

Füllstoffe in Kunstharzmassen als Schildmaterial gegen ionisierende Strahlung*

Von K. ELBEL

Feldmühle AG, Werk Wesseling

Der jüngste Zweig der allgemeinen Technologie ist die Kerntechnik. Es ist deshalb nicht verwunderlich, wenn im Reaktorbau und in der Anwendungstechnik radioaktiver Isotope alle bisher bekannten Werkstoffe völlig unvoreingenommen auf ihre Eignung geprüft wurden.

Es ist deshalb auch verständlich, wenn von Anfang an die Kunststoffe in der Kerntechnik breiten Eingang gefunden haben, obwohl sie, insgesamt gesehen, zu den weniger strahlenbeständigen Stoffen gehören. Es würde zu weit führen, an dieser Stelle auch nur einen Teil der Kunststoffe und deren Verwendung in der Kerntechnik

zu behandeln. Dazu ist das Gebiet in jeder Hinsicht zu komplex**.

Mein Vortrag hat den Einsatz gefüllter Kunststoffe als Schildmaterial gegen ionisierende Strahlen zum Thema. Selbst dieses Einsatzgebiet ist außerordentlich vielfältig und stellt derartig viele neuartige Aufgaben, daß ich mich auf einige wenige Beispiele beschränken muß. Zunächst seien die Strahlen geringer Eindringtiefe, beispielsweise α - und β -Strahlen, vernachlässigt, da diese normalerweise bereits von relativ geringen Schich-

* Vortrag, gehalten am 3. Symposium über makromolekulare Chemie, veranstaltet durch den Schweizerischen Chemiker-Verband an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich am 16./17. Oktober 1964.

** In diesem Zusammenhang sei auf die Informationsschrift *Kunststoffe, ihr Wesen und Verhalten gegenüber ionisierender Strahlung*, herausgegeben vom Deutschen Atomforum e. V., und auf das Buch *Werkstoffe der Kerntechnik* aus dem Deutschen Verlag der Wissenschaften, Berlin, verwiesen. Beide Schriften enthalten auch umfassende Literaturverzeichnisse.

Tabelle 1. Die energiereichen Strahlenarten

Strahlenart	Ladung	Ruhemasse	Energie	Reichweite für 2 MeV-Teilchen in	
				Luft	Wasser
Röntgen-Quanten	0	0	weiche: < 100 KeV harte: > 100 KeV	viele m	Halbwertsdicke 14 cm
Gamma-Quanten	0	0	> 500 KeV	viele m	
Neutronen	0	1	thermische: 0,025 eV epithermische: 0,025 eV bis 1 MeV schnelle: > 1 MeV	viele m	mehrere m
β -Teilchen (Elektronen)	1	1/1824	beschleunigte: bis zu 30 MeV aus radioaktivem Zerfall: bis zu mehreren MeV	mehrere m	0,9 cm
Protonen	1	1	beschleunigte: 1 bis 100 MeV	7,0 cm	74 μ
Deuteronen	1	2	beschleunigte: 1 bis 100 MeV	4,5 cm	48 μ
α -Teilchen	2	4	aus radioaktivem Zerfall: einige MeV beschleunigte: bis zu 100 MeV	1 cm	12 μ
Energereiche Folgekerne aus Kernreaktionen	1 bis etwa 20	~ 100	einige MeV bis zu ~ 80 MeV	bis zu einigen cm	< 0,1 mm

ten ungefüllter Kunststoffe absorbiert werden. Auch die verhältnismäßig schwachen Röntgenstrahlen der medizinischen Diagnostik sollen hier nicht behandelt werden, denn die dort auftretenden Abschirmprobleme werden seit Jahrzehnten beherrscht, wenn auch zum Teil wenig zufriedenstellend.

