich wurde. Das sollte für die WWER-Anlagen in Mittel- und Osteuropa ein Beispiel sein, da keines dieser Kernkraftwerke mit einer solchen zeitgemäßen Prüftechnik versehen war. Ein erstes Prüfsystem wurde bei der Firma SIEMENS-Kraftwerksunion gekauft. Mit der Option, für alle anderen WWER eine angepaßte Prüftechnik bereitzustellen, wurde entschieden, die für den Reaktordruckbehälter, die Dampferzeuger und den übrigen Primärkühlkreislauf benötigten Meßsysteme komplett als weltmarktfähige Produkte in der DDR zu entwickeln und zu produzieren, was für die Dampferzeuger auch mit gutem Ergebnis gelang. Die anderen Prüfsyteme blieben in der Entwicklung stecken, da sie wie das Kernkraftwerk selbst nach der deutschen Vereinigung nicht mehr gebraucht wurden.

Schlußbemerkungen

Im Jahre 1990 wurden die Kernkraftwerke Rheinsberg und Greifswald stillgelegt, da sie nicht den Zulassungsbedingungen der Bundesrepublik Deutschland entsprachen. Sie hatten Vorteile und ernsthafte Mängel. Beides wurde genannt.

Arbeitsverfügbarkeit der Reaktorblöcke und die Umgebungssicherheit während ihres Betriebs waren gut. Das spricht für einen verantwortungsvollen Umgang mit diesen Großanlagen, auch dafür, daß diese Technik beherrschbar ist.

Eine Nachbesserung der in Europa noch betriebenen WWER-Anlagen ist jedoch zwingend notwendig, um den international üblichen Sicherheitsstandard zu genügen. Das wird hinreichend schwierig sein, da Rekonstruktionsmaßnahmen, wie sie z.B. 1986 bzw. 1987 in Berlin empfohlen worden waren, erhebliche Mittel erfordern. Eine Stillegung zumindest der Kraftwerke der ersten Generation wird von den Betreiberländern offenbar abgelehnt. Es ist vom Autor nicht abzuschätzen, welcher Weg gefunden werden wird.

Die neuen WWER-Typen, W-392 und W-407, die sich noch in der Vorbereitungsphase befinden, scheinen die Mängel ihrer Vorgänger zu überwinden.

Literatur

[1] D.W. Nagel, Russische Kernkraftwerke in Osteuropa, IGTS Ingenieurgesellschaft mbH, Berlin 1992

[2] F.W. Heuser, R. Janke, P. Kelm:, atomwirtschaft 38 (1993) 426

[3] A.Birkhofer, atomwirtschaft 36 (1991),188

[4] Brainstorming Group Meeting on Februar 2 and 3, 1995 in Garching, Final Report

[5] F. Selbmann, Zeitungsmeldung 1966

[6] D.Naumann, K.Fuchs, Meinungsäußerungen des Zentralinstituts für Kernforschung Rossendorf (ZfK) zu den möglichen Beiträgen der DDR für die Reaktorentwicklung, Studie, 12.,12.,1964: Archiv des ZfK, Archiv-Nr.O/680

[7] K.Fuchs, Konzeption für ein Gutachten der Arbeitsgruppe „Schneller Reaktor" (Kernbrennstoffzyklus), 19.07.66; Archiv des ZfK, Archiv-Nr.O/555

[8] A.M. Bubrinski, Atomnaja Energija, 76 (1994), 273

[9] Gesellschaft für Reaktorsicherheit, „Sicherheitsbeurteilung des Kernkraftwerks Greifswald, Block 1 - 4", GRS-77, Juni 1990; „Sicherheitsbeurteilung des Kernkraftwerks Greifswald, Block 5"; gemeinsamer deutsch-sowjetischer Bericht; GRS-88, März 1992

10] NN, Atompresse, Nr. 7 (Februar) 1995 und Nr. 13 (April) 1995

[11] F.W. Heuser, R. Janke, P. Kelm, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 12/92;

[12] E. Schomer, atomwirtschaft 38 (1993) 433; Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit: „Sicherheitstechnische Bewertung des Kernkraftwerks Stendal A vom Typ WWER 1000 / W-320, noch nicht veröffentlicht, zitiert in [2]

[13] Gruppe Energie des Forschungsrats der DDR, 7.1.1987

[14] R. Meyer, P. Kroll, K.H. Schulz, K.H. Skrok, B. Volkmann, atomwirtschaft 36 (1991), 180

[15] D. Nebel (Herausgeber), 4. Kolloquium „Diagnose des Werkstoffzustands und Prognose des Bauteilverhaltens in Kernenergieanlagen, 21.-23.2.1990, Rossendorf, ZfK 697

Hansjürgen Matthies

Neurobiologische Grundlagen des Gedächtnisses und der geistigen Tätigkeit*

Einleitung

Die Fähigkeit zu lernen, die gewonnene individuelle Erfahrung gegebenenfalls lebenslang im Gedächtnis zu bewahren und jederzeit bedarfsweise wiederzuverwenden, wurde in der Phylogenese zunehmend zum evolutionsbestimmenden Faktor. Indem die in einer langen Entwicklung gewonnene konservative und anpassungsträge Erfahrung der Arten zunehmend auch die Fähigkeit zum Erwerb individueller Erfahrung herausbildete, konnte überhaupt erst der wachsenden Vielfalt und dem schnellen Wechsel der Umweltbedingungen entsprochen werden, und ebenso wurden erst dadurch größere Ortsveränderungen ermöglicht. Für den Menschen schließlich stellten Lernen und Gedächtnis eine Voraussetzung für die Herausbildung kognitiver Leistungen und differenzierter emotionaler Reaktionen dar, sowie vor allem für die Fähigkeit, ein inneres Modell der Außenwelt in Raum und Zeit zu bilden und die Zukunft aus der Vergangenheit vorauszusehen. Erst auf dieser Grundlage konnte sich auch ein Bewußtsein entwickeln: Weil wir uns erinnern, existieren wir als Individuen, das Gedächtnis ist eine Hauptquelle der individuellen Persönlichkeit.

Deshalb bildete die Aufklärung seiner Gesetzmäßigkeiten seit altersher ein Kernstück im Ringen um ein Selbstverständnis des Menschen, und nicht von ungefähr hieß in der griechischen Mythologie die Mutter der Musen Mnemosyne. Jedoch waren allen vorausgegangenen Bemühungen um ein tieferes Verständnis der Lernvorgänge und des Gedächtnisses bei dem vorhandenen naturwissenschaftlichen Kenntnisstand und dem verfügbaren methodischen Rüstzeug Grenzen gesetzt, so daß sie im wesentlichen auf die Differenzierung der äußeren Erscheinungsformen und die Gesetzmäßigkeiten ihrer Bildung und Erhaltung beschränkt blieben. Um aber zum Wesen dieser Fähigkeiten des Gehirns vordringen zu können, mußten erst wissenschaftliche und methodische Voraussetzungen heranreifen, wie sie mit der Molekularbiologie, der Elektronenmikroskopie, der Radiochemie, der Elektrophysiologie und der Rechentechnik bis zur Mitte dieses Jahrhunderts entstanden waren und die es ermöglichten, die molekularen Prozesse der

* Vortrag, gehalten in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 20.Oktober 1994

Lebensvorgänge zu erschließen, sowie.schnelle und komplexe Vorgänge zu messen und zu berechnen.

Ich hatte mich schon in den 50er Jahren auf Anregung meines Lehreres Fritz Jung neben meinen Arbeiten über rote Blutkörperchen mit Untersuchungen über pharmakologische Wirkungen auf das Nervensystem beschäftigt, aber diese Untersuchungen nicht sehr zielstrebig, sondern mehr als methodische Übungsarbeiten betrieben. Nach meiner Berufung an die Medizinische Akademie Magdeburg 1957 galt es aber, für das neue Institut und seine Mitarbeiter eigene Aufgaben zu entwickeln.Wir begannen zunächst mit Untersuchungen über zentral stimulierende und antidepressive Wirkstoffe. Als sich Ende der 60 er Jahre auf Initiative von Mitja Rapoport Bemühungen um eine Neuorientierung der biowissenschaftlich-medizinischen Grundlagenforschung in der DDR entwickelten, sahen auch wir uns veranlaßt, die eigene Arbeit in einem weiter gefaßten Rahmen neurowissenschaftlicher Forschung neu zu durchdenken. Daraus resultierte nach Analyse der internationalen Entwicklungstrends und vielfältigen Diskussionen unser Vorschlag für das Forschungsthema des Instituts, das unter Entwicklung einer interdisziplinären Arbeitsweise unsere weitere Arbeit bestimmte:

> Die Aufklärung neurobiologischer Mechanismen der Gedächtnisbildung als Grundlage für eine rationale arzneitherapeutische Beeinflussung ihrer Störungen und anderer altersabhängiger geistiger Leistungsminderungen.

Der anwendungsorientierende Zusatz bedeutete zugleich eine vorrangige Berücksichtigung der molekular-zellulären Grundprozesse als dem Wirkungsfeld pharmakologischer Einflußnahme, ohne jedoch die Auswirkungen in den anderen Ebenen biologischer Organisation zu vernachlässigen. Der Zusatz brachte aber auch zum Ausdruck, daß ein rein empirisches Herangehen im Sinne des klassischen Screening-Verfahrens für die Auffindung von Pharmaka zur Behandlung von Störungen der Lernfähigkeit und der Gedächtnisbildung als unzureichend angesehen wurden. Die Berechtigung, ja sogar eine Notwendigkeit für diese zweifellos langfristige Aufgabenstellung ergab sich aber nicht nur aus einem verständlichen Wissensdrang, sondern auch aus herangereiften allgemeinen und individuellen Bedürfnissen, die sowohl mit der Zunahme geistiger Anforderungen in allen Arbeitsbereichen, als auch mit der starken Erhöhung des älteren Bevölkerungsanteils entstanden und den Wunsch zum Ausdruck brachten, nicht nur die physische Gesundheit, sondern auch die geistigen Fähigkeiten zu fördern und bis in ein hohes Alter zu bewahren.

Die Entscheidung für diese Zielstellung war am Ende der 60er Jahre noch sehr risikoreich, die Realisierbarkeit der Aufgabe wurde vielfach bezweifelt, wenn man sie nicht nur belächelte. Auch schien für viele Zweifler die er-

kenntnisseitige Ausgangsposition nur sehr schwach zu sein. In Wirklichkeit hatten sich aber in den vorausgegangenen Jahrzehnten bereits umfangreiche Kenntnisse über den Aufbau und die Funktionen des Nervensystems angehäuft, auf denen aufgebaut werden konnte, und es gab international auch schon erste Ansätze in der Gedächtnisforschung, die an die neueren zell- und molekularbiologischen Erkenntnisse anknüpften. Ich möchte nun den seitdem erreichten Kenntnisstand darstellen, wobei ich neben den molekular-zellulären Grundprozessen auch die allgemeinen Aspekte der Funktion des Gehirns als Träger der geistigen Tätigkeit aus meiner Sicht berücksichtige. Im hier gegebenen Rahmen ist eine sicherlich auch subjektiv bedingte Auswahl von Daten und Teilproblemen und eine Vereinfachung komplexer Zusammenhänge kaum vermeidbar, ich werde versuchen,diesen Umstand durch einen hohen Abstraktionsgrad auszugleichen. Daß ich mich dabei dennoch auch auf Beiträge der Magdeburger Arbeitsgruppen beziehe, die in nahezu 25 Jahren mit über 500 Originalarbeiten, Übersichten und Handbuchartikeln dazu einen Beitrag leisteten, ist wohl verständlich.

Eine erste Annäherung an das Problem

Voranstellen möchte ich einige Bemerkungen über die Beziehungen zwischen dem Gedächtnis und den Funktionsprinzipien des Nervensystems und dabei auch einige begriffliche Fragen behandeln. Zunächst: Was verstehen wir unter Gedächtnis, was stellt es dar? In seinen Erscheinungsformen und ihrer Klassifizierung zeigt das Gedächtnis, zunächst auch in Abhängigkeit von der Betrachtungsweise, eine große Vielfalt (Tab.1) :So werden Gedächtnisformen unter anderem im Hinblick auf das beteiligte sensorische System oder auf semantische Aspekte der Information charakterisiert. Hinsichtlich der operativen Bedeutung wird zwischen deklarativem und prozeduralem Gedächtnis unterschieden, hinsichtlich der funktionellen Rolle zwischen Arbeitsgedächtnis und Referenzgedächtnis. Die letztgenannten Formen sind auch schon mit zeitlichen Vorstellungen verbunden, die bei der Unterscheidung nach dem Zeitverlauf der Bildung und Erhaltung und der Einteilung in Kurzzeit-, Intermediär-, und Langzeit-Gedächtnis bestimmend sind und damit Beziehungen zu zeitabhängigen Prozessen der materiellen Träger dieser informationellen Vorgänge erschließen. Im Hinblick auf diese zahlreichen unterschiedlichen Formen des Gedächtnisses erhebt sich natürlich sofort die Frage, inwieweit ihrer verwirrenden Vielfalt eine gleiche Mannigfaltigkeit der zugrunde liegenden molekularen und zellulären Mechanismen im Nervensystem entspricht, oder ob sie auf anderen Gestaltungselementen des Nervensystems, wie etwa auf verschiedenen Systemstrukturen beruht. Schon frühere psychologische Untersuchungen erkannten ja zeitabhängige Formen des Gedächtnisses als sogenanntes Kurzzeit- und

Langzeit-Gedächtnis, und es war auch schon bekannt, daß die retrograde Amnesie nach Hirntraumen vor allem einen Ausfall kurzzeitiger Gedächtnisformen repräsentiert. In späteren tierexperimentellen Arbeiten konnte zuerst McGAUGH (1966) die besondere Vulnerabilität des Kurzzeit-Gedächtnisses gegenüber pharmakologisch oder elektrisch ausgelösten Krämpfen nachweisen und die Zeitkonstanten seiner Bildung und Rückbildung näher bestimmen. Zur gleichen Zeit wurden, zweifellos unter dem Eindruck der frühen molekularbiologischen Erkenntnisse, die ersten, zunächst umstrittenen Ergebnisse über die Unterdrückung des Langzeit-Gedächtnisses durch Hemmstoffe der Proteinsynthese publiziert.

Abb. 1 Schematische Darstellung der Gedächtnisphasen

An diese Resultate knüpften wir seinerzeit mit unseren Überlegungen und eigenen Arbeiten an. Es gelang uns, in umfangreichen systematischen Untersuchungen an einer schmerzreizbedingten Hell-Dunkel-Diskriminierung der Ratte, nicht nur die Zeitkonstanten des Kurz- und des Lang-Zeit-Gedächtnisses genauer zu ermitteln, sondern auch die Existenz einer intermediären Gedächtnisform, sowie Unterschiede in ihrer experimentellen Beeinflußbarkeit festzustellen. Damit schafften wir uns zugleich eine Standardmethode für die meisten unserer weiteren Untersuchungen. (Abb.1)

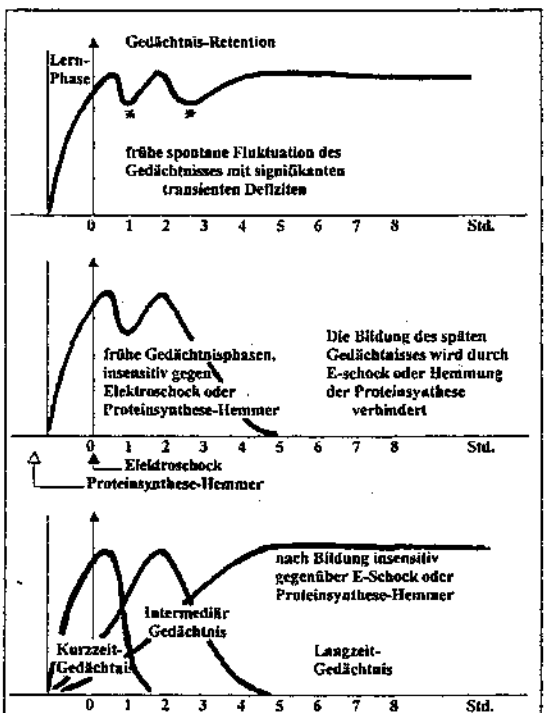


Abb.1. Schematische Darstellung der Gedächtnisphasen

Die Ergebnisse führten uns aber auch zu einer die weiteren Überlegungen bestimmenden Grundidee, daß nämlich die Zeitkonstanten der Bildung und Rückbildung der Formen und Phasen des Gedächtnisses, sowie ihre Beeinflußbarkeit durch physikalische oder chemi-

sche Interventionen die Eigenschaften ihrer jeweils bestimmenden molekularen und zellulären Mechanismen widerspiegeln. Unter Berücksichtigung international vorliegender Befunde und eigener Ergebnisse über die Verstärkung und Verlängerung des Langzeit-Gedächtnisses durch Nukleinsäure-Präkursoren, vor allem durch Orotsäure und Uridin-Nukleotide, entwikkelten wir aus dieser Grundidee ein Modell der aktivitätsabhängigen Regulation der Bildung zeitabhängiger Formen von Gedächtnisspuren. In seiner ersten Fassung wurde es bereits 1972 publiziert, es bildete in der Folge die Grundlage für unsere Forschungsstrategien und wurde durch die erzielten eigenen und internationalen Forschungsergebnisse ergänzt und wenn nötig auch korrigiert. Im Prinzip unterschieden wir:

1. eine kurzzeitige synaptische und ionogene Regulation der neuronalen Konnektivität als Grundlage des Kurzzeit-Gedächtnisses. Diese Regulation wird durch die Ionenflüsse induziert, die bei den primären synaptischen Erregungsvorgängen entstehen, und führt zu kurzzeitigen Funktionsänderungen von spannungs- und ligandengesteuerten Ionenkanälen und damit zu Änderungen der synaptischen Effizienz.

2. eine transient wirkende synaptosomale und metabolische Regulation der neuronalen Konnektivität als Grundlage eines Intermediär-Gedächtnisses. Sie sollte über die Aktivierung von ligandengesteuerten Rezeptoren induziert werden, welche die intraneuronale Konzentration von Messenger-Metaboliten regeln, die ihrerseits über verschiedene Reaktionsketten die Konformation und damit den Funktionszustand vorhandener synaptosomaler Proteine bestimmen. (Seinerzeit wurden gerade die Rolle von Proteinkinasen, die Bedeutung einer reversiblen Phosphorylierung von Proteinen für die Regulation ihrer spezifischen Funktion und das cAMP als second messenger erkannt).

3. eine mehr oder weniger dauerhaft verändernde nukleare und anabole Regulation der neuronalen Konnektivität als Grundlage des Langzeit-Gedächtnisses. Über ihre Induktionsweise war zum Zeitpunkt der Ausarbeitung unseres Modells noch wenig bekannt, jedoch waren in verschiedenen Laboratorien Befunde erhalten worden, welche auf die Abhängigkeit der Bildung des Langzeit-Gedächtnisses von einer de novo-Proteinsynthese hinwiesen.