Tabelle 1 zeigt, daß die hier zu behandelnden Strahlenarten, nämlich epithermische und schnelle Neutronen, thermische Neutronen und Gamma-Strahlen, die größten Reichweiten besitzen und damit am schwierigsten

abzuschirmen sind. Der Hauptgrund für die große Reichweite dieser Strahlen ist das Fehlen jeglicher Ladung.

Die Energie der in Reaktoren vorkommenden Gamma-Strahlung beträgt etwa 0,5 bis 10 MeV. Für ihre Schwächung bzw. Absorption sind im wesentlichen drei Vorgänge verantwortlich, nämlich der photoelektrische Effekt, die Paarerzeugung und die Compton-Streuung. Solche Stoffe haben den höchsten Absorptionswirkungsquerschnitt für Gamma-Strahlen, deren Elektronendichte und damit Kernladungszahl und Dichte möglichst hoch liegen. In Abb. 1 ist dies zu erkennen.

Der in diesem Diagramm gezeigte Energiebereich deckt sich etwa mit den in Reaktoren vorkommenden Gamma-Energien. Durch die logarithmische Teilung des in der Ordinate aufgetragenen Absorptionskoeffizienten wird die starke Abhängigkeit der Absorption von der Dichte deutlich erkennbar; diese Abhängigkeit kann z. B. zwischen Al und Pb im Bereiche hoher Energie eine Zehnerpotenz betragen, im Bereiche niedriger Energien sogar bis zu zwei Größenordnungen. Deutlich wird aber auch aus diesem Diagramm, daß die Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten vom Energieinhalt der Gamma-Quanten nicht linear verläuft und bei den Elementen mit hoher Kernladungszahl bei etwa 3 MeV ein ausgeprägtes Minimum besitzt. Diese Tatsache resultiert aus dem verschiedenen hohen Anteil der vorhin genannten drei für die Absorption verantwortlichen Effekte an der Gesamtabsorption in Abhängigkeit von der Gamma-Energie. Diese Abhängigkeit zeigt Abb. 2.

Hier ist auf der Ordinate der Absorptionskoeffizient linear aufgetragen, wodurch das Minimum der Gesamtabsorption deutlicher wird als in Abb. 1. Die Abszisse, wie im vorigen Bild in MeV unterteilt, umfaßt hier einen größeren Bereich. Die unterbrochene Linie gibt die Gesamtabsorption und die durchgezogenen Linien ihre Bestandteile wieder. Man erkennt, daß bei 0,5 MeV, bei der unteren Grenze des interessierenden Gamma-Energie-Spektrums, photoelektrischer Effekt