Dieses Modell war also zur Zeit seiner Ausarbeitung teilweise noch recht spekulativ oder nur erst aus Ergebnissen abgeleitet, die noch nicht an neuronalen Geweben und Zellen erhoben worden waren. Zum nicht geringen Teil fehlten auch seinerzeit noch die konkreten Kenntnisse über wesentliche Zwischenglieder von Reaktionsketten, wie beispielsweise über die Aktivierung und Funktionsweise der einzelnen Proteinkinasen durch verschiedene

second messenger oder über die Subtypen einzelner Transmitter-Rezeptoren. Mit meiner folgenden kurzen Darstellung des erreichten Wissensstandes über neurobiologische Grundlagen des Gedächtnisses wird sich zugleich zeigen, inwieweit unser damaliges hypothetisches Modell mit konkreten Kenntnissen ausgefüllt und nahezu vollständig bestätigt wurde.

Wir gingen bei unseren Überlegungen und experimentellen Arbeiten nicht nur von einzelnen bereits vorliegenden konkreten Beobachtungen aus, sondern entschieden uns auch für einige allgemeine Grundvorstellungen, da sie, wie wir bald erkannten, für die Alternativen und die Gestaltung der Forschungsstrategien von Bedeutung sein konnten. Deshalb sei auf sie zunächst hingewiesen. So liegt auch den folgenden Darlegungen die Auffassung zugrunde, daß kognitive und mentale Vorgänge als informationelle Äußerungen des Nervensystems begriffen werden, die eine untrennbare Einheit mit dessen funktioneller Struktur im Gesamtverband des Organismus bilden, das heißt mit deren morphologisch-strukturellen, stofflich-chemischen und energetisch-physikalischen Aspekten. Dabei ist ihre Spezifik in den jeweiligen Organisationsebenen des Organismus, also der molekularen, der zellulären und der systemischen Ebene, sowie in der Ebene des umweltbezogenen Gesamtverhaltens zu beachten. Die Schwierigkeit einer Anwendung dieses Grundgedankens wird schon bei der Definition von Begriffen deutlich, die im Rahmen der zu behandelnden Problemstellung Verwendung finden. Das beginnt bereits mit den sehr häufig, aber auch sehr unterschiedlich verwendeten Begriffen Signal und Information. Ich möchte zur besseren Verständigung die hier von mir angenommenen Begriffsinhalte vorausschicken, ohne damit für sie Allgemeingültigkeit anzumelden.

Signal und Information: Als Signal wird hier der Zustand oder Prozeß eines materiellen Systems verstanden, der in der Lage ist, informationelle Koppelungen herzustellen. Physikalische oder chemische Einwirkungen als Signale aus der Umwelt oder aus dem Organismus selbst können zwar für einzelne Zellen bereits Informationen tragen, für das Nervensystem und den Organismus als Ganzen besitzen sie in der Regel nur Signalcharakter und erlangen erst im Prozeß der komplexen Signalverarbeitung und Bewertung durch dieses System die Qualität einer systembezogenen Information, die von seiner funktionellen Struktur getragen wird. Der Begriff Information wird also hier nicht im engeren nachrichtentechnischen Sinne verwendet.

Lernen und Gedächtnis: Lernen im weiteren Sinne stellt dann jede Form der Informationsbildung im Nervensystem dar, und zwar sowohl aufgrund von materiellen und informationellen Wechselwirkungen des organismischen Systems mit der Umwelt, als auch aufgrund von systeminternen informationellen Prozessen. Ähnlich wie beim Gedächtnis können auch verschiedene Formen des Lernens unterschieden werden, je nachdem ob beispielsweise

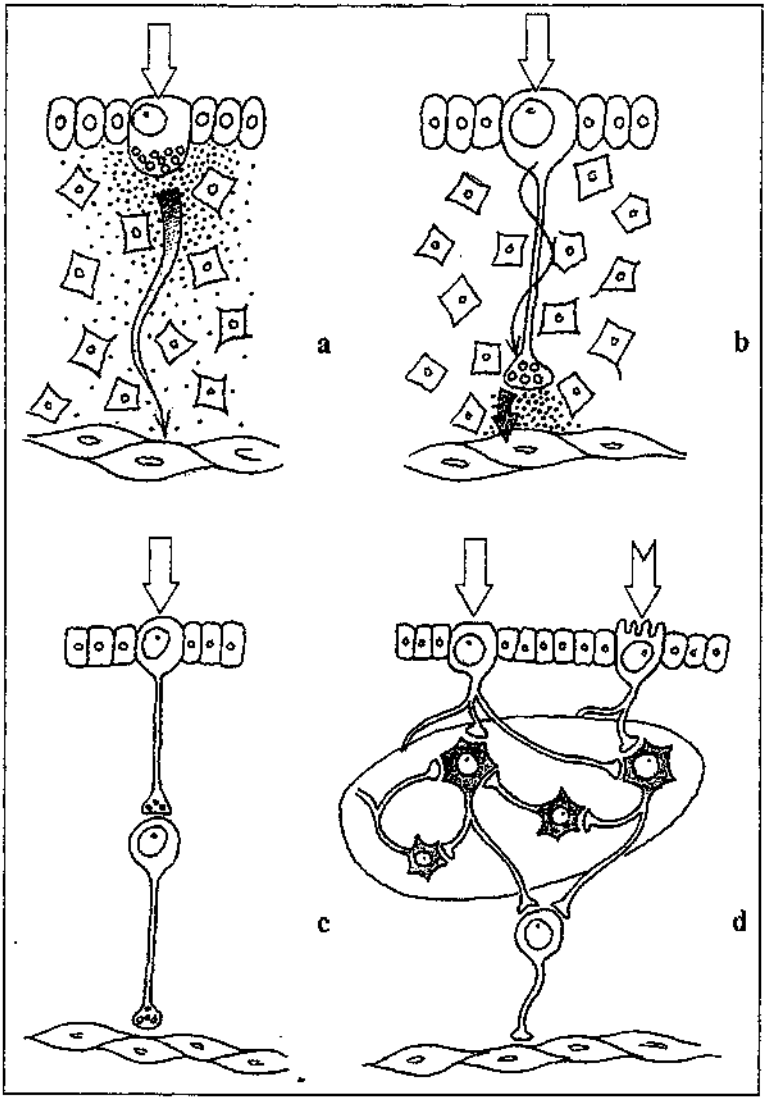
semantische oder operative Aspekte der Informationsbildung berücksichtigt werden. Gedächtnis wird schließlich als eine informationelle Erscheinung und als verhaltensphysiologisch-psychologische Kategorie angesehen - sowohl das Gedächtnis als Gesamtvorrat angeborener und erworbener Erfahrungen wie auch als Teilgedächtnis für einen konkreten Informationsinhalt.

Dem Gedächtnis als informationeller Begriff wird die *Gedächtnisspur* als neurobiologische Kategorie gegenübergestellt, die jeweils in der funktionellen Struktur des Nervensystems den materiellen Träger des Gedächtnisses oder einzelner Informationen bildet.

Funktionsprinzipien des Nervensystems

Eine Verständigung über die Natur der Gedächtnisspur muß also auf den Funktionsprinzipien des Nervensystems aufbauen. Dabei soll zunächst von einerer konnektionistischen Grundvorstellung ausgegangen werden, die inzwischen allgemeine Akzeptanz erfahren hat. Sie sieht die Nervenzelle als relativ selbstständiges Element des Nervensystems an, das über eine Vielzahl unterschiedlicher morphofunktioneller Verbindungen zu anderen Zellen des Nervensystems und des übrigen Organismus verfügt. Der Grundtyp des Neurons als spezialisierter Zelle der Signalverarbeitung entstand in der Phylogenese, als die im Vielzeller anfänglich vorherrschende Signalüberübermittlung mittels diffundierender oder transportierter chemischer Botenstoffe (Abb.2a) durch ein neues Prinzip ergänzt wurde: Die aufgrund der Einwirkung von chemischen oder physikalischen Signalen hervorgerufene Änderung des Membranpotentials von Zellen, die zur Freisetzung von interzellulären Botenstoffen führte, wurde zunächst an entstandenen zahlreichen langen Zellfortsätzen weitergeleitet (Abb.2b). Dabei blieb die Signalübertragung durch chemische Botenstoffe an den Endigungen dieser Zellfortsätze erhalten. Sie erfolgt aber nun auf kürzeste Distanz an den interzellulären Kontakten, den sogenannten Synapsen, zwischen den Zielzellen und den Nervenendigungen, indem letztere bei Eintreffen der fortgeleiteten Membrandepolarisierung einen neuronenspezifischen Botenstoff, den. Neurotransmitter, freisetzen. Damit kann die Signalübertragung kanalisiert, unidirektional gerichtet und selektiv erfolgen, und ihre Geschwindigkeit wird beträchtlich erhöht. Durch schnellen lokalisierten Abbau des Transmitters wird das Signal darüber hinaus zeitlich extrem begrenzt: Neben dem bis dahin überwiegend tonisch- modulatorischen Signalcharakter chemischer Botenstoffe trat damit im entstehenden Nervensystem ein schnell arbeitender instruktiver Signaltyp immer stärker in den Vordergrund, eine weitere wesentliche Voraussetzung für die Wahrnehmung und

Abb. 2 Evolution neuraler Funktionsprinzipien



Verarbeitung rasch wechselnder Signale aus der Umwelt und für die Bildung von Signalmustern. Vor allem aber trug die nahezu unbegrenzte Mannigfaltigkeit der morphologischen Strukturgestaltung von Nervenfortsätzen und die damit erzielbare Vielfalt der funktionellen Beziehungen der Nervenzellen, also ihrer Konnektivität, zu einer neuartigen Komplexität der

Systemstruktur bei und damit zu einer neuen Qualität der seriellen, aber vor allem auch der parallelen Signalverarbeitung . Einer offenbar zunächst erfolgenden Differenzierung von sensorischen und effektorischen Neuronen (Abb.2 c) folgte auf Grund der quantitativ nahezu unbegrenzten morphologischen Varianten der Konnektivität die Bildung eines mehrdimensionalen Systems von Zwischenneuronen zwischen den reizaufnehmenden sensorischen und den handlungsbestimmenden effektorischen Neuronen (Abb.2 d). Erst damit konnte ein sich schließlich relativ verselbstständigender zentraler Apparat der Signalverarbeitung und Informationsbildung in der Systemebene entstehen, wie er uns im Zentralnervensystem höher entwickelter Tiere entgegentritt. Die phylogenetische Weiterentwicklung seiner Komplexität erlaubte nicht nur die unmittelbare Vermittlung vielfältiger und komplexer Reiz-Antwort-Beziehungen, sondern ermöglichte auch mit zunehmender Vielschichtigkeit einen qualitativ völlig neuartigen Widerspiegelungsprozeß der wahrgenommenen Umwelt, der realisierbaren Handlungen des Organismus und deren wechselseitiger Beziehungen, sowie schließlich auch davon abgeleiteter abstrakter Zeichen, indem sie in Erregungsmustern von Nervennetzen als deren neuralen Entsprechungen repräsentiert werden.

Diese konnektionistische Grundvorstellung vom Nervensystem konnte viele Funktionen des Nervensystems befriedigend erklären und auch die Entwicklung weiterführender Fragestellungen ermöglichen. Jedoch legte sie zunächst eine relativ statische Struktur nahe, da von weitgehend unveränderlichen Eigenschaften ihrer neuronalen Elemente nach deren erfolgter Ausreifung und Differenzierung ausgegangen wurde. Das schien zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Systemfunktion auch sinnvoll, ja sogar notwendig zu sein, aber für das Verständnis der adaptiven Leistungen des Gehirns, von Lernvorgängen und der individuellen Gedächtnisbildung bot das Konzept in dieser Form noch keine ausreichende Grundlage. Zwar wurden verschiedene Hypothesen entwickelt, die diesem Mangel abhelfen sollten, ohne jedoch theoretisch oder experimentell befriedigen zu können.

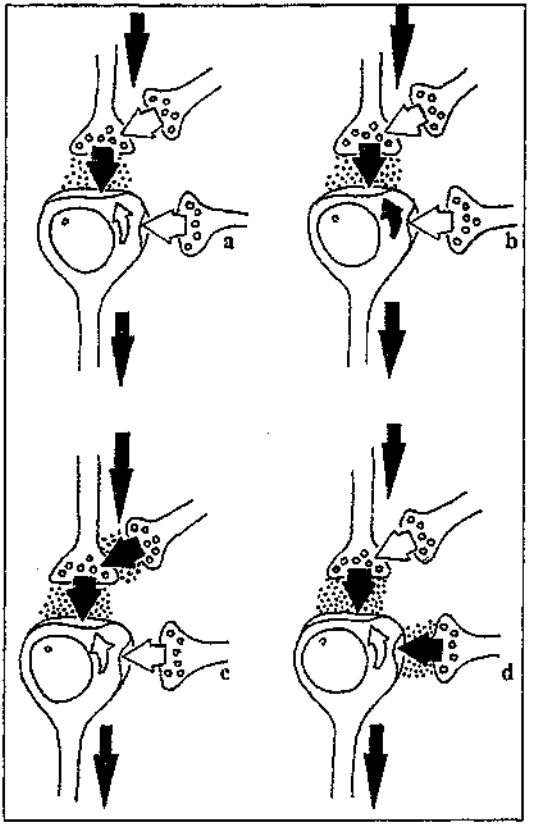
Auch wir versuchten eine Lösung dieses Problems durch einen eigenen gedanklichen Ansatz zu finden, indem wir die Beziehungen zwischen Systemstruktur und Systemverhalten aufgrund von systemtheoretischen Überlegungen betrachteten. Unter *Verhalten* sollen dabei nicht nur unmittelbar aktionsbestimmende Eingangs-Ausgangsbeziehungen des Nervensystems verstanden werden. Vielmehr sollen auch auch systeminterne informationelle, also mentale Prozesse einbezogen sein, die nicht in jedem Falle ohne weiteres objektiv erkennbar werden, da sie sich nicht unmittelbar, sondern gegebenenfalls erst als latent nachwirkender Prozess im Rahmen einer späteren Aktivierung von Ausgangsfunktionen umsetzen. Bestimmt wird nun

das Verhalten eines Systems in diesem weiteren Sinne durch die Zahl und Eigenschaften seiner Elemente, sowie durch die Zahl und Eigenschaften ihrer wechselseitigen Beziehungen untereinander und zum Gesamtsystem, eben durch seine funktionelle Struktur. Dann setzt aber eine Änderung des Verhaltens auch eine Änderung dieser funktionellen Struktur voraus.Umgekehrt führt jedoch nicht jede Änderung der funktionellen Struktur zwangsläufig zur Änderung des Verhaltens, denn ein bestimmtes Verhalten könnte auch durch unterschiedliche funktionelle Strukturen eines Systems realisiert werden. So gesehen sollten also Informationsbildung, Lernen, der Erwerb individueller Erfahrung, neuer Verhaltensregelungen und emotionaler Reaktionen im Gedächtnis mit mehr oder weniger dauerhaften aktivitätsinduzierten Änderungen von funktionellen Strukturen des signalverarbeitenden Nervensystems einhergehen. Auch die erwähnten, nicht sofort in Ausgangsfunktionen umgesetzten, aber nachwirkenden systeminternen mentalen Prozesse würden mit einer Änderung der funktionellen Struktur des Nervensystems, eben mit einer latenten Spur, verbunden sein. Wie aber werden solche Veränderungen der neuronalen Systemstruktur aufgrund der primären Wahrnehmungs- und Handlungsaktivität ausgelöst und vollzogen?

Die neuronale Plastizität

Im Hinblick darauf, daß die konnektionistische Grundvorstellung den interzellulären synaptischen Kontakten und der dort vor sich gehenden chemischen Signalübertragung eine Schlüsselrolle bei der Bildung der Erregungsbahnen in Nervennetzen zuweist, sind wohl auch in den funktionsabhängigen Veränderungen dieser synaptischen Verbindungen zunächst die wesentlichen Mechanismen für die Rekonstruktion neuronaler Netze bei einer Informationsbildung und - speicherung zu sehen. Das bedachte bereits RAMON Y CAJAL bei der Interpretation seiner morphologischen Studien, und ein ähnlicher Gedanke ist auch bereits in der Annahme PAWLOWs enthalten, daß sich bei bedingten Reflexen neue zeitweilige Verbindungen bilden. Viele Einzelbefunde und manche ihrer Interpretationen wiesen in der Folge zunehmend in diese Richtung und unterstützen damit zugleich die Auffassung, daß die funktionelle Struktur des Nervensystems keineswegs den Charakter eines fest "verdrahteten" Netzwerks besitzt. Sie zeigt vielmehr eine außergewöhnliche Dynamik ihrer Konnektivität, deren Regulation sich neben den Regulationsmechanismen zur Sicherung der Konstanz der Systemelemente entfaltet, was zunächst auch ihre Erkennung erschwerte und damit zu Verwechselungen und Irrtümern Veranlassung gab und noch gibt. Aber offensichtlich haben viele Nervenzellen eine besondere Potenz zur morphofunktionellen Differenzierung auch nach ihrer Ausreifung bewahrt, die möglicherweise mit dem weitgehenden Verlust ihrer Teilungsfähigkeit erkauft wird.

Abb. 3 Formen der Induktion einer synaptischen Plastizität



Diese Erkenntnis einer funktionsabhängigen Veränderlichkeit der Eigenschaften von Nervenzellen und damit ihrer wechselseitigen Beziehungen in den Nervennetzen fand ihren Niederschlag im Begriff der "neuronalen Plastizität", der von KONORSKI bereits 1948 präzisiert wurde. Er faßte darunter diejenigen Veränderungen der Eigenschaften von Nervenzellen zusammen, welche durch Mechanismen der primären neuronalen Erregung und der synaptischen Erregungsübertragung induziert werden können und.diese entweder zeitweilig oder permanent überdauern. Wenn auch, wie schon erwähnt, die neuronalen Synapsen wohl vorrangig als Funktionselemente einer plastischen Veränderung in Betracht zu ziehen sind, kann doch eine Plastizität der Impulsgenerierung oder von Schrittmacherfunktionen nicht ausgeschlossen werden, obwohl bisherige Kenntnisse nicht dafür sprechen. Im weiteren wird deshalb die synaptische Plastizität im Vordergrund stehen. Für deren genauere Betrachtung soll zunächst von den Bedingungen ihrer Entstehung ausgegangen werden. (Abb.3). Zugrunde liegt in jedem Falle eine chemische Erregungsübertragung zwischen einem präsynaptischen und einem postsynaptischen Neuron. Dabei wird ja durch präsynaptische Erregung (Membrandepolarisierung) ein Transmitter freigesetzt, der an der postsynaptischen Zelle über die Interaktion mit einem spezifischen Rezeptor transmembranale Ionenflüsse und damit eine Änderung des Membranpotentials hervorruft, die zunächst nur der primären

Signalverarbeitung zu dienen schien und häufig auch überwiegend in diesem Zusammenhang betrachtet wurde. Darüber hinaus werden aber - was man in seiner Bedeutung erst später richtig erkannte - intrazelluläre metabolische Folgereaktionen ausgelöst, worauf noch ausführlicher einzugehen ist. Zunächst kann bei der synaptischen Plastizität zwischen einer homosynaptischen und einer heterosynaptischen Induktion unterschieden werden. Eine homosynaptische Induktion der neuronalen Plastizität entsteht aufgrund der alleinigen Aktivität in einer Erregungsbahn (a und b), und zwar nichtassoziativ bei alleiniger präsynaptischer Aktivität, assoziativ bei zeitlich in bestimmter Weise gekoppelter prä- und postsynaptischer Erregung. Eine heterosynaptische Induktion entsteht in einer Erregungsbahn aufgrund der alleinigen oder kooperativen Aktivität einer konvergierenden anderen Bahn, und zwar entweder präsynaptisch (c), oder postsynaptisch (d).

Ein synaptischer Eingang kann nun entweder instruktiv oder modulatorisch sein, und er kann eine Erregung oder eine Hemmung bewirken. Die plastische Nachwirkung an einer erregenden Synapse äußert sich entweder als Fazilitierung bzw. Potenzierung oder als Depression der Erregungsübertragung, an einer hemmenden Synapse in einer Verstärkung oder Abschwächung der Hemmung. Die induzierten plastischen Veränderungen können entweder präsynaptisch oder postsynaptisch lokalisiert sein, sie können aber auch beide Teile der Synapse betreffen. Von besonderem Interesse im Hinblick auf Lernvorgänge sind die assoziativen synaptischen Signalverarbeitungen b und d als Formen der sogenannten HEBB'schen Synapse, unter Bezugnahme auf die durch HEBB 1949 entwickelten synaptischen Funktionsregeln zur Erklärung psychologischer Gesetzmäßigkeiten. Danach soll eine assoziative Verknüpfung nur aufgrund bestimmter zeitlicher Beziehungen zwischen der Aktivierung des präsynaptischen und des postsynaptischen Anteils einer Synapse entstehen. Für die Charakterisierung einer Form der neuronalen Plastizität ist neben der Lokalisation der Eigenschaftsänderung aber auch der Zeitverlauf ihrer Bildung und Rückbildung im Hinblick auf die schon erwähnte Zeitabhängigkeit von Gedächtnisformen von Bedeutung.

Experimentell waren zunächst nur relativ kurzzeitig nachwirkende neuronale Funktionsänderungen beobachtet worden. Sie reichten für das Verständnis des unterschiedlichen Zeitverlaufs von Gedächtnisformen, insbesondere eines dauerhaften Gedächtnisses, kaum aus, welches eine längere Beständigkeit der Änderungen der Konnektivität in einem neuronalen Netzwerk im Gefolge initialer neuronaler Signalverarbeitung erforderte. Erst die Entdeckung der posttetanischen Langzeitpotenzierung (LTP), auf die noch ausführlicher einzugehen ist, lieferte einen solchen Mechanismus für dauerhaftere Änderungen der Konnektivität. Obwohl die Idee der neuronalen Plastizität erst die notwendige Vervollständigung der konnektionistischen

Grundkonzeption lieferte, welche auch die adaptiven Leistungen des Nervensystems verständlich macht, setzte sie sich erst allmählich durch. Aber erst bei ihrer Berücksichtigung werden die Grundfunktionen des Nervensystems eigentlich verständlich (Tab.2). Da ist zunächst die Signalaufnahme, die Perzeption optischer, akustischer, taktiler und chemischer Reize aus der Umwelt und aus dem Organismus durch reizspezifische Sinneszellen unter Transformation der Reize in Membranpotentialänderungen.

Damit wird der bis dahin gültige Charakter der Reizspezifität aufgehoben, der durch die Natur des jeweiligen Signalträgers bestimmt wurde, ihre qualitativen und quantitativen Aspekte werden in den sensorischen Bahnen auf neue Art von der Spezifik der neuralen Struktur und ihrer Aktivität aufgenommen. Erst der Fortfall der Diversität und Unvergleichbarkeit der primären Signalträger und die Vereinheitlichung des Signalträgers in Form von Membranpotentialänderungen erlaubt bereits bei der Weiterleitung und Parallelverarbeitung der sensorischen Einzelsignale mit der Bildung von Signalmustern eine systemspezifische Signalverarbeitung. Schon bei der Modifikation, Integration und Selektion der Signale durch gegenseitige Beeinflussung und durch Rückwirkungen aus dem System werden Formen der kurzzeitigen Plastizität erforderlich, zugleich vollzieht sich ein qualitativer Bedeutungswandel der Signale. Er setzt sich fort, indem die entstehenden Signalmuster mit Signalen von systemeigenen Zuständen konvergieren und dabei, auch unter Reafferenz primärer Wahrnehmungs- und Handlungsergebnisse, eine zunehmende systemeigene Bewertung erfahren. Die Signale aus der Umwelt als Informationen für die einzelnen Zellen werden mit dieser systembezogenen Verarbeitung zu Informationen für den Organismus. Bei dieser primären Informationsbildung werden neben Mechanismen der kurzzeitigen neuronalen Plastizität sicherlich auch schon länger anhaltende plastische Funktionsänderungen wirksam. Der erreichbare Komplexitätsgrad der entstehenden Information ist dabei in hohem Maße von der Komplexität der funktionellen Struktur des jeweiligen Nervensystems und dem bereits vorhandenen Informationsvorrat abhängig.

Im Prozeß der systembezogenen Bewertung und in Abhängigkeit von ihrem Ergebnis können schließlich die beteiligten neuronalen Aktivitäten auch Mechanismen langzeitiger Plastizität auslösen und so mit der resultierenden Veränderung der Konnektivität als dauerhafte Gedächtnisspur im neuronalen Netzwerk integriert und bewahrt werden. Dabei kann es in Abhängigkeit von Interferenzen der entsprechenden neuralen Korrelate durch neugewonnene Information oder durch relevante Signalkomponenten zu Erweiterungen, Modifikationen oder Abschwächungen bereits vorhandener Informationsvorräte, sowie zu deren Aktivierung oder Abrufung kommen. Die induzierten molekularen Realisierungsmechanismen und zellulären Funk-

tionen, welche die Konnektivitätsänderungen bewirken, sind jedoch im einzelnen keinesfalls selbst schon als Gedächtnisspur oder gar als Gedächtnis anzusehen, wie es nur zu oft bei nachlässiger Sprach- und Denkweise erfolgt : Sie sind gewissermaßen nur molekular - zelluläre Instrumente der Nervenzellen bei der Gestaltung und Rekonstruktion der neuronalen Netzwerke und Systemstrukturen, deren funktionelle Aktivitätsmuster erst die eigentlichen neuralen Korrespondenten des Gedächtnisses darstellen.

Die Suche nach neuronalen Mechanismen der Gedächtnisspur.

Welche molekular-zellulären Realisierungsmechanismen bewirken nun die überdauernden Eigenschaftsänderungen der Neuronen im funktionellen Netzwerk, die der Informationsbildung und -speicherung zugrunde liegen sollen ? Unabhängig von den dargelegten Überlegungen zur neuronalen Plastizität wurden bereits unter verschiedenen anderen Aspekten experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um neuronale Mechanismen der Gedächtnisbildung aufzufinden und näher zu charakterisieren. Dabei waren aufgrund verschiedener methodischer oder konzeptioneller Mängel vorschnelle und ungerechtfertigte Verallgemeinerungen nicht selten.

Die Rolle der Neurotransmitter

Im Hinblick auf die Schlüsselfunktion der Synapsen im Nervensystem war es nur zu verständlich, daß mit der Aufklärung der Teilprozesse der chemischen Signalübertragung und der Entdeckung zahlreicher neuer Überträgerstoffe auch deren Rolle bei der Bildung einer Gedächtnisspur zeitweilig sehr im Vordergrund stand. Es gibt wohl keinen der inzwischen aufgefundenen Neurotransmitter, für den nicht eine Beteiligung an der Gedächtnisbildung nachgewiesen wurde, häufig wurde dann der entsprechende Transmitter sogar als allein entscheidend für die Gedächtnisbildung angesehen. Gegenüber diesen überaus zahlreichen Ergebnissen sind aber kritische Vorbehalte anzumelden, insbesondere wenn sie schon älteren Datums sind. Wir wissen heute, daß der Charakter einer chemischen Transmission nicht allein durch die Natur des Überträgerstoffs, sondern letztlich vor allem durch den jeweils aktivierten Rezeptor-Subtyp als Reaktionspartner bestimmt wird. Ferner sind an der Bildung einer Gedächtnisspur im allgemeinen mehrere Transmissionssysteme beteiligt, so daß nicht von einem einzigen, für die Gedächtnisbildung spezifischen Transmitter gesprochen werden kann. Das schließt nicht aus, daß bei Fortfall oder Verstärkung einer bestimmten Transmitterfunktion die Bildung, Bewahrung oder die Abrufung erheblich beeinflußt werden können. Die Aufklärung der Beteiligung einzelner Transmitter an Lern- und Gedächtnisprozessen ist also unverzichtbar, und die Transmitterforschung hat wesentliche Bausteine für die Ge-

dächtnisforschung geliefert, vor allem im Hinblick auf die Differenzierung und Aufklärung der molekularen Struktur der Rezeptor-Subtypen, sowie der unterschiedlichen Formen der transmembranalen Signalweiterleitung in das Innere des Neurons. Aber erst als die synaptische Transmission nicht nur hinsichtlich einer Auslösung von Ionenverschiebungen und Änderungen des Membranpotentials, also der Erregungsprozesse und primären Signalverarbeitung betrachtet wurde, sondern ebenso im Hinblick auf die Auslösung und Steuerung sehr komplexer intraneuronaler Stoffwechselvorgänge, die nicht unmittelbar mit der postsynaptischen Erregungsbildung im Zusammenhang stehen, konnte ein besseres Verständnis der Auslösung und Realisierung von plastischen Änderungen neuronaler Eigenschaften erreicht werden.

Der Untersuchung der Funktion von Transmittern sowie ihrer spezifischen Rezeptoren und Systeme der membranalen Signaltransduktion wird in diesem Zusammenhang auch deshalb Bedeutung beigemessen, da sie Ansätze für eine therapeutische Beeinflussung von Störungen der Gedächtnisleistungen liefern können. Allerdings darf dabei nicht übersehen werden, daß jeder äußere Eingriff in ein System der chemischen Signalübertragung schon zur noch schwer überschaubaren Veränderung der primären Signalverarbeitung führen kann, ehe eine eigentlich gewünschte Korrektur der induzierten plastischen Veränderungen erreicht wird. Deshalb muß die Suche nach einer therapeutischen Beeinflussung von Störungen der Gedächtnisleistung nicht nur auf die Transmittersysteme zielen, sondern vor allem auch die Mechanismen der plastischen Folgereaktionen ins Visier nehmen.

Die Rolle des Nukleinsäure- und Proteinstoffwechsels

Schon die frühen Erkenntnisse der Molekularbiologie bei der Aufklärung der genetischen Kodierung und der Regulation des anabolen Zellstoffwechsels beeinflußten die Gedächtnisforschung. Eine der Vorstellungen ging davon aus, daß ein Gedächtnisinhalt direkt in einer spezifischen Sequenz von neuronalen DNS-Nukleotiden und den von ihnen kodierten Polypeptiden gespeichert wird, daß also gewissermaßen umweltrelevante "Gedächtnismoleküle" gebildet werden. Solche Überlegungen lagen z.B. den Untersuchungen von UNGAR über die Bildung und interindividuelle Übertragbarkeit eines Dunkelfurcht-Peptids zu Grunde, sie wurden aber experimentell in Frage gestellt und schließlich auch theoretisch abgelehnt. Andere Ansätze zogen zwar auch die lernabhängige gesteigerte Bildung von Ribonukleinsäuren und Proteinen im Gehirn in Betracht, aber vielmehr als Ausdruck regulatorischer Stoffwechselvorgänge bei der Bildung einer Gedächtnisspur - woraus diese auch immer bestehen mochte. So stellte HYDEN mit biochemischen Mikromethoden Veränderungen der neuronalen Nukleinsäuren nach Lernvorgängen fest, und AGRANOFF,

BARONDES und FLEXNER konnten durch Proteinsynthese-Hemmung mittels bestimmter Antibiotika die Bildung oder Erhaltung eines erlernten Verhaltens verhindern.

Trotz anfänglicher, oft sehr massiver Zweifel , daß der Bildung zumindest des Langzeit-Gedächtnisses ein anaboler Stoffwechel zugrunde liegt, mehrten sich unter Erhöhung des experimentellen methodischen Niveaus die Befunde, welche diese Vorstellung unterstützten. Auch wir konnten in den Jahren 1970 bis 1974 in zahlreichen radiochemischen Versuchen mit unserem gut standardisierten Lernexperiment an der Ratte die Inkorporationssteigerung der radioaktiv markierten Präkursoren von Nukleinsäuren- und Proteinen im Anschluß an den Lernvorgang nachweisen. Darüber hinaus entdeckten wir in unseren Versuchen an Ratten, daß es in spezifischer Weise nach einem Lernvorgang, aber nicht nach einfacher elektrischer Stimulation von Nervenbahnen, zu einem verstärkten Einbau von Fucose während der neuronalen Glykoprotein-Synthese kommt.

Dieser Befund ist auch von allgemeinerer Bedeutung, weist er doch darauf hin, daß die einfache Steigerung der Erregungsübertragung in einer Nervenbahn nicht ohne weiteres zu einer dauerhafteren Spurenbildung führen muß, sondern daß dazu offenbar mehrere Einflüsse im Rahmen der systeminternen Bewertung und Signalverarbeitung zusammenwirken müssen. Diese Vorstellung wurde durch den Befund gestützt, daß der Fucose-Einbau durch den zumeist modulierenden Transmitter Dopamin induziert werden kann, über den sich unter anderem solche systeminternen Einflüsse realisieren. Natürlich ließen sich bei einzelnen Experimenten mit Hemmstoffen der Proteinsynthese oder mit markierten Präkursoren methodische Einwände erheben. Auch wurden mit dem Hinweis auf negative Befunde an methodisch weniger geeigneten Lernexperimente grundsätzliche Zweifel an der Notwendigkeit einer Proteinsynthese für die Gedächtnisbildung erhoben. Inzwischen ist aber eine de novo - Synthese von neuronalen Proteinen bei der Bildung der Langzeit-Gedächtnisspur aufgrund zahlreicher Befunde in verschiedenen Laboratorien kaum noch umstritten. Darüber hinaus zeigte sich auch, daß es dabei offensichtlich nicht nur zu einer quantitativen Steigerung der Proteinsynthese kommt, sondern daß auch eine qualitative Änderung der Genexpression in Erscheinung treten kann. Bis heute ist es aber noch nicht gelungen, die Natur der neugebildeten Proteine befriedigend aufzuklären. Auch die von uns entdeckte vermehrte Bildung von fucosehaltigen Glykoproteinen, die auf Veränderungen des Aufbaus der Nervenzellmembran und von synaptischen Verknüpfungen hinweist, hat diese Kenntnislücke noch nicht schließen helfen.

Die Rolle morphologischer Veränderungen

Schon längere Zeit vor der Verfügbarkeit diffizilerer biochemischer Methoden wurden makroskopische und mikroskopische Untersuchungen durchgeführt, um morphologische Veränderungen im Gehirn als Folge von Lernvorgängen festzustellen. Zumeist lag dabei die Annahme zu Grunde, daß eine Gedächtnisspur auf der Neubildung von Nervenfasern und synaptischen Verbindungen beruht. Doch erst mit der Elektronenmikroskopie konnte die Bildauflösung erreicht werden, die für morphometrische Analysen synaptischer Strukturen erforderlich ist. Aus diesen durchweg sehr aufwendigen Arbeiten geht zweifellos hervor, daß Veränderungen der Zahl und der Strukturmerkmale von Synapsen, sowie der Zahl und Anordnung der transmitterenthaltenden synaptischen Vesikel, vor allem im Kortex und Hippokampus, mit Lernvorgängen und der Gedächtnisbildung korrelieren können. Einige dieser morphologischen Veränderungen scheinen sich mit erstaunlicher Geschwindigkeit vollziehen zu können - ein Umstand, der aber auch Veranlassung zu methodischen Zweifeln gab. Denn viele dieser beobachteten strukturellen Änderungen setzen zweifellos anabole Stoffwechselleistungen voraus und würden zwar die schon erwähnten Steigerungen des Nukleinsäure- und Proteinstoffwechsels erklären können, aber andererseits eine stärkere Zeitabhängigkeit erfordern. Obwohl viele der von verschiedenen Untersuchern erhobenen morphologischen Befunde bei Lernexperimenten nicht zu bezweifeln sind, stellen auch sie aber nur Korrelate dar. Offen bleibt noch, ob ihnen eine, und wenn, welche funktionelle Bedeutung zuzuschreiben ist, oder ob sie nur morphologische Begleiterscheinungen anderer, funktionell entscheidenderer Veränderungen darstellen.

Elektrophysiologische Korrelate von Lernvorgängen

Auch mit Hilfe verschiedenster elektrophysiologischer Methoden wurde versucht, die neuronalen Mechanismen bei Lernvorgängen und der Gedächtnisbildung aufzuklären. Dabei ließen sich in Lernexperimenten sowohl Veränderungen von Summenpotentialen oder auch von Einzelzell- Aktivitäten feststellen, als auch die Beteiligung einzelner funktioneller Strukturen an der Bildung von Gedächtnisspuren genauer bestimmen. Einige Untersuchungen lieferten sehr wesentliche Kenntnisse, wie etwa die Aktivitäten von raumorientierten Neuronen im Hippocampus, einer phylogenetisch alten Hirnrindenstruktur mit Schlüsselfunktion für das Gedächtnis, der aufgrund dieser Befunde auch die Repräsentation einer Raumkarte zugesprochen wird, oder den Nachweis von Oszillationen der neuronalen Aktivität bei kognitiven Prozessen. Aber auch viele dieser lernrelevanten elektrophysiologischen Veränderungen stellten zunächst lediglich Korrelate dar, sie verhalfen nicht so sehr zu einem umfassenderen Verständnis der zellulären Mechanismen der Gedächtnisbildung, sondern könnten eher Beiträge zur

Aufklärung von Systemfunktionen liefern. Konnektivitätsänderungen wurden nur in begrenztem Umfang ermittelt, ihre kausalen Beziehungen waren methodisch schwer zu sichern und ihre Interpretation blieb häufig umstritten.