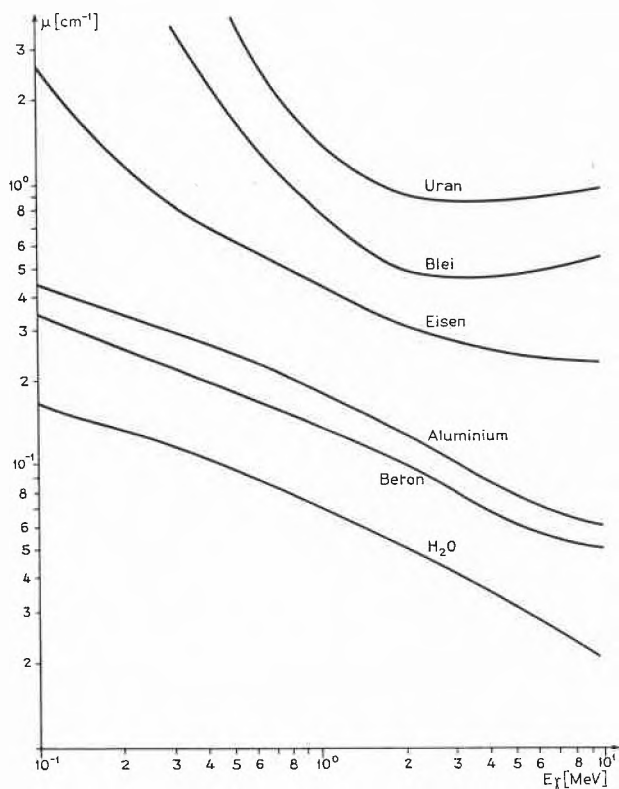


Abb. 1. Absorptionskoeffizient für γ -Strahlung in Abhängigkeit von der Energie

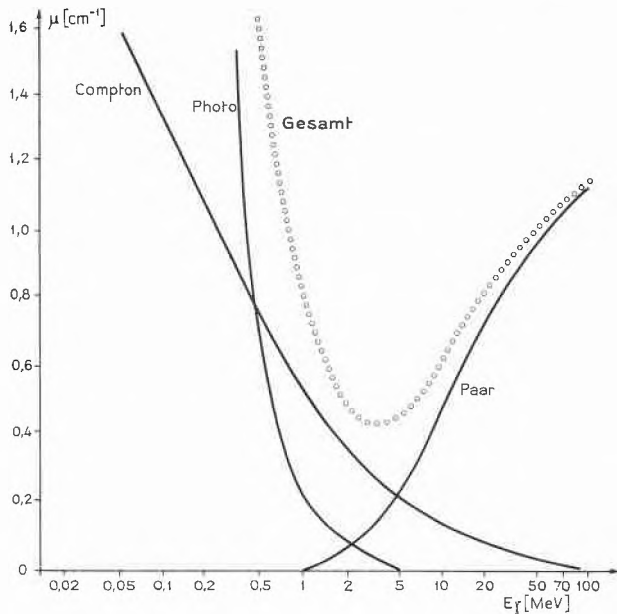


Abb. 2. Der Absorptionskoeffizient von γ -Strahlen in Blei. Die unterbrochene Linie gibt die Gesamtabsorption wieder, die durchgezogenen Linien zeigen ihre Bestandteile

und Compton-Streuung sich die Waage halten. Beide Bestandteile der Gamma-Schwächung nehmen dann mit steigender Energie rasch ab, so daß die Paarerzeugung, die erst ab 1,02 MeV Gamma-Energie möglich ist, bei der oberen Grenze des für Kernreaktoren in Frage kommenden Gamma-Energie-Spektrums, also bei etwa 10 MeV, bereits bei weitem überwiegt. Entsprechende, ähnlich Kurvenbilder ergeben sich auch für die anderen schweren Elemente.

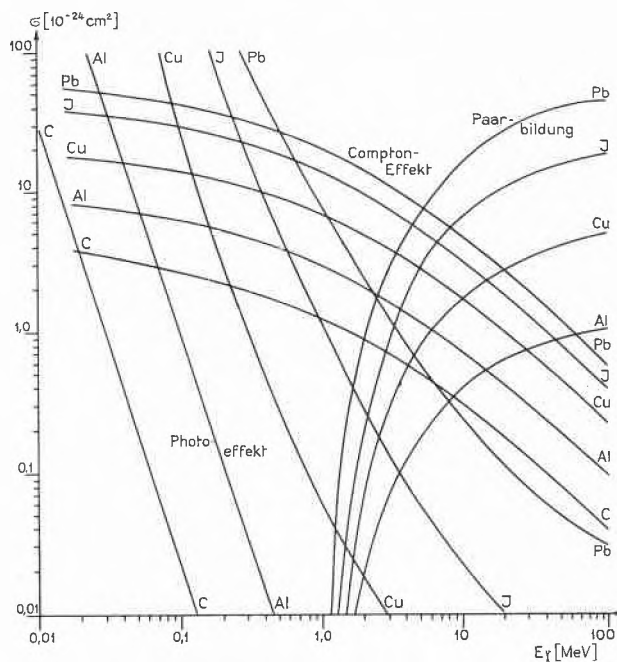


Abb. 3. Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes für Photoabsorption, Compton-Streuung und Paarbildung von der Energie der Gamma-Strahlung für Materialien verschiedener Kernladungszahl

Abb. 3 zeigt die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes für Photoabsorption, Compton-Streuung und Paarbildung von der Energie der Gamma-Strahlung für Materialien verschiedener Kernladungszahl. Die in diesem Diagramm gezeigten Kurvenscharen machen nun die Gesetzmäßigkeit bei der Gamma-Absorption deutlich und zeigen nochmals, daß der Absorptionswirkungsquerschnitt mit wachsender Kernladungszahl zunimmt.