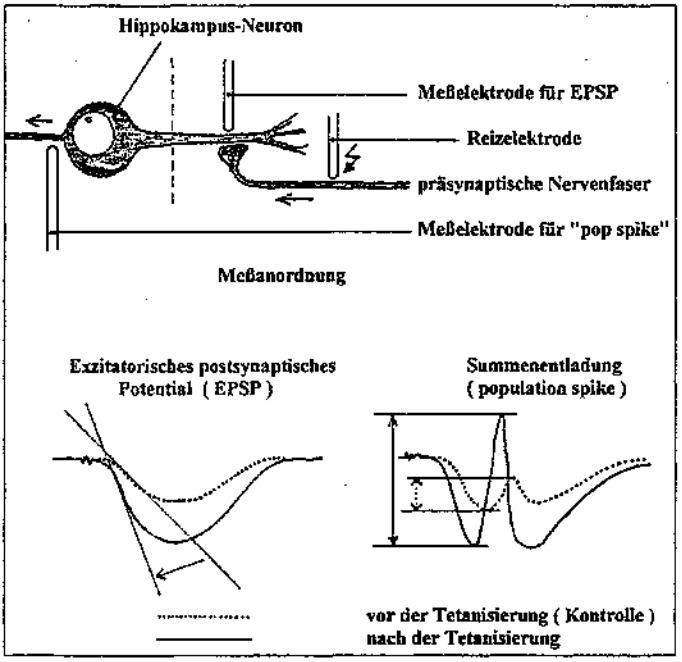
Die posttetanische synaptische Langzeitpotenzierung (LTP) - eine aktivitätsabhängige Änderung der Konnektivität

Dem Bedürfnis nach einem einfacheren experimentellen Modell der Gedächtnisbildung, an dem dauerhaftere Änderungen der synaptischen Effizienz als Hauptelement der neuronalen Konnektivität hervorgerufen und quantitativ gemessen werden können, um sie direkt zu morphologischen, elektrophysiologischen und biochemischen Korrelaten in Beziehung zu setzen, kam die Entdeckung der posttetanischen Langzeit-Potenzierung (long-term potentiation, LTP) durch BLISS und Mitarbeiter 1973 entgegen. Wie schon erwähnt, kannte man zunächst zwar Formen kurz dauernder aktivitätsbedingter Änderungen der synaptischen Erregungsübertragung, als Mechanismen einer dauerhafteren Gedächtnisspur kamen sie aber kaum in Betracht. BLISS fand nun, daß eine hochfrequente Reizung, also eine Tetanisierung von präsynaptischen Eingängen von Neuronen des bereits erwähnten Hippokampus zur starken Potenzierung der nachfolgenden Erregungsübertragungen an den gleichen Synapsen führt (Abb.4). Der Befund hatte deshalb besondere Bedeutung, weil diese Verstärkung der Konnektivität in vivo mehrere Tage oder sogar Wochen bestehen bleiben konnte, die mögliche Dauer ist aus methodischen Gründen immer noch nicht genau festgestellt worden.

Diese Entdeckung legte sogleich die Vermutung nahe, daß die LTP einen Mechanismus des Langzeit-Gedächtnisses darstellen könnte, so daß sie seitdem in vielen Laboratorien eingehend untersucht wurde. Dabei richtete sich die Aufmerksamkeit aufgrund vorwiegend elektrophysiologischer Betrachtungsweise vor allem auf die ausgelösten Änderungen der Erregungsvorgänge. Wir erweiterten diese enge Sicht, indem wir unseren Vorstellungen entsprechend die Beteiligung metabolischer Vorgänge in den betroffenen Neuronen in Betracht zogen und konnten in der Tat zeigen, daß in Analogie zur Beeinflussung des Langzeit-Gedächtnisses auch die LTP durch Proteinsynthese-Hemmer beeinträchtigt wird. Dabei wird zwar die Induktion der LTP nicht verhindert,- ebenso, wie der Lernvorgang unbeeinflußt bleibt,- aber ihre Dauer wird auf 4-6 Stunden begrenzt. Nun lassen sich gegen Ergebnisse, die mit Hemmstoffen erzielt werden, im Hinblick auf etwaige nichtspezifische Nebenwirkungen leicht Einwände erheben. Die gleiche Verkürzung der Langzeitpotenzierung der EPSP auf 4-5 Stunden, wie durch Proteinsynthesehemmer, war aber auch am Hippokampusschnitt

in vitro zu erzielen, wenn wir die Nervenzellkörper als Ort der Proteinsynthese vom synapsentragenden dendritischen Teil des Neurons als Realisierungsort der Potenzierung mikrochirurgisch abtrennten (Abb.4 , gestrichelte Linie). Außerdem konnten wir, wie das Langzeit-Gedächtnis im Lernexperiment, auch die späte LTP durch Vorbehandlung mit einem Uridinnukleotid-Präkursor wesentlich verstärken und verlängern und damit die Auffassung unterstützen, daß die Ausbildung einer dauerhafteren LTP von einer Aktivierung anaboler Stoffwechselprozesse abhängig ist.

Abb. 4 Posttetanische synaptische Langzeitpotenzierung (LPT)



Diese Ergebnisse führten uns zur Hypothese, daß die LTP , eben in Analogie zu den zeitabhängigen Formen des Gedächtnisses, gleichfalls mehrere überlappende zeitabhängige Phasen aufweist, die von unterschiedlichen molekular-zellulären Mechanismen bestimmt werden. Damit standen wir im Gegensatz zu der damals verbreiteten Auffassung, welche die LTP zunächst als einen einheitlichen, auf Membranvorgänge beschränkten Prozeß ansah. In dem Maße, in dem durch die Bemühungen zahlreicher Laboratorien die weitere Aufklärung der Funktionselemente der LTP erfolgte, an der wir uns gleichfalls beteiligen konnten, setzte sich auch die Auffassung durch, daß die LTP unterschiedliche Funktionskomponenten aufweist. Gegenwärtig

ergibt sich dabei folgendes etwas vereinfachtes Bild (Abb.5) : Die normale exzitatorische synaptische Transmission an vielen Nervenzellen des Gehirns durch den Transmitter Glutamat wird durch den sogenannten AMPA-Rezeptor vermittelt. Dessen Aktivierung öffnet seinen Natriumkanal, das einströmende Natrium depolarisiert die postsynaptische Membran, ruft das sogenannte exzitatorische postsynaptische Potential (EPSP) hervor und erzeugt gegebenenfalls damit eine Zellentladung, ein Aktionspotential (AP). Neben diesem Rezeptor liegen aber noch mindestens zwei andere Glutamat-Rezeptoren vor:

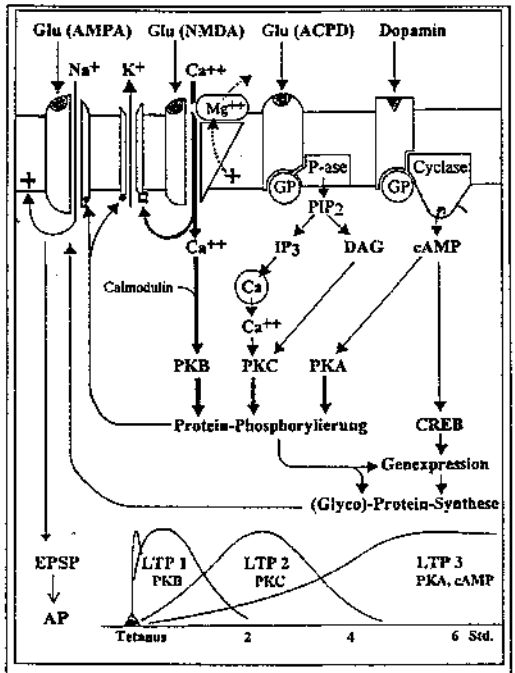


Abb. 5 Molekulare Komponenten der LTP

1. Ein sogenannter metabotroper ACPD-Rezeptor, dessen Aktivierung die Spaltung eines Membranlipids (Phosphoinositoldiphosphat, PIP_2) veranlaßt. Die freigesetzten Spaltprodukte Inositoltriphosphat (IP_3) und Diacylglycerol (DAG) aktivieren die Proteinkinase C , sodaß es über Proteinphosphorylierungen zu metabolischen Umsteuerungen kommt.

2. Ein sogenannter NMDA-Rezeptor, der erst nach Tetanisierung, also nach starker repetitiver präsynaptischer Glutamat-Freisetzung aktiviert wird. Aber sein Ionenkanal öffnet sich nur, wenn dessen Blockade durch Magnesiumionen infolge einer gleichzeitigen Membrandepolarisierung aufgehoben wird. Dann erst strömt massiv Calcium in das Neuron und aktiviert unter anderem über das calciumbindende Protein Calmodulin die Proteinkinase B (Cam-Kinase II), die für die Phosphorylierung weiterer Proteine verantwortlich ist. Dieser NMDA-Rezeptor ist für die Induktion der LTP unabdingbar, die Blockade mit spezifischen Liganden verhindert die Induktion der LTP, eine bereits ausgelöste Potenzierung wird aber nicht mehr beeinflußt.

Neben diesen postsynaptischen Mechanismen, die eine Potenzierung der glutamatergen Transmission bewirken, trägt auch noch eine anfängliche Verstärkung der präsynaptischen Glutamat-Freisetzung zumindest zum Zustandekommen der frühen LTP bei. Ähnliche präsynaptische Formen der neuronalen Plastizität wurden auch schon bei Mollusken beobachtet und zum Beispiel von KANDEL ausführlich untersucht, wobei der Überträgerstoff Serotonin eine wichtige Rolle spielt. In jedem Fall steuert aber bei der LTP der Überträgerstoff Glutamat über seine postsynaptischen Rezeptoren unterschiedliche Stoffwechselsysteme, es blieb zu klären, in welcher Weise diese jeweils an der anhaltenden synaptischen Funktionsänderung bei der LTP beteiligt sind. Durch Einwirkung relativ spezifischer Rezeptor-Blocker und Proteinkinase-Hemmstoffe während der Tetanisierung konnten wir in der Tat an Hippokampus-Schnitten in vitro ihre Wirkungsweise differenzieren (Abb.6):

1. Die Hemmung der Proteinkinase B durch Blockade des Calmodulins (6A) verhindert die Induktion als erste Phase der LTP ebenso, wie die Blockade des NMDA-Rezeptors (6D),

2. die Hemmung der Proteinkinase C (6B)verhindert zwar nicht die Induktion, aber die LTP dauerte wie nach Hemmung des metabotropen ACPD-Rezeptors (6E) nur 2-3 Stunden, offensichtlich wird eine zweite Phase blockiert.

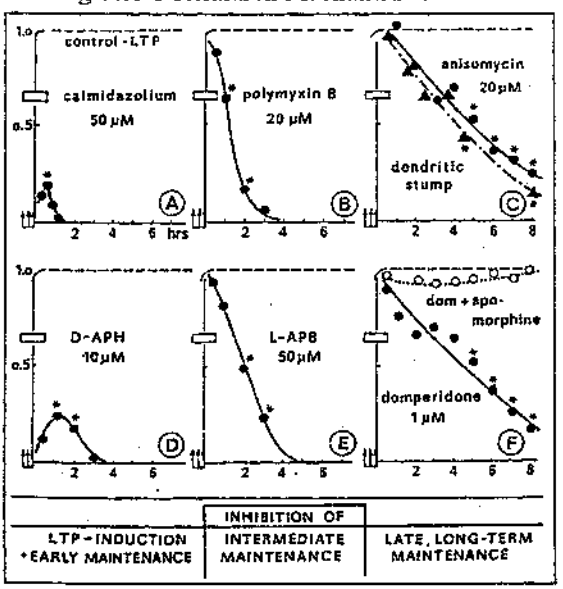
3. Nach Hemmung der Proteinsynthese durch Anisomycin oder nach Trennung der Synapsen vom Zellkörper (6C) blieb die LTP, wie schon erwähnt, 4-6 Stunden erhalten. Die erste Proteinkinase B-abhängige und die zweite Proteinkinase C-abhängige Phase der LTP blieben also unbeeinflußt, aber die dauerhafteste Phase wurde unterdrückt.

Wodurch wurde aber diese für die Langzeit-LTP offenbar entscheidende Proteinsynthese induziert? Die von uns gefundene dopaminabhängige Fucosylierung von Glykoproteinen bei der Bildung einer dauerhaften Gedächtnisspur veranlaßte uns, die Rolle des Dopamins auch bei der LTP zu untersuchen. Dopamin vermag ja über die Aktivierung seiner Rezeptor-Subtypen die Synthese des second messengers cAMP durch Adenylatcyclase entweder zu hemmen oder zu aktivieren und so in Abhängigkeit von freigesetzter Dopaminmenge und Rezeptorausstattung der Zelle die cAMP-Konzentration zu regulieren. Wie sich zeigte, wird durch Blockade der Dopamin-Rezeptoren während der Tetanisierung die späte Phase der LTP ebenso verhindert, wie durch Hemmstoffe der Proteinsynthese (Abb.6F). Offenbar wird also durch cAMP die proteinsyntheseabhängige Phase der LTP induziert. Tatsächlich ließ sich sowohl durch Hemmstoffe der Proteinkinase A wie auch durch blockierende unwirksame cAMP-Analoga die

späte LTP unterdrücken. Das cAMP aktiviert aber nicht nur die Proteinkinase A und damit die Phosphorylierung bestimmter Proteine, es kann auch über einen Transkriptionsfaktor die Genexpression und die de novo-Synthese von Proteinen unmittelbarer beeinflussen.Dafür spricht auch die von uns sowohl im Lernexperiment, als auch am LTP-Modell nachgewiesene Aktivierung von sogenannten frühen Genen, welche eine Umsteuerung der Genom-Ablesung bewirken. Vor allem bekräftigen jüngste Befunde an Mäusen mit einer defizitären Mutation des cAMP-relevanten Transkriptionsfaktors CREB diese Annahme, denn diese Tiere können kein Langzeitgedächtnis bilden und weisen auch keine dauerhafte LTP auf (Bourtchuladze, 1994).

Abb. 6 Differenzierung der LTP-Phasen durch spezifische Beeinflussung einzelner molekularer Komponenten

So zeigen sich also am LTP-Modell unter direkter Messung der neuronalen Konnektivität unterschiedliche zeitabhängige Komponenten synaptischer Funktionsänderungen in Analogie zu den zeitabhängigen Gedächtnisformen, wobei ihre Induktion über unterschiedliche Rezeptoren, second messenger und Proteinkinasen vermittelt wird. Diese Realisierungsketten sind dabei nicht streng voneinander getrennt, sondern zeigen vor allem auf der Stufe der second messenger vielfältige Wechselwirkungen. Wie ist die Bedeutung dieser zellulären Mechanismen im Hinblick auf die Signalverarbeitung in der funktionellen Struktur des Nervensystems zu bewerten? Offenbar erfordert eine dauerhaftere Änderung der Konnektivität zwecks Speicherung einer konkreten Information deren systemeigene Gewichtung durch den Beitrag von solchen informationellen Faktoren, wie Motivation und Emotion, sowie von Reafferenzen der Handlungsergebnisse. Sie werden, wie wir wissen, zumeist durch entspre-

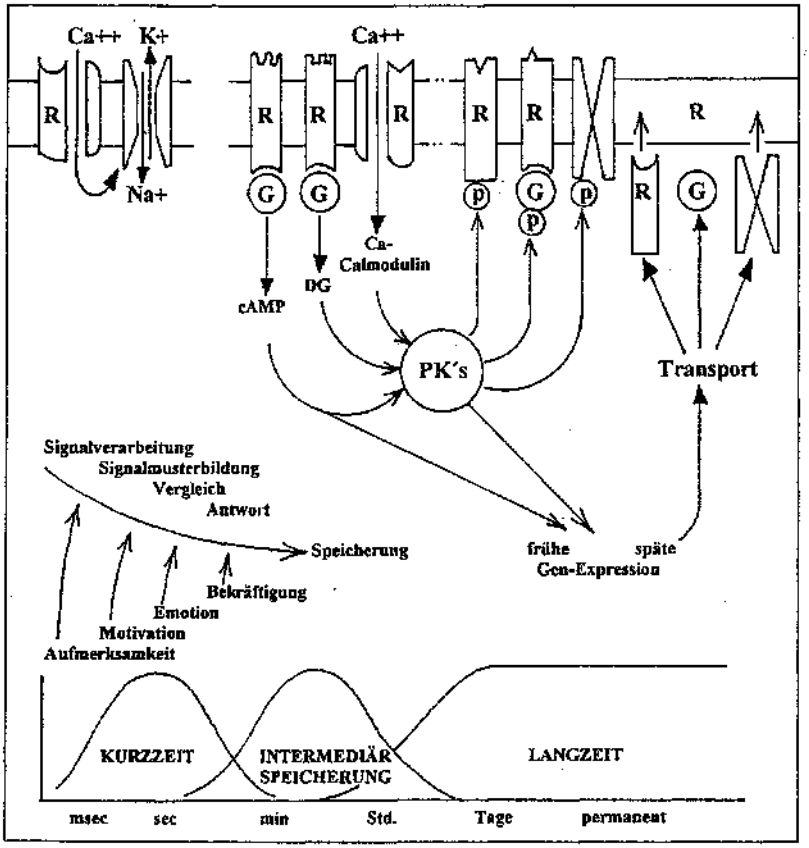


chende tonisierend-modulatorische Transmitter, wie beispielsweise durch Serotonin oder Noradrenalin, aber auch vielfach durch Dopamin vermittelt.

Wir erkennen also auch am Beispiel der LTP das von mir 1989 formulierte Prinzip der "subzellulären Integration extrazellulärer Signalkonvergenz", das gewissermaßen einen Knotenpunkt, einen qualitativen Übergang zwischen der molekular-zellulären Ebene und der System-Ebene bei der Informationsbildung und -speicherung darstellt. Nicht unerwähnt soll bleiben, daß sich an sehr unterschiedlichen Objekten, wie etwa an Mollusken oder an Drosophila-Mutanten, aber auch bei Untersuchungen an einer sehr spezifischen Form neuronaler Informationsspeicherung, der Prägung von Küken nach dem Schlüpfen, Ergebnisse erzielen ließen, die sich in diese Darstellung trotz mancher Besonderheiten grundsätzlich einordnen lassen. Andererseits muß aber auch betont werden, daß die in diesem Rahmen beispielhaft dargestellte LTP sicherlich nicht die einzige Form einer neuronalen Plastizität als Grundlage einer Gedächtnisspur bildet. So kann unter bestimmten Bedingungen, offenbar bei geringerem Calcium-Einstrom, auch eine glutamaterge Langzeit-Depression (LTD) entstehen und unter Umständen zur Umgestaltung der funktionellen Struktur von Nervennetzen beitragen. Darüber hinaus sind auch synaptische Langzeit-Potenzierungen bekannt geworden, die unabhängig von NMDA-Rezeptoren entstehen können.