Kunststoffe selbst besitzen wegen der niedrigen Kernladungszahlen der sie aufbauenden Elemente eine zwar nachweisbare, technisch jedoch uninteressant niedrige Absorption für Gamma-Strahlen. Um Schildmaterialien gegen Gamma-Strahlung auf Kunstharzbasis herzustellen, die technologisch interessant sind, müssen Füllstoffe ausgewählt werden, die eine möglichst hohe Kernladungszahl mit hoher Dichte vereinigen. Mit einer Kernladungszahl von 82 und einer Dichte von 11,3 bietet sich Blei als Schildmaterial gegen Röntgen- und Gamma-Strahlen an. Darum sind mit Bleipulver gefüllte Gummiprodukte, beispielsweise Schürzen und Handschuhe, seit langem bekannt.

In Abb. 4 sind die Meßergebnisse an mit Bleipulver gefüllten und mit Glasseidengewebe verstärkten Epoxidharzplatten dargestellt und mit Blei und Eisen verglichen. Als Gamma-Strahler wurden hier Cr^{51} mit einer Gamma-Energie von 324 KeV, Cs^{137} mit einer Gamma-Energie von 661 KeV und Co^{60} mit einer mittleren Gamma-Energie von 1,25 MeV benutzt. In der Bildlegende ist eine Aufschlüsselung der Zusammensetzung der beiden Proben gegeben. Bei der Probe 1 mit etwa 46 Volumenprozent Bleigehalt wird der Absorptionskoeffizient erwartungsgemäß etwa halb so groß gefunden wie bei reinem Blei. Entsprechend ist bei Probe 2 mit 19,5 Volumenprozent Blei die Absorption nur noch knapp ein Viertel derjenigen von Blei. Die Tatsache, daß die Probe 2 etwas mehr als einen Fünftel des Absorptionskoeffizienten von Blei hat, was dem effektiven Bleigehalt entsprechen würde, und daß der Kurvenzug der Probe 1 nicht parallel zu demjenigen des reinen Bleis verschoben ist, ist darauf zurückzuführen, daß die in den gefüllten und verstärkten Kunststoffen neben Blei enthaltenen Elemente ebenfalls an der Absorption teilnehmen.

Ferner ist in diesem Bild ein Vergleich mit der Gamma-Absorption des Eisens interessant. Trotz des höheren spezifischen Gewichtes ist die Absorption des Eisens derjenigen der Probe 1 nicht überlegen. Es ist zu erwarten – die Messungen konnten noch nicht durchgeführt werden –, daß bei Gamma-Energien über 3 bis 4 MeV die Kurven sich wieder schneiden werden und dort Kunstharzmaterialien entsprechend der Probe 1 eine bessere Absorptionswirkung zeigen als das spezifisch schwerere Eisen. Bemerkenswert ist auch, daß die Probe 2 mit einer Dichte von nur 3,2 bei Gamma-Energien unter 300 KeV offensichtlich genauso gut und besser zu absorbieren scheint als Eisen.

Die Festigkeitseigenschaften eines gefüllten Kunststoffes hängen von dem Volumen an inkorporiertem Füllstoff ab, nicht von dessen Gewichtsmenge. Pulver von

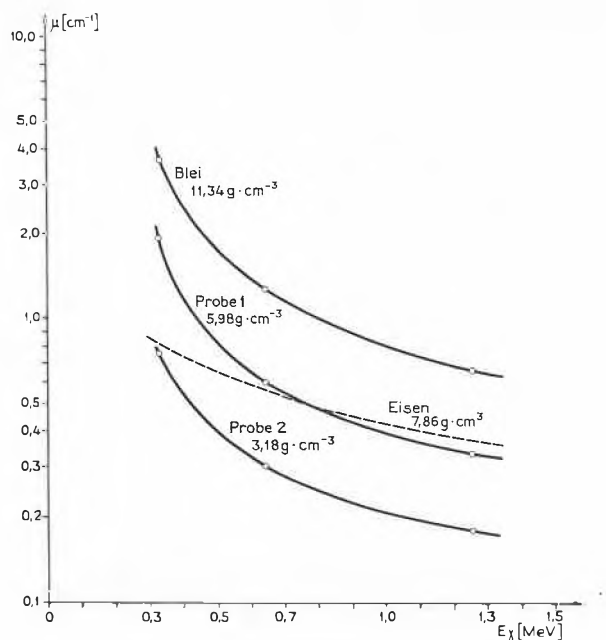


Abb. 4. Absorptionskoeffizienten bleigefüllter Kunstharze für γ -Strahlung

	Probe 1 Gewichts- prozent	Volumen- prozent	Probe 2 Gewichts- prozent	Volumen- prozent
Bleipulver	87,6	45,7	65,5	19,5
Epoxidharz	9,9	48,4	19,7	60,5
Glasseide	2,5	5,9	14,8	19,9

Metallen, die eine dem Blei ähnliche Ordnungszahl, jedoch ein höheres spezifisches Gewicht besitzen, sind deshalb für Schildzwecke als Kunstharzfüllstoffe geeigneter.

Tabelle 2 zeigt die dem Blei benachbarten Elemente, geordnet nach steigender Ordnungszahl, die spezifischen Gewichte und die ungefähren Kilopreise in DM. Die Platinmetalle, Quecksilber und die stark strahlenden Elemente zwischen Wismut und Uran kommen von vornherein nicht in Betracht. Beim Vergleich der spezifischen Gewichte fallen Wolfram und Uran auf. Tatsächlich sind abgereichertes Uran und Wolfram als Schildmaterialien gegen Gamma-Strahlen bereits vorgeschlagen bzw. angewendet worden. Bekannt ist, daß für die britische Atomenergiebehörde mit Wolfram ge-

füllter Gummi als elastisches Abschirmmaterial hergestellt worden ist, und zwar mit durchschnittlichen Dichten von bis zu 11 g/cm³. Ein solches Material dürfte trotz der niedrigeren Ordnungszahl des Wolframs einen dicht an Blei herankommenden Absorptionsquerschnitt haben. Abgereichertes Uran, d.h. praktisch reines U238 (mit einer Halbwertszeit von 4,5 · 10⁹ Jahren und einer schwachen Gamma-Eigenstrahlung von 48 KeV, einer α -Strahlung von 4,19 MeV), mit der Ordnungszahl 92 und der Dichte 19 würde – mit 45 bis 55 Volumenprozent in Kunstharzen als Füllstoff enthalten – Schildmaterialien geben, die einen reinem Blei mindestens entsprechenden Absorptionswirkungsquerschnitt für Gamma-Strahlung besitzen.

Da Blei ein – technologisch gesehen – unsympathischer Werkstoff ist, der keine selbsttragenden Eigenschaften hat und deshalb bei Abschirmungen kräftiger und aufwendiger Stützkonstruktionen bedarf, ist es kein Wunder, wenn die Kerntechnik bei verschiedenen Anwendungsfällen auf zum Teil wesentlich teurere Werkstoffe ausweicht. Manche Verfahren und Verfahrensschritte werden erst durch solche neuen und – landläufig betrachtet – teuren Werkstoffe möglich, wie nachher bei thermischen Neutronen gezeigt wird.