Abschließend möchte ich aber noch einmal auf unser erstes Modell der funktionsabhängigen Regulation der neuronalen Konnektivität zurückkommen und mit einigen Verallgemeinerungen und Schlußfolgerungen verbinden. Zunächst ist festzustellen, daß unsere seinerzeit wegen des noch geringen Stellenwerts der Gedächtnisforschung wenig beachtete oder sehr bezweifelte Modellhypothese durch den weiteren Kenntnisgewinn in ihren Grundzügen bestätigt wurde. Die Existenz verschiedener Phasen der Informationsspeicherung im Nervensystem auf der Grundlage unterschiedlicher molekular-zellulärer Mechanismen wird heute in der einen oder anderen Form theoretisch akzeptiert, sie wird darüber hinaus durch zahlreiche experimentelle Befunde im Sinne unserer damaligen Vorstellungen bestätigt und erweitert. In der Verallgemeinerung der vielen vorliegenden Daten lassen sich die drei Grundtypen der molekular-zellulären Regulation der synaptischen Konnektivität abstrahieren, wobei ihre konkrete Realisierung art- und strukturspezifisch durchaus mittels unterschiedlicher molekularer Elemente erfolgen kann (Abb.7).

Abb. 7. Verallgemeinerte Darstellung der drei molekularen Grundmechanismen der neuronalen Plastizität



Das betrifft die Annahme einer überwiegend *ionogenen Regulation* der Konnektivität unter kurzzeitiger Umsteuerung spannungs- und ligandenabhängiger Ionenkanäle als Grundlage der Formen des Kurzzeit-Gedächtnisses im Rahmen primärer Signalverarbeitung oder transienter operativer Speicherung.

Es betrifft ebenso unsere zunächst bezweifelten Vorstellungen über eine *metabolische Regulation* intermediärer Änderungen der Konnektivität im Rahmen einer primären, aber vorläufigen Informationsbildung. Sie beruht vor allem auf der Aktivierung metabotroper Rezeptoren, der Bildung von messenger-Metaboliten, der Aktivierung von Proteinkinasen und schließlich

der zeitweilig funktionsändernden Phosphorylierung von Proteinen, die an der Regulation der neuronalen Erregungsvorgänge beteiligt sind.

Das gilt letztendlich auch für die Annahme einer *nuklearen oder anabolen Regulation* der Konnektivität für die Bildung von Formen eines Langzeit-Gedächtnisses, welche über eine aktivitätsbedingte Umsteuerung der neuronalen Genexpression und eine de novo-Synthese von Zellproteinen erfolgt. Sie erfordert im Unterschied zu den kurzzeitigeren Erscheinungen der neuronalen Plastizität ein komplexeres Zusammenspiel verschiedener informationeller Flüsse und ihrer materiellen Träger, welche die räumlichen, zeitlichen und kausalen Beziehungen von Signalmustern aus der Umwelt, sowie die Systembereitschaft, den Informationsvergleich und systemrelevante Bewertungen repräsentieren.

Mit der Bestätigung und Vervollkommnung unseres Modells der molekular-zellulären aktivitätsabhängigen Regulation der neuronalen Konnektivität im Rahmen der Gedächtnisbildung erfolgt also auch nolens volens eine Unterstützung unserer damit verbundenen allgemeineren Vorstellungen von der Arbeitsweise des Nervensystems und den neurobiologischen Grundlagen kognitiver und mentaler Vorgänge, die hier nur skizziert werden konnten. Dabei ist nachdrücklich darauf hinzuweisen, daß die Aufklärung der molekularen und zellulären Mechanismen, welche die Bildung von zeitweiligen und dauerhaften Gedächtnisspuren verständlich machen, zwar eine bedeutende und notwendige Vervollständigung der Gedächtnisforschung darstellt und neue Wege zur gezielten Beeinflussung von gestörten Lern- und Gedächtnisleistungen eröffnen mag, aber keineswegs allein schon das Gedächtnis als infomationelle Erscheinung erklärt. Dazu ist ohne Zweifel in breiter interdisziplinärer Bemühung ein noch umfassenderes und qualitativ neuartiges Verständnis der Bau- und Funktionsprinzipien der funktionellen Strukturen des Nervensystems in Verbindung mit ihren informationellen Leistungen zu erreichen - eine große wissenschaftliche Herausforderung, auf die sich die Forschung aber bereits orientiert hat.

Literatur

Agranoff.B.W.,Davis.R.E.,Brink.J.J. (1965) Memory fixation in goldfish. Proc.Natl.Acad.Sci.USA , 54 , 788 - 793

Barondes,S.M.,Cohen,H.D. (1967) Comparative effects of cycloheximide and puromycin on cerebral protein synthesis and consolidation of memory in mice. Brain Res.4 , 44 - 51

Bliss,T.V.P.,Lomo,T. (1973) Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforeant path. J.Physiol. , 232 , 331 - 356

Flexner,J.B.,Flexner,L.B.,Stellar,E. (1963) Memory in mice as affected by intracerebral puromycin. Science 141 , 51 - 59.

Hebb,D.O. (1949) The organization of behavior : a neurophysiological theory. Wiley , New York

Kandel,E.R.,Klein,M.,Castellucci,V.F.,Schacher,S.,Godet,P. (1986) Some pinciples emerging from the study of short- and long-term memory. Neurosci.Res. 3 , 498-520.

Konorski,J. (1948) Conditioned reflexes and neuron organization. Cambridge , University Press

Matthies,H. (1974) The biochemical basis of learning and memory. Life Sciences , 15 , 2017 - 2031

Matthies,H. (1989) In search of cellular mechanisms of memory. Progr.Neurobiol. , 32 , 277 - 349

Matthies,H. (1989) Neurobiological aspects of learning and memory. , Ann.Rev.Psychol. 40 , 381 - 404

Pawlow,I.P. (1927) Conditioned reflexes. Oxford , University Press.

Rose,S.P.R. (1991) How chicks make memories. The cellular cascade from c-fos to dendritic remodelling. Trends in Neuroscience 390-397

Thompson,R.F. (1986) The neurobiology of learning and memory. Science , 233 , 941 - 947

Tab. 1 Verschiedene Erscheinungsformen des Gedächtnisses

Gedächtnisformen

nach beteiligtem sensorischen System :

akustisch, visuell, taktil, chemisch (Geruch,Geschmack)

nach semantischen Aspekten :

Wort-, Zahlen-, Raum-, Farben-, Formen-, Personen-Gedächtnis. u.a.

nach dem Zeitverlauf der Bildung und Erhaltung :

Kurzzeit-, Intermediär-, Langzeit-, Permanent-Gedächtnis.

nach der funktionellen Rolle :

Arbeits-Gedächtnis (working memory)
Speicher-Gedächtnis (reference memory)

nach der operativen Bedeutung :

procedurales Gedächtnis: für Handlungsprogramme und -strategien, (inkrementelle Bildung)
deklaratives Gedächtnis: für Räume, Ereignisse, Fakten und deren Zusammenhänge (sprunghafte Bildung)

weitere Klassifikationen :

dispositionelles versus representationelles Gedächtnis
episodisches versus semantisches Gedächtnis

Tab. 2 Neurale Funktionsprinzipien bei der Informationsbildung und Informationsspeicherung

Funktionsprinzipien des Nervensystems

Spezifische Signalträger

akustisch optisch mechanisch chemisch

V

spezifische Rezeptorzellen

V

Vereinheitlichung der Signalträger : Membranpotential-Änderungen

V

komplexe systemspezifische Signalverarbeitung

transiente Formen der neuronalen Plastizität
Bildung von Signalmustern

V

Systemrelevanter Vergleich, Reafferenz und Bewertung

transiente oder dauerhafte Formen
der neuronalen Plastizität

V

Zeitweilige oder dauerhafte Änderung der funktionellen Systemstruktur

V

Systemspezifische Informationsbildung und Informationsspeicherung

Dietrich Spänkuch

Die Strahlungseigenschaften der Erdatmosphäre[1]

I. Einleitung

Die Strahlungseigenschaften von Planeten spielen eine Schlüsselrolle für das Klimageschehen, das sich auf ihnen abspielt. Änderungen der Strahlungseigenschaften der Erdatmosphäre, aus welchen Gründen auch immer, haben daher eine große Bedeutung für das Leben auf der Erde. Diese Bedeutung wird reflektiert in den zahllosen Abhandlungen und Diskussionen zum Treibhauseffekt, exakter definiert: zu Änderungen des Treibhauseffekts der Erdatmosphäre und deren Folgen, die auch in den Vorträgen unserer Sozietät im Rahmen des Vortragszyklus zum Globalen Wandel (siehe insbesondere die Beiträge von Lanius (1994) sowie Bernhardt und Böhme (1994)) ihren Niederschlag fanden. Dieser Beitrag diskutiert Variationen des Strahlungshaushalts der Erdatmosphäre im Lichte der neuesten Satellitenmessungen. Die Diskussion dieser Ergebnisse wird erleichtert, wenn man sie mit den Strahlungsverhältnissen auf unseren Nachbarplaneten und mit Abschätzungen der Wirkungen einzelner Faktoren in der Erdatmosphäre in Vergangenheit und Gegenwart vergleicht.

II. Vergleich der Strahlungsbilanzen der terrestrischen Planeten

Das Strahlungsangebot an solarer Strahlung am Oberrand der Planetenatmosphäre wird durch astronomische Faktoren bestimmt. Entscheidend ist vor allem die jeweilige Entfernung zur Sonne. Die sonnennahe Venus empfängt 1,9 mehr, der sonnenfernere Mars nur 0,44 mal soviel Sonnenenergie wie die Erde mit ihren 342 Wm^{-2} (siehe Tabelle 1 und Abb. 1). Exzentrizität und Neigung der Planetenbahn bestimmen die jahreszeitlichen Schwankungen des solaren Angebots und deren planetare Verteilung. Diese jahreszeitlichen Schwankungen sind auf dem Mars mit ± 28 Wm^{-2} mehr als doppelt bzw. 6 mal so groß wie auf der Erde (± 12 Wm^{-2}) bzw. auf der Venus (± 4,5 Wm^{-2}). Welcher Anteil von diesem Strahlungsangebot aber tatsächlich vom Planeten vereinnahmt wird, hängt vom Rückstreuvermögen des Planeten ab. Im Vergleich der drei terrestrischen Planeten steht der Erde

[1] Vortrag, gehalten in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 21.04.1994, überarbeitete Fassung

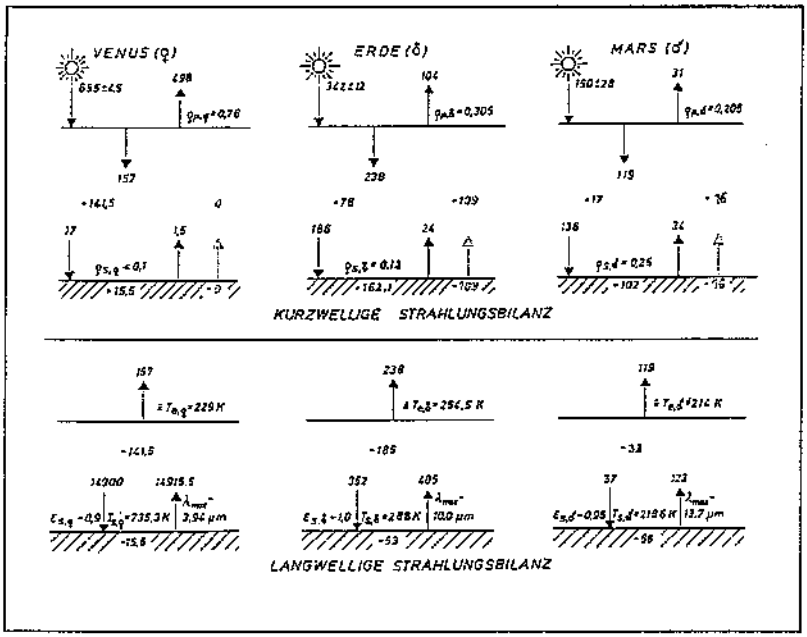


Abb. 1: Kurzwellige (oben) und langwellige Strahlungsbilanz (unten) der terrestrischen Planeten. Die Zahlenangaben (in Wm-2) beziehen sich auf die gesamte Planetenoberfläche und auf die Bilanz an den jeweiligen Grenzflächen. (Beim Mars dringen z.B. an solarer Strahlung mehr als 119 Wm-2 in die Marsatmosphäre ein. Die letztendlich 31 Wm-2, die vom Mars in den Weltraum reflektiert werden, entstammen zum überwiegenden Teil der reflektierten Strahlung der Marsoberfläche.) Die im oberen Teil gestrichelt angegebenen Werte sind die für eine ausgeglichene Wärmebilanz der Planetenoberfläche notwendigen Energieströme von fühlbarer (Konvektion) und latenter Wärme (Verdunstung), die in den Atmosphären freigesetzt werden. $_P$ und $_S$ sind planetare und Oberflächenalbedo, T_e und T_S effektive Strahlungs- und Oberflächentemperatur, ε_S das Emissionsvermögen der Unterlage und λ_{max} die Wellenlänge maximaler Ausstrahlung der Unterlage. Nach Spänkuch (1991). Angaben für die Erde nach Luther und Ellingson (1985), für die Venus nach Spänkuch (1990).

das 1,5-fache (Venus) bzw. 2-fache (Mars) an Strahlung zur weiteren Verwendung zur Verfügung, und zwar 238 Wm^{-2}. Wie diese Strahlung auf die einzelnen Energieformen (innere, kinetische, potentielle Energie) weiter verteilt wird, kann hier nicht näher erörtert werden (siehe hierzu Bolle 1982, Peixoto 1993 und Peixoto und Oort, 1992).Wir merken nur an, daß die hohe Qualität der solaren Energie mit ihrer Mannigfaltigkeit an Verwendungsmöglichkeiten (Anregung und Aufspaltung von Molekülen und Atomen, Photosynthese, Erzeugung elektrischer Energie, u.a.) in den Planetenatmosphären und an den Planetenoberflächen in Energie niederer Qualität, die ausschließlich Wärme erzeugen kann, transformiert wird (Bolle 1982).

Über längere Zeiträume kann von einer ausgeglichenen Strahlungsbilanz ausgegangen werden, d.h. das Plus an solarer Strahlungsenergie wird durch ein Minus an in den Weltraum abgestrahlter Strahlungsenergie ausgeglichen. Die 238 Wm^{-2} entsprechen nach Planck einer äquivalenten (effektiven) Schwarzstrahlungstemperatur von 254,5 K. Dieser Temperaturwert entspricht einer globalen Mitteltemperatur in 6 km Höhe. Das Maximum der infraroten Ausstrahlung in den Weltraum ergibt sich nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz bei 11,4 µm.

Die Venus geht offensichtlich viel effektiver mit dem ihr zur Verfügung stehenden 157 Wm^{-2} entsprechend einer effektiven Strahlungstemperatur von 229 K um, die einer effektiv strahlenden Atmosphärenschicht in 70 km Höhe, also der Höhe der Wolkenobergrenze, entspricht. Dies liegt daran, daß der überwiegende Anteil (90%) dieser Energie in der Venusatmosphäre selbst umgesetzt wird. Die Abstrahlung in den Weltraum ist von der Ausstrahlung der Venusoberfläche vollständig entkoppelt. Es gibt keinerlei Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur der Venus und deren Abstrahlung. Für die Erde existiert dagegen ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und infraroter Abstrahlung in den Weltraum, auf den Budyko (1963,1965) wohl als erster hinwies und der in weiteren Untersuchungen, auch experimentell mittels Satellitendaten, bestätigt wurde (Cess 1976, Thompson und Warren 1982, Neeman et al. 1987, u.a.), allerdings mit erheblichen Unterschieden in der Neigung der Geraden (Ohring und Gruber 1983, Ramanathan 1987, Ramanathan et al. 1989). Für den Mars mit seiner auch optisch dünnen Atmosphäre ergibt sich eine noch engere Beziehung zwischen Oberflächentemperatur und IR-Abstrahlung.

III. Größenvergleich des atmosphärischen Strahlungsantriebs

Wie sind nun die 238 Wm^{-2} der für die Erdatmosphäre verfügbaren Strahlungsenergie zu werten? Die Zunahme des Treibhauseffekts beträgt nach internationaler Einschätzung +4 Wm^{-2} (Houghton u.a., 1990), also nur 1/6 der durch die Exzentrizität der Erdbahn bedingten Jahresschwankung der solaren Strahlung (24 Wm^{-2}). Aber bereits eine Änderung der Strahlungsbilanz um 1 Wm^{-2} hat nach Ergebnissen von Klimamodellen eine Änderung der mittleren globalen Oberflächentemperatur der Erde um 0,4 bis 1,1°C zur Folge (Cess u.a., 1990). Der obere Wert entspricht in etwa dem Temperaturunterschied zwischen Klimaoptimum des frühen Mittelalters (1100-1300) und kleiner Eiszeit (1400-1600). 1 Wm^{-2} sind 0,42 % von 238 Wm^{-2}, das Klima reagiert also sehr empfindlich auf Änderungen der Strahlungsbilanz. Die regulierenden Faktoren im Klimasystem der Erde erzielen separat eine Wirkung um ein Vielfaches dieses Wertes (Tabelle 2), wobei besonders

effektiv der Einfluß der Bewölkung ist. Ein 10%iger Anstieg tiefer Wolken (Wolkenhöhe < 4 km) würde den zunehmenden anthropogenen Treibhauseffekt egalisieren, zunehmende hohe Bewölkung den Treibhauseffekt verstärken (Webster und Stephens, 1984). Wir haben keine verläßliche Abschätzung der planetaren Bewölkungsverhältnisse über historische, geschweige denn geologische Zeiträume, so daß eine Diskussion der Strahlungseigenschaften der Erdatmospäre in dieser Zeitskala reine Spekulation bleiben muß. Erinnert sei nur an den wesentlich höher angenommenen Wert der planetaren Albedo der Vor-Satellitenzeit mit 0,34 bis 0,42 (Simpson 1929, Hann und Süring 1953, Katayama 1967, Kondratyev 1969).

Es ist an dieser Stelle angebracht, einiges zu den Klimamodellen anzumerken. Die relative Einmütigkeit der Ergebnisse im globalen Mittel, wenn auch bei z.T. beträchtlichen regionalen Unterschieden, läßt leicht die Vermutung bereits eindeutig gesicherter Ergebnisse aufkommen, die nur im Detail und in der Größenordnung Diskussionsstoff bieten. Die Aufstellung in Tabelle 3 zeigt, daß viele Rückkopplungseffekte in den Klimamodellen entweder überhaupt noch nicht berücksichtigt werden konnten bzw. ihre Wirkung auf den Treibhauseffekt, d.h. Erwärmung oder Abkühlung, noch strittig ist. Jüngstes Beispiel ist die Diskussion um das Vorzeichen der Rückkopplung des Wasserdampfeffekts, der in allen Klimamodellen als positiv, d.h. Erwärmung des Systems bei Erhöhung der atmosphärischen Wasserdampfkonzentration, angenommen wird. Es ist aber auch eine negative Rückkopplung denkbar (Lindzen 1990): Bei steigender Meeresoberflächentemperatur nimmt die Konvektion in der Atmosphäre zu, die wiederum zu einer verstärkten Absinkbewegung der Luft in den wolkenlosen Bereichen führt, die die Konvektionszellen umgeben. Die Absinkbewegung hat ein verstärktes Austrocknen der oberen Troposphäre zur Folge, diese - wegen der höheren Temperatur der emittierenden Schichten - eine erhöhte Abstrahlung in den Weltraum, mit dem Resultat einer Abnahme der Temperatur der Meeresoberfläche. Eine jüngst von Chou (1994) vorgelegte Untersuchung scheint diese Argumentationskette zu bestätigen.