Tabelle 3 zeigt eine Gegenüberstellung der wichtigsten technologischen Eigenschaften verschiedener Werkstoffe, verglichen mit dem schwach glasseidenverstärkten und mit Bleipulver gefüllten Epoxidharzmaterial der Probe 1, jenem Material, das etwa 50% der Halbwertsdicke von Blei besitzt, zumindest im Gamma-Energiebereich von 0,3 bis 1,5 MeV, wie oben in Abb. 4 gezeigt wurde. Daß solche Schildmaterialien mit einem Füllstoffgehalt von 40 bis 50 Volumenprozent – wobei dieser Füllstoff in bezug auf die Festigkeitseigenschaften keinesfalls als positiv angesehen werden kann –, daß solche Schildmaterialien trotzdem durchaus selbsttragende Funktionen ausüben können, zeigt ein Vergleich der Eigenschaften der Probe 1 mit denen für als Konstruktionswerkstoffe bekannten Hartgewebe.

Die beim Hartgewebe angegebenen Zahlen stellen Mindestwerte dar, die meist merklich überschritten werden, doch sind andererseits die Werte für das Schildmaterial auf Epoxidharzbasis an Kleinstäben ermittelt worden. Es ist bekannt, daß bei Verwendung der großen Normstäbe meist höhere Werte erhalten werden.

Tabelle 2. Metalle hoher Ordnungszahl

	Ordnungszahl	Spezifisches Gewicht	Ungefähre Preise in DM pro kg	
Wolfram	74	19,32	50,-	bis 70,-
Platinmetalle und Quecksilber	75 bis 80			
Thallium	81	11,84	80,-	bis 120,-
Blei	82	11,34	2,30	bis 3,10
Wismut	83	9,85	35,-	bis 45,-
Stark strahlende Elemente	84 bis 89 und 91			
Thorium	90	11,71	800,-	bis 1000,-
Abgereichertes Uran	92	18,95	< 50,-	bis 80,-

Tabelle 3. Gegenüberstellung der Festigkeitseigenschaften

Material	Wärmeformbeständigkeit in °C	Biegefestigkeit in kp · cm ⁻²	Zugfestigkeit in kp · cm ⁻²	Schlagzähigkeit in kp · cm · cm ⁻²
Probe 1	250 bis > 260 ¹	900–1100 ²	500–700 ³	27–33 ²
Reiblei	($F_p = 327$)	–	150	–
Hartblei (11% Sb)	($F_p \sim 295$)	–	562	–
Alu-Legierungen	–	700–1800	700–2500	40
Steatit	–	980	700	2,2
Gußeisen	–	3 000	1200	10–15
Polystyrol	70–80	900–1000	450–550	17–22
Acrylglas	100 ⁴	1 000	700	20
Hartgewebe	125	1 000	500	25
Celluloid	60	600	400–600	100–200
Polyamide	60–230 ⁴	270	430	–
Polyester mit 70% Glas	150	10 000	8400	156
desgleichen mit 35% Glas	150	2 000	1400–2000	45

¹ Nach MARTENS an Normkleinstab.² An Normkleinstab.³ An Schulterstab nach DIN.⁴ Nach VICAT.

Das Schildmaterial hält sogar, wenn man von der Hitzebeständigkeit absieht, einen Vergleich mit Aluminiumlegierungen aus. Blei ist selbst in thermischer Hinsicht unterlegen, da die bleigefüllten Epoxidharz-Formkörper kurzzeitig Temperaturen von 500 bis 1000 °C ausgesetzt werden können, ohne ihre Funktion als Schildmaterial zu verlieren.

Es hat sich bei unseren Versuchen gezeigt, daß Pb₃O₄ als Füllstoff für Epoxidharze ungeeignet ist und deshalb, trotz seines gegenüber Blei wesentlich höheren Schmelzpunktes, als Füllstoff leider nicht in Frage kommt. Derzeit untersuchen wir andere Verbindungen mit hohem Bleigehalt und Schmelzpunkt.