Die in geologischen Zeiträumen durch Variationen des atmosphärischen CO_2-Gehalts mit 9 bis 18 Wm^{-2} (Tab. 2) abgeschätzte Änderung des Strahlungsantriebs (Crowley 1993) entspricht in der Größenordnung in etwa dem des gegenwärtigen Wolkeneffekts. Die Variationen der terrestrischen Strahlungsbilanz haben demnach 10% nie überschritten.

Wir dürfen allerdings Klimaänderungen und -variationen auch bei unveränderter globaler Strahlungsbilanz nicht einfach ausschließen. Bereits eine Umverteilung des Strahlungsangebots auf die einzelnen Energieformen könnte eine Klimaveränderung zur Folge haben, ein Aspekt, der bisher offenbar überhaupt noch nicht beachtet worden ist.

Auch eine geographische Umverteilung der Strahlungsquellen und -senken bei gleichzeitig konstanter globaler Strahlungsbilanz ist eine Dokumentation einer Klimaverschiebung oder -variation, weil sich regionale Klimastrukturen als Folge der engen Wechselwirkung zwischen Strahlung und dem atmosphärischen und ozeanischen Geschehen (Abb. 2) auch in den geographischen Strukturen der Strahlungsströme am Oberrand der Erdatmosphäre bemerkbar machen. In der Vorsatellitenzeit war dieses Konzept der Berechnung der atmosphärischen Strahlungsströme auf der Basis der entsprechenden atmosphärischen und terrestrischen Parameter die einzige Möglichkeit der Abschätzung einer globalen Strahlungsbilanz (Simpson 1929), wenn auch mit großen Unsicherheiten. Heute ist die Datenbasis dank der Satellitendaten, insbesondere im Rahmen des International Satellite

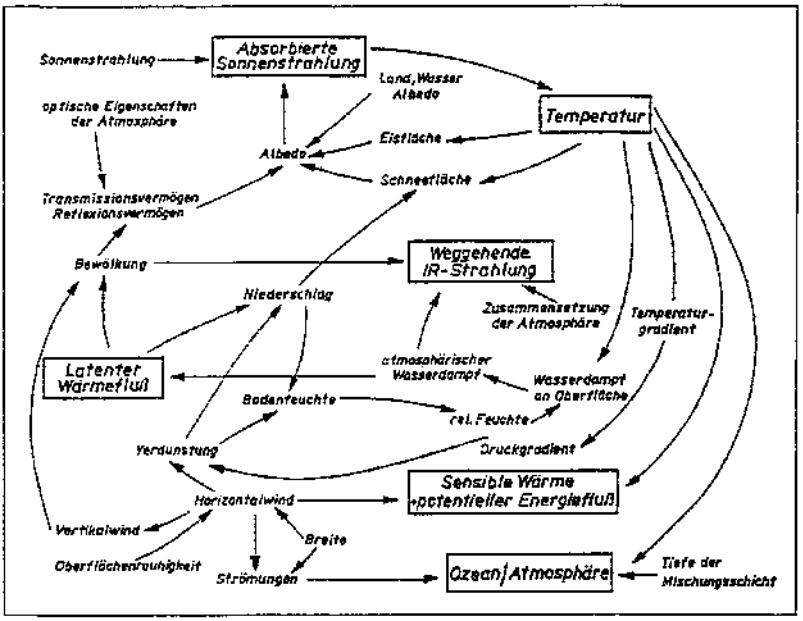


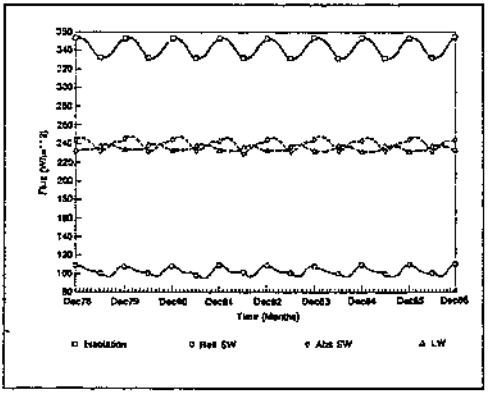
Abb. 2: Das Klimasystem nach Kellogg und Schneider (1994), neuere Version siehe Robock (1985). Direkt von Satelliten meßbar sind die IR-Abstrahlung und die absorbierte Sonnenstrahlung als Differenz von extraterrestrischer Sonnenstrahlung und in den Weltraum reflektierter Strahlung.

Cloud Climatology Project (ISCCP), deutlich verbessert (Zhang et al., 1995, Rossow und Zhang 1995). Es können sowohl die Qualität der Strahlungsbilanzmessungen, bedingt durch Instrumentendrifts u.a., überprüft als auch zeitliche Beobachtungslücken mit diesem Verfahren wenigstens zum Teil geschlossen werden (Slingo und Webb, 1992).

IV. Ergebnisse von Bilanzstrahlungsmessungen mittels Satelliten

Cloud Climatology Project (ISCCP), deutlich verbessert (Zhang et al., 1995, Rossow und Zhang 1995). Es können sowohl die Qualität der Strahlungsbilanzmessungen, bedingt durch Instrumentendrifts u.a., überprüft als auch zeitliche Beobachtungslücken mit diesem Verfahren wenigstens zum Teil geschlossen werden (Slingo und Webb, 1992).Die Messung von Strahlungsflüssen mittels Satelliten ist keineswegs eine triviale Aufgabe (Kandel (1990)) (Tab. 4). Aus meßtechnischen Gründen (Geometrie, Empfängercharakteristika) kann nicht der integrale Strahlungsfluß selbst, sondern nur eine spektrale Strahldichte gemessen werden, wenn auch über ein endliches Spektral -und Raumintervall integriert, so daß spektrale und geometrische Korrekturen an den Meßwerten erforderlich sind. Die geometrischen Korrekturen setzen Kenntnisse oder begründete Annahmen über die Richtungsabhängigkeiten der Reflektanz und Emittanz voraus. Diese sind von der jeweiligen Unterlage abhängig, die aus den Messungen selbst durch Verfahren, die unter dem Begriff Szenenidentifikation bekannt sind, bestimmt werden. Ein methodischer Vorteil ist, daß solarer und terrestrischer Strahlungsfluß wegen der unterschiedlichen effektiven Strahlungstemperatur von Sonne und Erde getrennt behandelt werden können. Oberhalb von 4 µm ist die solare Strahlung energetisch ohne Bedeutung, unterhalb von 4 µm die terrestrische Strahlung. Welche Korrekturmethoden im einzelnen verwendet werden, ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Abb. 3: Zeitliche Variation wesentlicher Komponenten der globalen Strahlungsbilanz nach ERB-Messungen (nach Ardanuy et al. 1992).

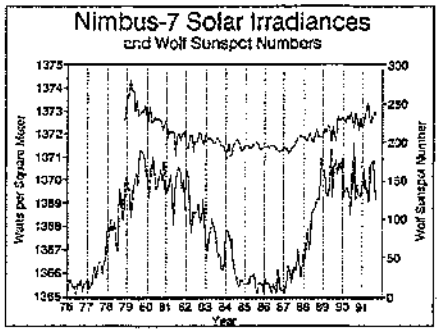


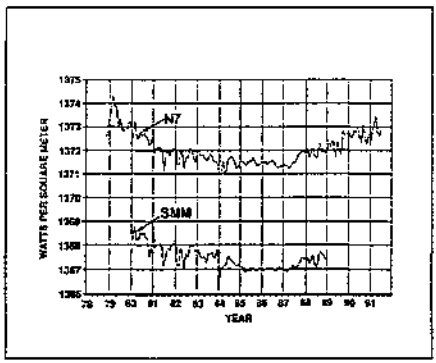
Ein wesentliches Problem ist das zeitliche und räumliche Sampling. Die starke Veränderlichkeit der Strahlungsströme mit der Tageszeit erfordert Messungen zu unterschiedlichen Tageszeiten, d.h. also Messungen mittels mehrerer Satelliten, erstmalig verwirklicht im Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) seit Ende 1984 mit zwei sonnsynchronen Satelliten sowieeinem asynchronen Satelliten mittlerer Bahnneigung. Letzterer liefert im Laufe eines Monats für jeden Ort im stündlichen Abstand die entsprechenden Messungen. Eine repräsentative und evaluierte langjährige Meßreihe liegt allerdings bisher nur vom Vorläuferexperiment

ERB von den sonnsynchronen Satelliten Nimbus 6 und 7 vor (Ardanuy et al. 1992, Kyle et al. 1993) mit bisher ausgewerteten 6 bis 13 jährigen Reihen (Tabelle 6).

Obwohl zweifellos noch recht kurz, geben die Meßreihen doch einige recht bemerkenswerte Details. Insbesondere sind im Beobachtungszeitraum sowohl die Komponenten der Strahlungsbilanz als auch die Wolkenbedekkung, und dies ist besonders erstaunlich angesichts der starken raumzeitlichen Variabilität der Bewölkung, sehr stabil. Im globalen Maßstab beträgt die interannuale Variationsbreite aller Komponenten der integralen Strahlungsbilanz nicht mehr als 0,4% entsprechend 1 Wm^{-2}, die beobachtete Variation der globalen Jahrestemperatur der Oberfläche ± 0,1° C und des Wolkenbedeckungsgrades ± 0,8%. Die 1 Wm^{-2} sind die Schwankung um den Mittelwert. Eine ständig um 1 Wm^{-2} erhöhte Strahlungsbilanz würde im Gleichgewichtszustand die bereits diskutierte Erhöhung der Oberflächentemperatur um 0,4° bis 1,1° C zur Folge haben.

Abb. 4a): Der zeitliche Verlauf der Monatsmittel der extraterrestrischen Sonnenstrahlung nach Messungen von Nimbus 7 (N7) und dem zum ERBE-System gehörenden Solar Maximum Mission (SMM)-Satelliten (nach Kyle et al. 1993).





Der zeitliche Gang der globalen Strahlungskomponenten ist in Abb. 3 zu sehen. Die im System Erde/Atmosphäre absorbierte solare Strahlung ergibt sich aus der Differenz der gemessenen Größen extraterrestrische Strahlung minus Reflexstrah lung in den Weltraum. Die absorbierte solare Strahlung bedeutet den Energieinput des Systems, die Infrarotabstrahlung den Energieoutput, die Differenz beider Größen die globale Strahlungsbilanz. Die Jahresschwankung der Strahlungsbilanz von 20 Wm^{-2} wird fast vollständig durch die

Abb. 4b): Zeitliche Variation der Monatsmittel der extraterrestrischen Sonnenstrahlung nach Messungen von Nimbus 7 im Vergleich mit den Monatsmitteln der Sonnenfleckenrelativzahlen nach Wolf (nach Ardanuy et al. 1992).

Jahresschwankung der extraterrestrischen Einstrahlung (24 Wm^{-2}) kompensiert. Jedoch weder die planetare Albedo, noch die Infrarotstrahlung machen diese Jahresschwankung voll mit. Die IR-Abstrahlung ist sogar um 180° phasenverschoben zum solaren Input.

Abb. 4 zeigt den Verlauf der solaren Einstrahlung über mehrere Jahre, gemessen von ERB (Nimbus 7) und ERBE (SMM) (Abb. 4a) und den Vergleich mit dem Gang der Sonnenfleckenrelativzahl (Abb. 4b). Die Korrelation zwischen Sonnenfleckenrelativzahl und solarer Einstrahlung beträgt 0,65. Das positive Vorzeichen der Korrelation ist überraschend. Offenbar überkompensieren die hellen Sonnenfackeln die Wirkung der dunklen Sonnenflecken. Für unsere Diskussion ist interessant, daß der solare Energieoutput zwischen Sonnenaktivitätsmaximum und -minimum 0,15% entsprechend 2 Wm^2 nicht übersteigt. Ob diese Ziffern auch für weitere Sonnenfleckenzyklen gelten, bleibt abzuwarten. Der Vergleich der beiden unabhängigen Messungen gibt eine beachtliche Übereinstimmung der gemessenen relativen Schwankungen, jedoch eine systematische Differenz von etwa 4 Wm^{-2} absolut. Die Absolutgenauigkeit der Nimbus 7-Messungen wird zu

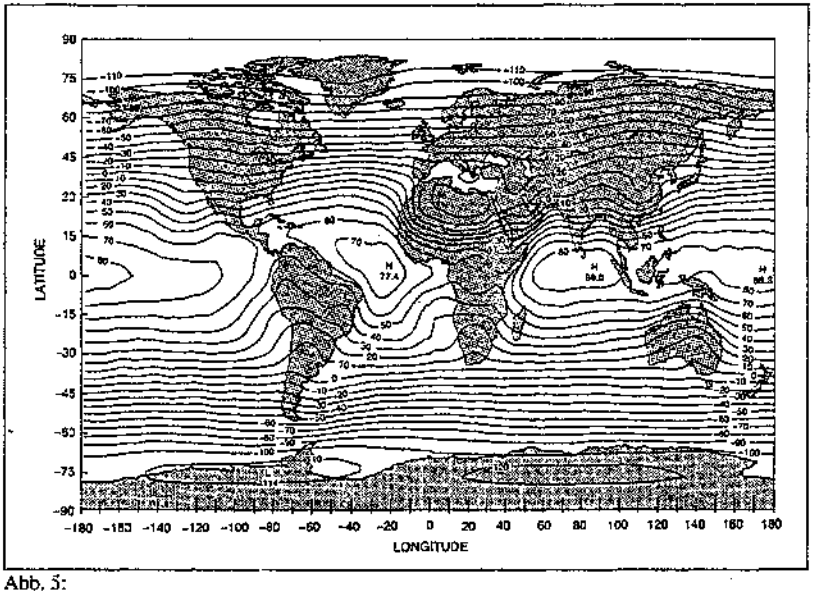


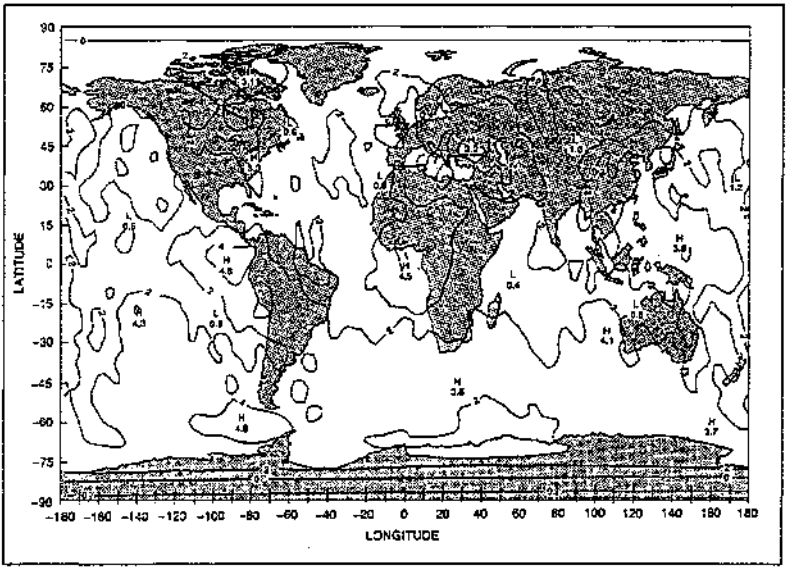
Abb. 5:

Globale Verteilung der Strahlungsbilanz des Systems Erde-Atmosphäre aus 8-jährigen ERB-Messungen. Isolinienabstand 10 Wm^{-2} (nach Ardanuy et al. 1992).

±0,5%, die von SMM mit ± 0,2% eingeschätzt. Es bleibt weiteren Experimenten vorbehalten, diese Diskrepanz zu klären.

Wie verteilen sich aber nun Energieinput und -output über den Globus? Wir können dies hier nur für die Strahlungsbilanz tun. Im Jahresmittel (Abb. 5) vereinnahmt die Erde mehr Energie als sie zwischen ± 36° geographischer Breite abstrahlt, obwohl die jahreszeitliche Schwankung dieser Nullinie zwischen -15° und +70° im jeweiligen Winter bzw. Sommer beträgt. Die Einnahmequellen sind die tropischen Meere mit 70 bis über 80 Wm^{-2}, und der Land-Meer-Kontrast ist in den Tropen und Subtropen mit bis zu 40 Wm^{-2} bedeutend. Die Sahara ist mit -20 Wm^{-2} bereits ein Energiezuschußgebiet. Mit Annäherung an die Pole verschwindet der Land/Meer-Kontrast. Es stellt sich ein nahezu zonaler Gradient ein. Die Strahlungsbilanz erreicht ein Minimum von über -100 Wm^{-2}. Atmosphärischer und ozeanischer Energietransport (jeweils > 10^{15} W) haben für die Kompensation zu sorgen.

Abb. 6: Globale Verteilung der interannualen Variabilität der Strahlungsbilanz aus ERB-Messungen. Isolinienabstand 2 Wm^{-2} (nach Ardanuy et al. 1992).



Die interannuale Variation der Strahlungsbilanz (Abb. 6) hat ihr Maximum mit 4,5 bis 5 Wm^{-2} im Bereich der tropischen Meere westlich Südamerikas und Afrikas, und sie ist generell auf der Südhalbkugel größer als auf der Nordhalbkugel. Die Lage der Maxima läßt vermuten, daß die Variationen wesentlich durch die Modulation der Felder tiefer Wolken (Stratus und Stratocumulus) verursacht sind. Diese Wolken ändern im wesentlichen die

kurzwelligen Strahlungseigenschaften (hohe Albedo der Wolken, geringe Albedo der Meeresoberfläche). Infolge geringer Temperaturunterschiede zwischen Meeresoberfläche und Wolkenobergrenze ist die Wirkung tiefer Bewölkung auf die IR-Abstrahlung bedeutend geringer. Dieser Befund ist gleichzeitig eine gewisse Bestätigung der theoretischen Ansätze über den Einfluß der Wolken auf den Strahlungshaushalt (siehe Tab. 2).

Die Konzentration der Diskussion auf die integralen Strahlungsflüsse könnte den Eindruck erwecken, als ob die Änderungen der Strahlungsenergie mehr oder weniger gleichmäßig über den gesamten Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums verteilt sind und auch daß Änderungen der Strahlungsenergie, unabhängig davon, in welchem Spektralbereich sie auftreten, von gleicher oder ähnlicher Wirkung sind. Beide Annahmen sind unzutreffend. Die spektroskopischen Eigenschaften der Gase bewirken, daß atmosphärische Konzentrationsänderungen dieser Gase sich zunächst nur in den Bereichen ihrer Absorptionsbanden bemerkbar machen, wie dies aus Abb. 7a für die spektrale Strahldichte der die Erdatmosphäre in Zenitrichtung verlassenden Strahlung im Fall einer Verdopplung des atmosphärischen CO_2-Gehalts zu sehen ist (Kiehl 1983). Diese spektrale Signatur wird modifiziert durch Änderungen der vertikalen atmosphärischen Temperaturschichtung als Folge der veränderten Absorptionswirkung (Abb. 7b) (Kiehl 1985). In den atmosphärischen Fensterbereichen ist diese Strahldichteänderung wegen der Erhöhung der Oberflächentemperatur positiv, im Bereich der Absorptionsbanden wegen der Zunahme der Höhe der emittierenden Schicht negativ. Die Wirkung der Treibhausgase beruht gerade darauf, daß ihre Gesamtwirkung in sonst relativ durchlässigen Spektralbereichen, den sogenannten atmosphärischen Fenstern, effektiv ist (Graßl 1989).

Für das Leben auf der Erde ist es keineswegs uninteressant, in welchen

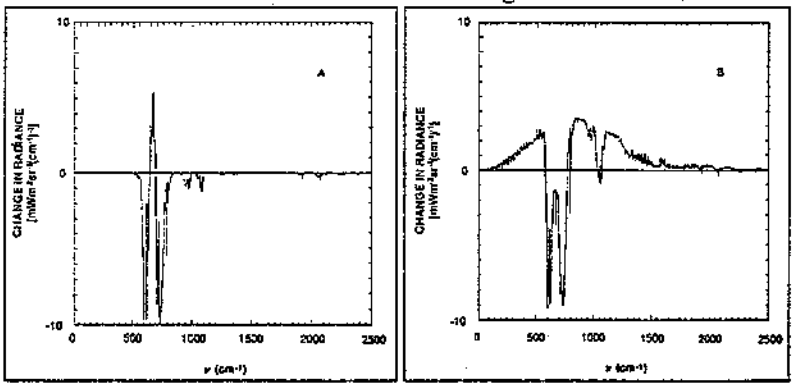


Abb. 7:Berechnete Änderung der spektralen Strahldichte in Zenitrichtung infolge Verdoppelung des atmosphärischen CO_2-Gehalts (A) und unter Berücksichtigung der daraus direkt resultierenden Temperaturänderung (B) (nach Kiehl 1985).

Spektralintervallen sich die atmosphärischen Strahlungseigenschaften ändern, auch wenn die daraus unmittelbar resultierenden energetischen Änderungen unbedeutend sein können. Die UV-Strahlung ($\lambda < 400$ nm) beträgt an der Erdoberfläche nur 5 % der solaren Strahlung, im UV-B (280-315 nm) sogar weniger als 0,2 % (Feister 1990). Viele biologische Wirkungskurven haben jedoch ihr Maximum im UV-B-Bereich. Eine 50%-Änderung der UV-B-Strahlung würde integral nur ein Zehntel Prozent Änderung der Strahlungsenergie bedeuten, hätte aber erhebliche Konsequenzen für die Biosphäre.

V. Schlußbetrachtung

Erstmalig liegt eine mehrjährige Meßreihe wesentlicher Komponenten der atmosphärischen Strahlungsbilanz im globalen Maßstab vor. Die offensichtlich starke Abhängigkeit des Klimasystems gegenüber relativ geringfügigen Änderungen dieser Bilanz (< 1%) stellt erhebliche Ansprüche an die Genauigkeit dieser Messungen, die über Jahrzehnte beibehalten werden muß. Es genügt auch nicht, nur die integralen Strahlungsflüsse zu messen. Spektralmessungen relativ hoher Auflösung sind sowohl zur Identifizierung der Ursachen der Änderung der Bilanzen als auch zur Einschätzung der Auswirkung dieser Änderungen nötig. Die separaten Wirkungen der einzelnen Faktoren, die die atmosphärischen Strahlungsflüsse beeinflussen können, betragen z. T. mehrere Prozent der Strahlungsbilanz und damit Werte, die wir aus geologischen Zeiträumen kennen.

Literatur

Ardanuy, P. E., Kyle, H. L., Hoyt, D., 1992: Global relationships among the Earth's radiation budget, cloudiness, volcanic aerosols, and surface temperature. J. Climate 5, 1120-1139.

Bernhardt, K.-H., W. Böhme, 1994: Klima und Menschheit. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, H. 1/2 (1994), 51-90.

Bolle, H.-J., 1982: Radiation and energy transport in the Earth atmosphere system. In Huntzinger, O.: The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 1/Post B. Springer Berlin-Heidelberg-New York, 131-303.

Budyko, M. I., 1963: Atlas teplovogo balanca zemnogo _ara. Moskau

Budyko, M. I., 1965: The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. Tellus 21, 611-619.

Cess, R. D., 1976: Climate change: An appraisal of atmospheric feedback mechanisms employing zonal climatology. J. Atmos. Sci. 33, 1831-1843.

Cess, R. D. et al., 1990: Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models. J. Geophys. Res. 95, D10, 16601-16615.

Charlson, R. J., J. Langner, H. Rohde, C. B. Leovy, S. G. Warren, 1991: Perturbation of the Northen Hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols. Tellus 43 AB, 152-163.

Crowley, T. J., 1993: Geological assessment of the greenhouse effect. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 74, 2363-2373.

Feister, U., 1990: Ozon-Sonnenbrille der Erde. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig

Graßl, H., 1989: Anthropogene Beeinflussung des Klimas. Phys. Bl. 45, 199-206.

Hann, J., R. Süring, 1939/1951: Lehrbuch der Meteorologie, 5. vollst. neubearb. Aufl., 1. Bd. Teil 1-5, 1-480, 2. Bd. Teil 6-11, 481-1092.

Hoffert, M. L., Covey, C., 1992: Deriving global climate sensitivity from palaeoclimate reconstructions, Nature 360, 573-576.

Houghton, J. T., G. J. Jenkins, J. J. Ephraums (Eds.), 1990: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press

Kandel, R. S., 1990: Satellite observation of the Earth radiation budget and clouds. Space Science Rev. 52, 1-32.

Katayama, A., 1967: On the radiation budget of the troposphere over the northern hemisphere, II. J. Meteorol. Soc. Japan 45, 1-25.

Kellogg, W. W., S. H. Schneider, 1974: Climate stabilization: for better or for worse? Science 186, 1163-1172.

Kiehl, J. T., 1983: Satellite detection of effects due to increased atmospheric carbon dioxide. Science 222, 504-506.

Kiehl, J. T., 1985: Searching for the radiative signal of increasing carbon dioxide and other trace gases. In Mac Cracken, M. C. und F. M. Luther (Eds.): Detecting the climate effects of increasing carbon dioxide. United States Department of Energy, DOE/ER-0235, Dec. 1985, 13-28.

Kiehl, J. T., B. P. Briegleb, 1993: The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. Science 260, 311-314.

Kondratyev, K. Ya., 1969: Radiation in the atmosphere. Academic Press

Ksanfomaliti, L. V., 1985: Planeten. Moskau: Mir; Leipzig-Jena-Berlin Urania-Verlag

Kyle. H. L., J. R. Hickey, P. E. Ardanuy, H. Jacobowitz, A. Arking, G. G. Campbell, F. B. House, R. Maschhoff, G. L. Smith, L. L. Stowe, T. Vonder Haar, 1993: The Nimbus Earth Radiation Budget (ERB) Experiment: 1975 to 1992, Bull. Amer. Meteorol. Soc. 74, 815-830.

Lanius, K., 1994: Globaler Wandel. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, H. 1/2 (1994), 7-31.

Lindzen, R. S., 1990: Some coolness concerning global warning. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 71, 288-299.

Luther, F. M., R. G. Ellingson, 1985: Carbon dioxide and the radiation budget. In: Mac Cracken, M. C. und F. M. Luther (Eds.): Projecting the climatic effects of increasing carbon dioxide. United States Department of Energy, DOE/ER-0237, Dec. 1985, 25-55.

Moroz, V. I., A. P. Ekonomov, B. E. Moshkin, H. E. Revercomb, L. A. Sromovsky, J. R. Schofield, D. Spänkuch, F. W. Taylor, M. G. Tomasko, 1985: Solar and thermal radiation in the Venus atmosphere. Adv. Space Res. 5, No. 11, 197-232.

Neeman, B. U., J.-H. Joseph, G. Ohring, 1987: The sensitivity of the outgoing longwave radiation to surface temperature: Modeling the opacity feedback and experiments with a variable cloud-top temperature provision. J. Atmos. Sci. 44, 2995-3006.

Ohring, G., A. Gruber, 1983: Satellite radiation observations and climate theory. Adv. Geophys. 25, 237-304.

Peixoto, J. P., A. H. Oort, 1992: Physics of climate. American Institute of Physics. New York

Peixoto, J. P., 1993: Atmospheric energetics and the water cycle. In: Raschke, E., D. Jacob (Eds.): Energy and Water Cycles in the Climate System. NATO A51 Series, Vol. 15, Springer Berlin- Heidelberg, 1-42.

Ramanathan, V., 1987: The role of Earth radiation budget studies in climate and general circulation research. J. Geophys. Res. 92, D4, 4075-4095.

Ramanathan, V., B. R. Barkstrom, E. F. Harrison, 1989: Climate and the Earth's radiation budget. Phys. today 22-32.

Robock, A., 1985: An updated climate feedback diagram. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 66, 786-787.

Rossow, W. B., Y.-C. Zhang, 1995: Calculation of surface and top of atmosphere radiative fluxes from physical quantities based on ISCCP data sets. 2. Validation and first results. J. Geophys. Res. 100, D1, 1167-1197.

Sato, M., J. E. Hansen, M. P. Mc Cormick, J. P. Pollack, 1993: Stratospheric aerosol optical depths, 1850-1990, J. Geophys. Res. 98, D12, 22987-22994.

Simpson, G. C., 1929: The distribution of terrestrial radiation, Mem. Roy. Meteorol. Soc. 3, 53-78.

Slingo, A., M. J. Webb, 1992: Simulation of clear-sky outgoing longwave radiation over the oceans using operational analyses. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 118, 1117-1144.

Spänkuch, D., 1984: Die Rolle des Aerosols im Klimasystem. Arbeit von Plenum und Klassen der AdW der DDR, 9, Nr. 8, 98-117.

Spänkuch, D. 1990: Das heutige Bild der Venusatmosphäre II, Sterne 66, 277-289.

Spänkuch, D., 1991: Die Strahlungsbilanz der terrestrischen Plane-ten Venus, Erde und Mars. Naturwissenschaften 78, 347-354.

Thompson, S. L., S. G. Warren, 1982: Parametrization of outgoing infrared radiation derived from detailed radiative calculations. J. Atmos. Sci. 39, 2667-2680.

Waere, B. C., 1992a: Variations in Nimbus-7 cloud estimates. Part I: Zonal averages. J. Climate 5, 1496-1505.

Waere, B. C., 1992b: Variations in Nimbus-7 cloud estimates. Part II. Regional changes J. Climate 5, 1506-1513.

Webster, P. J., Stephens, G. L., 1984: Cloud-radiation interaction and the climate problem, in J. T. Houghton (Ed.): The Global Climate, Cambridge University Press. 63-78.

Zhang, Y.-C., W. B. Rossow, A. A. Lacis, 1995: Calculation of surface and top of atmosphere radiative fluxes from physical quantities based on ISCCP data sets 1. Method and sensitivity to input data uncertainties. J. Geophys. Res. 100, D1, 1149-1165.

Tabelle 1 Vergleich der Komponenten der Strahlungsbilanz für Venus, Erde und Mars. Die ersten fünf Werte sind bezogen auf die Werte der Erde (s. Abb. 1, nach Spänkuch (1991))

Komponente	Venus	Erde	Mars
Solarkonstante	1,9	1	0,44
Vom System Planetenoberfläche/ Atmosphäre absorbierte solare Energie = infrarote Abstrahlung	0,66	1	0,5
In Atmosphäre absorbierte solare Strahlung F_{abs}^{Atm}	1,86	1	0,22
An Planetenoberfläche absorbierte solare Strahlung F_{abs}^{Ob}	0,09	1	0,63
Für sensible und latente Wärme verfügbare Energie	0	1	0,15
$F_{abs}^{Atm}/F_{abs}^{Ob}$	9,1	0,47	0,17
Planetare Albedo	0,76	0,305	0,205; bei Staubsturm 0,4
Absorptionsvermögen der Atmosphäre für Sonnenstrahlung	0,22	0,22	0,11; bei Staubsturm 0,58
Transmissionsvermögen der Atmosphäre für Sonnenstrahlung	0,02	0,475	0,685; bei Staubsturm 0,02
Kurzwellige Grenze der an der Planetenoberfläche einfallenden solaren Strahlung in nm	480[2]	300	180[3]

[2] nach Moroz u.a. (1985)
[3] nach Ksanfomaliti (1985)

Tabelle 2 Größenvergleich des atmosphärischen Strahlungsantriebs

gegenwärtiger Wert	238 Wm^{-2}	
Klimamodelle $\Delta Ts = 0.4° - 1.2°C$ pro	1 Wm^{-2}	Cess et al. (1990)
Jahreszeitliche Variation der solaren Strahlung	24 Wm^{-2}	
Jahreszeitliche Variation der gemessenen Strahlungsbilanz	20 Wm^{-2}	Ardanuy et al. (1992)
anthropogener Treibhauseffekt	+ 4 Wm^{-2}	ISCCP (1991)
gegenwärtiger Wolkeneffekt 10 % Anstieg tiefer Wolken 10% Reduktion hoher Wolken	17 Wm^{-2} - 4 Wm^{-2} + 4 Wm^{-2}	Webster und Stephens (1984)
stratosphärisches Aerosol	- 30 t0.55 ≈ - (1-3 Wm^{-2} max.)	Sato et al. (1993)
Sulfataerosol, direkter Effekt	- 0,3 bis -1 Wm^{-2}2	Charlson et al. (1991) Kiehl u. Briegleb (1993)
Sulfataerosol, Effekt auf Wolkenalbedo	- 1 Wm^{-2}	Charlson et al. (1991)
CO_2, geologische Zeiträume	9-18 Wm^{-2}	Crowley (1993)
Reduktion von Treibhausgasen während Eiszeiten	- (2,5 bis 3) Wm^{-2}	Crowley (1993)
Albedoeffekt von Eis , während Eiszeiten	(3 bis 3,5) Wm^{-2}2	Hoffert und Covey (1992) Hansen et al. (1993)

Genauigkeit gegenwärtiger Satellitemessungen

ERBE		1 (?) Wm^{-2}
ERB	bias	+ 6 Wm^{-2}

Tabelle 3 Wesentliche Rückkopplungen im Treibhauseffekt, deren Status in Klimamodellen und qualitative Abschätzung des Effekts

	Vorzeichen	Berücksichtigung in Zirkulationsmodellen	Bemerkungen/Effekt
Wasserdampf	+/- (?)	ja	empirischer Nachweis von Satelliten
Schnee/Eis	+	ja	
Wolken	?	partiell ja	gegenwärtig negativ potentiell stärkste Rückkopplung
troposphärische Chemie	?	nein	möglicherweise positive Rückkopplung durch OH-Abnahme
Aerosol	?	nein	Nichtberücksichtigung betrifft Modellierung der Aerosolproduktion und -vernichtung, indirekte Einwirkung auf Strahlungsbilanz u.a. (siehe Spänkuch 1984).
Meeresoberflächentemperatur	+/-	ja	größere Unsicherheiten im Maßstab
Ozeanzirkulation	+	in modernsten	potentiell groß
Gasaustausch mit Ozean	?		möglicherweise gering
CO_2-Düngung	?	nein	möglicherweise kurzzeitig negativ
Eutrophierung	-	nein	
Temperatur und Pflanzenatmung	+		potentiell signifikant

	Vorzeichen	Berücksichtigung in Zirkulationsmodellen	Bemerkungen/Effekt
Bodenfeuchte	+/-	ja	abhängig von Niederschlag und Breite
UV-B und Phytoplankton	+	nein	möglicherweise groß
UV-B/terrestr. Ökosystem	+	nein	
Reisfelder	+	nein	kritische Größe Bodenfeuchte
CH_4 in Permafrost	+	nein	abhängig vom Wasserstand
Organische Materialien in Permafrost	+	nein	abhängig von Bodentemperatur

Tabelle 4 Allgemeine Probleme der Bestimmung von Strahlungsflüssen am Oberrand der Atmosphäre mittels Satelliten

- Absoluteichung der Radiometer
- räumliche Auflösung
- geographische Abtastung
- zeitliche Abtastung
- spektrale Spektraldichten $L_\lambda(\theta,\lambda,\varphi) \rightarrow$ integraler Strahlungsfluß ϕ

θ: Nadirwinkel der Messung; λ, φ: geometrische Länge und Breite

Tabelle 5 Korrekturverfahren zur Bestimmung bzw. Messung der lang- und kurzwelligen Strahlungsflüsse

Satellit	Nimbus 7 (ERB)	ERBE
- spektrale Korrektur für $l > 4$mm (LW)		
Scanner	globale Regression	szenenabhängige Kombination von 3 Spektralkanälen
Weitwinkel	$\phi_{LW} = \phi_{gesamt} - \phi_{KW}$	$\phi_{LW} = \phi_{gesamt} - \phi_{KW}$
für $\lambda \leq 4$ µm (KW)		
Scanner	globaler Faktor	3 Spektralkanäle
Weitwinkel	1 Spektralkanal	1 Spektralkanal
- Szenenidentifikation		
Geotyp	Ozean, Land, Schnee/Eis (3 Typen)	Ozean, Land, Wüste, Küste, Schnee (5 Typen)
Breitenunterschiede	keine	3 (äquatorial, gemäßigt, polar)
Wolkenunterteilung	bedeckt/	7 Klassen wolkenlos
Methoden der Wolkenbestimmung	Schwellwertmethode	Maximum-Likelihood-Methode

Tabelle 6 Globale Jahresvariationen von Strahlungsparametern und entsprechenden meteoreologischen Parametern (nach Ardanuy et al., 1992) sowie weitere relevanter Befunde (nach Weare 1992 a, b)

Parameter	absolute Schwankung	prozentuale Schwankung	Bemerkung
langwellige Abstrahlung	± 0,4 Wm^{-2}	± 0,2%	9 Jahre:1979-1987
absorbierte kurzwellige Strahlung	± 0,6 Wm^{-2}	± 0,2%	9 Jahre: 1979-1987
Strahlungsbilanz	± 0,5 Wm^{-2}	± 0,2%	9 Jahre: 1979-1987
Solarkonstante	-0,7 bis +1,3 Wm^{-2}	(-0,05 bis +0,1)	13 Jahre: 1979-1991
Oberflächentemperatur	± 0,1° C		12 Jahre: 1979-1990
Wolkenbedeckung	-0,5% bis +0,3%	± 0,8%	6 Jahre: 1979-1985

- Multiple lineare Regression mit 5 bis 7 Wolkentypen erklärt 80 % der interdiurnen Variation der langwelligen Abstrahlung und 60 % derjenigen der Strahlungsbilanz
- Wolkenzunahme ist positiv korreliert mit Wolkenuntergrenze
- Korrelation Strahlungsbilanz/Oberflächentemperatur ist negativ mit -0,84Wm^{-2} pro +1° C
- In den Tropen führt eine Zunahme der Meeresoberflächentemperatur um 1° C zu einer Zunahme des Gesamtbedeckungsgrades um 2% bei gleichzeitiger Erhöhung der Wolkenobergrenze um 0,5 km. Dieser Befund widerspricht den Aussagen der Klimamodelle.

Aufruf zur Teilnahme an Studie der Leibniz-Sozietät : „Radioaktivität - Risiken, Fortschritte, Fehlbeurteilungen“

Die Leibniz-Sozietät plant für 1996/97 eine interdisziplinäre Studie zum Thema ***„Radioaktivität - Risiken, Fortschritte, Fehlbeurteilungen“***. Ihre Resultate sollen in Buchform bzw. in Vorträgen und Aufsätzen veröffentlicht werden (u.a.in den „Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät“).

Mit dieser Publikation will die Leibniz-Sozietät den sich in vielen Medien, vom Fernsehen bis zur Tageszeitung ausbreitenden irrationalen und pseudowissenschaftlichen Aussagen entgegenwirken. Es soll versucht werden, bereits entstandenem Schaden Grenzen zu setzen. Die mit den Begriffen Radioaktivität, Strahlenrisiko und Kernenergie entstandene irrationale Verknüpfung mit Furcht vor erhöhter Krebsgefahr und anderen „unkalkulierbaren“ Folgen für Mensch und Umwelt fordert zu einer wissenschaftlich kritischen und zusammenhängend überblickenden Betrachtung der zugrundeliegenden Erkenntnisse heraus. Die Leibniz-Sozietät will die öffentliche Einsicht fördern, daß Wissenschaft der gesellschaftlichen Unterstützung bedarf. Popularitätshaschende Entstellungen rufen Nichtakzeptanz hervor und gefährden ihren Auftrag.

Bei der Entwicklung der Nukleartechnologien stehen sich - scheinbar untrennbar miteinander verzahnt - große Risiken und große Chancen gegenüber. Diese Situation beunruhigt nicht nur die Fachleute, sondern auch breite Kreise der Öffentlichkeit. Eine ehrliche öffentliche Diskussion der Risiken für Leben, Gesundheit und Umwelt und der möglichen Strategien zur Reduzierung dieser Risiken ist dringend geboten, wenn nicht in der Öffentlichkeit kursierende irrationale Ängste eine sachliche Abwägung von Risiken und Chancen unmöglich machen sollen.

Die hundertjährige Wiederkehr der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität durch Henri Becquerel und die Reaktorkatastrophe in Tschernobyl vor 10 Jahren bieten für 1996 hierzu einen geeigneten Anlaß. Die Leibniz-Sozietät ist bemüht, erfahrene Wissenschaftler der einzubeziehenden Fachgebiete aus dem In- und Ausland für eine Mitarbeit zu gewinnen. Die Unabhängigkeit der Leibniz-Sozietät von der Wissenschaftspolitik des Staates und der Parteien ermöglicht ihr, souverän und kritisch Standpunkte und Forderungen unbefangen auszusprechen. Das Vorhaben soll weder die vorhandenen Erkenntnislücken verschweigen noch Verharmlosung der Risiken oder Panikmache unterstützen. Die Veranstalter erhoffen sich, zur Versachlichung der öffentlichen Diskussion beizutragen und irrationale

Beiträge zur Problematik könnten sein:

Die Entdeckung der natürlichen Radioaktivität durch Henri Becquerel

Irrungen und Wirrungen im Bemühen um die Begrenzung des Strahlenrisikos

Der Reaktortyp in Tschernobyl und die Ursachen der Katastrophe

Unvermeidbare und vermeidbare Folgen der Tschernobylkatastrophe

Von der Rationalität des Irrationalen

Historische Entwicklung und Stand der Erkenntnisse über die biologische Strahlenwirkung, offene Probleme

Strahlungsbedingte Spätfolgen der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki

Empirische Befunde zur Wirkung kleiner Strahlendosen

Radioaktivität als klinisch-medizinisches Instrumentarium

Strahlungs- und Populationsgenetik

Risiken der Beseitigung radioaktiver Abfälle

Gefahrenpotential und Sicherheit kerntechnischer Anlagen

Logistik bei Havarien in Kernenergieanlagen

Verhinderung des militärischen Mißbrauchs ziviler Kernenergienutzung

Konversion der Atomwaffen (Vernichtung von Kernsprengsteoffen)

Kernenergie, Ökologie und nachhaltige Entwicklung

Individuelle und kollektive Risikowahrnehmung aus soziologischer Sicht

Aberglaube und Mystik in der Risikodiskussion

Die Autorität der Wissenschaft in Wechselwirkung zu der des Staates

Das Vorhaben wird vorbereitet von:
Helmut Abel, Prenzlauer Allee 117, 10409 Berlin
Karl Friedrich Alexander, Greifswalder Straße 87, 10409 Berlin

Stiftung der Freunde der Leibniz-Sozietät in Vorbereitung

Auf Anregung von Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Öffentlichkeit wird eine Stiftung zur Förderung der Tätigkeit der Leibniz-Sozietät vorbereitet. Ihre Bereitschaft zur Mitarbeit im Kuratorium der künftigen Stiftung haben u.a. Prof. Dr. Horst Klinkmann, letzter Präsidenten der Akademie der Wissenschaften der DDR, und Rechtsanwalt Dr. Peter-Michael Diestel erklärt.

Der Entwurf der Satzung hat folgenden Wortlaut:

Satzung für die Stiftung der Freunde der Leibniz-Sozietät e.V.

§ 1 Name, Sitz, Geschäftsjahr

1. Die am ..... errichtete Stiftung trägt den Namen „Stiftung der Freunde der Leibniz-Sozietät e.V.".
2. Die Stiftung ist als nicht rechtsfähige Stiftung bei der Leibniz-Sozietät e.V. von im Bereich der Wissenschaften tätigen Persönlichkeiten errichtet. Das Stiftungsvermögen wird von der Leibniz-Sozietät e.V. als Stiftungsträger treuhänderisch verwaltet.
3. Sitz der Stiftung ist der Sitz der Leibniz-Sozietät e.V.
4. Das Geschäftsjahr ist das Kalenderjahr.

§ 2 Zweck der Stiftung

Die Stiftung verfolgt den Zweck, die wissenschaftlichen Aktivitäten der Leibniz-Sozietät e.V., die in Fortführung der Tradition der von Gottfried Wilhelm Leibniz gegründeten Gelehrtengesellschaft

- der Pflege und Förderung der Wissenschaft,
- der disziplinären wie interdisziplinären Forschung und Diskussion und der Publikation der Forschungsergebnisse ihrer Mitglieder sowie
- der Popularisierung der Wissenschaften

dienen,

durch Mittelzuwendung sowie durch Herstellen und der Pflege der notwendigen Verbindungen zwischen Wissenschaft und Allgemeinheit zu fördern.

§ 3 Mitgliedschaft im Fördererkreis der Stiftung

1. Dem Fördererkreis können alle am Stiftungszweck interessierten natürlichen und juristischen Personen, Personengesellschaften und nicht rechtsfähigen Vereine als Stifter beitreten. Über die Aufnahme entscheidet das Kuratorium.
2. Mit dem schriftlich zu stellenden Aufnahmeantrag wird zugleich die Bereitschaft erklärt, zur Mittelaufbringung der Stiftung entsprechend der Beitragsregelung beizutragen.
3. Der Austritt steht jedem Mitglied des Fördererkreises zum Ende eines Geschäftsjahres frei. Er ist schriftlich 6 Monate vor Schluß des Geschäftsjahres dem Geschäftsführer gegenüber zu erklären.
4. Durch Beschluß des Fördererkreises können einzelne Mitglieder aus dem Fördererkreis ausgeschlossen werden, wenn sie sich gegenüber der Stiftung bzw. dem Fördererkreis schädigend verhalten haben oder mit ihren Beiträgen im Rückstand sind.
5. Endet die Zugehörigkeit zum Fördererkreis, so ist eine Rückzahlung der Zuwendungen wie auch jede Art von Ansprüchen gegenüber dem Stiftungsvermögen ausgeschlossen.

§ 4 Mittelaufbringung und -verwendung

1. Die für das Erreichen des Stiftungszwecks erforderlichen Mittel werden durch regelmäßige Beiträge der Mitglieder des Fördererkreises, besonders durch Zuwendungen und Spenden aufgebracht.
2. Für die Bemessung der Beiträge kann der Förderkreis auf Vorschlag des Kuratoriums Anhaltspunkte festlegen.
3. Die Mittel der Stiftung dienen ausschließlich den Stiftungszwecken.

§ 5 Bestellung und Aufgaben des Geschäftsführers der Stiftung

1. Geschäftsführer der Stiftung ist .... Das Kuratorium bestellt bei Bedarf einen Vertreter für den Geschäftsführer.
2. Der Geschäftsführer führt die Geschäfte der Stiftung allein. Soweit die Mitwirkung der Leibniz-Sozietät e.V. erforderlich ist, wirkt er mit dem Schatzmeister der Leibniz-Sozietät e.V. oder einem anderen, von der Leibniz-Sozietät e.V. benannten Vorstandsmitglied zusammen.
3. Der Geschäftsführer hat im Einvernehmen mit dem Kuratorium der Stiftung den jährlichen Haushaltsplan aufzustellen. Ihm obliegt insbesondere die Einstellung und Entlassung von aus Mitteln der Stiftung

bezahlten Angestellten. Er ist zur Berichterstattung an den Fördererkreis und an das Kuratorium verpflichtet.

4. Bei Geschäften, für die der Haushaltsplan der Stiftung keine Deckung enthält, bedarf der Geschäftsführer der Einwilligung des Kuratoriums.

§ 6 Das Kuratorium der Stiftung

1. Das Kuratorium besteht aus bis zu 9 auf 3 Jahre vom Fördererkreis gewählten Personen sowie dem Geschäftsführer. Der jeweilige Schatzmeister der Leibniz-Sozietät e.V. hat das Recht, an den Sitzungen des Kuratoriums ohne Stimmrecht teilzunehmen. Für die gewählten Mitglieder ist Wiederwahl zulässig. Sind bei Ablauf der Amtszeit die neuen Mitglieder noch nicht gewählt, führen die bisherigen ihre Ämter bis zur Neuwahl weiter.

2. Das Kuratorium wählt aus seiner Mitte einen Vorsitzenden und dessen Stellvertreter; der Geschäftsführer sowie der Schatzmeister der Leibniz-Sozietät e.V. sind nicht wählbar.

3. Der Vorsitzende des Kuratoriums, bei dessen Verhinderung ein Stellvertreter, lädt zu den Sitzungen des Kuratoriums ein und leitet sie.

4. Das Kuratorium beschließt mit einfacher Mehrheit der abgegebenen Stimmen. Bei Stimmengleichheit gibt die Stimme des Vorsitzenden den Ausschlag. Schriftliche, telefonische und fernschriftliche Beschlußfassung ist möglich, sofern kein Kuratoriumsmitglied dem widerspricht.

6. Die Ergebnisse der Sitzungen des Kuratoriums sind in einer Niederschrift festzuhalten, die der Vorsitzende und der vom Kuratorium zu bestimmende Protokollführer unterzeichnet.

§ 7 Fördererkreis der Stiftung

1. Die Gemeinschaft der Stifter bildet den Fördererkreis. Er nimmt die Interessen der Stifter wahr, soweit nichts anderes geregelt ist.

2. Der Fördererkreis ist vom Geschäftsführer einmal jährlich im Benehmen mit dem Vorsitzenden des Kuratoriums einzuberufen. Ferner hat der Geschäftsführer den Fördererkreis einzuberufen, wenn mindestens zwei Drittel seiner Mitglieder oder das Kuratorium es verlangen. Die Einberufung der Mitglieder des Fördererkreises hat mindestens vier Wochen vor dem Versammlungstermin unter Bekanntgabe der Tagesordnung schriftlich zu erfolgen.

3. Dem Fördererkreis obliegt:

a) die Wahl der Mitglieder des Kuratoriums;
b) die Wahl des Rechnungsprüfers;
c) die Beschlußfassung über Satzungsänderungen, den Ausschluß von Mitgliedern und die Auflösung des Fördererkreises;
d) die Regelung der Beiträge;
e) die Beschlußfassung über die Entlastung von Geschäftsführer und Kuratorium;
f) die Stellungnahme zu den ihm vom Geschäftsführer oder Kuratorium unterbreiteten Fragen;
g) Änderungen der mit der Leibniz-Sozietät e.V. abgeschlossenen Treuhandvereinbarung.

4. Der Fördererkreis nimmt den Bericht des Geschäftsführers und des Kuratoriums entgegen über

a) die Tätigkeit der Stiftung,
b) die finanzielle Entwicklung im abgelaufenen Geschäftsjahr und die geschäftliche Lage im Berichtszeitraum,
c) die geplante Tätigkeit der Stiftung im laufenden Geschäftsjahr.

5. Die Leitung der Versammlung der Mitglieder des Fördererkreises obliegt dem Vorsitzenden des Kuratoriums oder dessen Vertreter.

6. Die ordnungsgemäß geladene Versammlung der Mitglieder des Fördererkreises ist beschlußfähig ohne die Rücksicht auf die Zahl der anwesenden Mitglieder.

7 a) Beschlüsse des Fördererkreises über Satzungsänderungen, Ausschluß von Mitgliedern und Auflösung der Stiftung werden mit Zweidrittelmehrheit aller Mitglieder gefaßt.
b) Ist der Fördererkreis zu a) nicht beschlußfähig, ist er innerhalb von 2 Wochen erneut einzuladen. Diese Versammlung der Mitglieder des Fördererkreises kann mit Zweidrittelmehrheit der anwesenden Mitglieder zu a) beschließen.
c) Beschlüsse über sonstige Angelegenheiten werden mit einfacher Mehrheit der Erschienenen gefaßt.

Die Beschlüsse sind schriftlich niederzulegen.

§ 8 Auflösung der Stiftung

1. Die Stiftung wird durch Beschluß der Mitglieder des Fördererkreises gemäß §7 Nr. 7 aufgelöst. Er ist der Leibniz-Sozietät e.V. vom Vorsitzenden des Kuratoriums schriftlich mitzuteilen.

2. Das im Falle der Auflösung vorhandene Vermögen fällt an die Leibniz-Sozietät e.V.; diese hat das Vermögen im Sinne des Stiftungszweckes einzusetzen.

§ 9 Verhältnis zur Leibniz-Sozietät e.V.

1. Die Leibniz-Sozietät e.V. vertritt die Stiftung, soweit dies rechtlich zwingend erforderlich ist. Sie ist an die Treuhandvereinbarung mit der Stiftung gebunden.
2. Aus der Tätigkeit für die Stiftung dürfen der Leibniz-Sozietät e.V. keine finanziellen Belastungen entstehen.
3. Die Beiträge und das sonstige Stiftungsvermögen stehen der Stiftung zur eigenen Bewirtschaftung zu. Die Leibniz-Sozietät e.V. kann sich gegen Nachweis die Kosten von der Stiftung erstatten lassen, die ihr im Zusammenhang mit der Durchführung der Treuhandvereinbarung entstehen.
4. Der Geschäftsführer ist ermächtigt, mit der Leibniz-Sozietät e.V. die erforderlichen Rechtsgeschäfte, insbesondere die Treuhandvereinbarung, abzuschließen und ggf. Änderungen der Treuhandvereinbarung auf Beschluß des Fördererkreises mit der Leibniz-Sozietät e.V. zu verhandeln.

Berlin, den 1995

Entwurf einer Treuhandvereinbarung

zwischen der
Leibniz-Sozietät e.V. und der
Stiftergemeinschaft der Stiftung der Freunde der Leibniz-Sozietät e.V. (im folgenden: „Fördererkreis")

Der Fördererkreis stellt der Stiftung das gesamte Stiftungsvermögen zur Verfügung.

Das Stiftungsvermögen dieser nichtrechtsfähigen Stiftung wird von der Leibniz-Sozietät e.V. gemäß ihrer Satzung treuhänderisch wie folgt gehalten:

1. Das Stiftungsvermögen steht ausschließlich der Stiftung für ihre satzungsmäßigen Zwecke zur Verfügung.

2. Die Leibniz-Sozietät e.V. trifft Verfügungen über das laufende Stiftungsvermögen nur mit Zustimmung des Geschäftsführers der Stiftung. Die laufenden Verwaltungsarbeiten für die Stiftung werden von dieser erledigt. Der Geschäftsführer der Stiftung fordert die benötigten Mittel bei der Leibniz-Sozietät e.V. an und führt den Verwendungsnachweis in der für die Leibniz-Sozietät e.V. erforderlichen Form.

3. Jeweils nach Ablauf eines Kalenderjahres erteilt die Leibniz-Sozietät e.V. der Stiftung eine Abrechnung über die Entwicklung des Stiftungsvermögens. Nach rechtzeitiger Erteilung dieser Abrechnung legt die Stiftung der Leibniz-Sozietät e.V. bis Ende Januar einen mit dieser Abrechnung abgestimmten Rechnungsabschluß vor.

4. Das Budget der Stiftung ist der Leibniz-Sozietät e.V. alsbald nach seiner Verabschiedung mitzuteilen.

5. Die Stiftung stellt der Leibniz-Sozietät e.V. Unterlagen zur Verfügung bzw. gibt Einblick in ihre Unterlagen , soweit die satzungsmäßigen Aufgaben und gesetzlichen Pflichten der Leibniz-Sozietät e.V. es erfordern. Dies gilt sinngemäß im Fall der Prüfung der Leibniz-Sozietät e.V. durch einen Abschlußprüfer und die Finanzbehörde.

6. Die Leibniz-Sozietät e.V. vertritt die Interessen der Stiftung im Einvernehmen mit der Selbstverwaltung der Stiftung gerichtlich und außergerichtlich, soweit diese gesetzlich erforderlich ist.

7. Die Leibniz-Sozietät e.V. kann sich gegen den Nachweis der Kosten von der Stiftung erstatten lassen, die ihr im Zusammenhang mit der Durchführung dieser Treuhandvereinbarung entstehen.

8. Die Beteiligten informieren sich gegenseitig über alle Vorgänge, die Auswirkungen auf das Stiftungsvermögen und den Stiftungszweck haben. Das gilt auch für Vorgänge in der Stiftungsselbstverwaltung. Die Leibniz-Sozietät e.V. erhält zwei Exemplare des jährlichen Tätigkeitsberichtes.

Berlin, den 1995