Neutronen sind ungeladene Teilchen mit der Ruhemasse 1. Sie werden von Atomkernen eingefangen, wobei der angeregte Zwischenkern meist unter Photonenemission in einen stabileren Zustand übergeht. Bei der häufigsten dieser Einfangreaktionen, der (n, γ)-Reaktion, wird ein langsames oder thermisches Neutron von einem Kern absorbiert. Der dadurch entstehende angeregte Zwischenkern gibt seine Überschussenergie als Gamma-Strahl ab. Wichtig ist auch die (n, α)-Reaktion, bei der der Zwischenkern sich unter Abgabe eines α -Teilchens stabilisiert.

Die für den Neutroneneinfang in der Kerntechnik am meisten verwendeten Elemente sind Lithium, Bor, Cadmium und, trotz des hohen Preises, für Sonderfälle Gadolinium. Die genannten Elemente werden entweder als solche oder in Form ihrer Verbindungen direkt als Bleche oder als Zusatzstoffe zu Beton, Kunststoffen, Wasser usw. eingesetzt. Der Absorptionseffizienzwirkungsquerschnitt für thermische Neutronen beträgt bei Gadolinium 46 617, bei Cadmium 2537, bei Bor 762, bei dem Borisotop B10: 4017 und bei Lithium 70,4.

Unter den Genannten stehen bezüglich ihrer Anwendungshäufigkeit Bor und Cadmium an der Spitze. Beide sind, einschließlich ihrer Verbindungen, relativ preiswert und gut zugänglich. Cadmium besitzt den höheren Absorptionseffizienzwirkungsquerschnitt, sendet jedoch gegen-

über Bor wesentlich energiereichere Gamma-Photonen als Sekundärstrahlung aus. Während Cadmium durch eine Einfang- γ -Strahlung von 3 bis 5 MeV gekennzeichnet ist, besitzt Bor eine solche von nur 0,48 MeV. Dort, wo die Gamma-Strahlung in Kauf genommen werden kann, wird man also auf Cadmium als neutronenabsorbierendes Mittel zurückgreifen, während man dort, wo es auf einen biologischen Schutz ankommt, Bor den Vorzug geben wird.

Als Füllstoff in Beton, Aluminium und Kunstharzen eignet sich vornehmlich Borcarbid, dessen Borgehalt 77 bis 79% beträgt. Der makroskopische Absorptionseffizienzwirkungsquerschnitt ist $\Sigma a = 81 \cdot \text{cm}^{-1}$ gegenüber $\Sigma a = 96 \cdot \text{cm}^{-1}$ bei reinem Bor und $\Sigma a = 111 \cdot \text{cm}^{-1}$ bei Cadmium.

Der Neutroneneinfang bei Bor geschieht im wesentlichen über eine (n, α)-Reaktion. Überraschend ist, daß das bei dieser Reaktion entstehende Helium nahezu quantitativ in das Kristallgitter des Borcarbids eingebaut wird.

Es ist uns gelungen, Epoxidharzplatten mit einem Anteil von 62 bis 65 Gewichtsprozent Borcarbid und einer Glasseidengewebematte pro mm Plattenstärke und mit den gleichen Festigkeitseigenschaften herzustellen, wie sie die obenerwähnten Platten mit Bleipulverfüllung haben.

Das Raumgewicht der mit Blei gefüllten Preßstücke liegt bei 5,98 g · cm⁻³, das der mit B₄C-Füllung bei 1,92. Die Wärmeleitfähigkeit der erstgenannten beträgt

$$0,998 \text{ bis } 1,072 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{grd}}$$

die der mit B₄C hergestellten Formkörper

$$0,851 \text{ bis } 0,899 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{grd}}$$

Ähnliche Produkte sind aus der Literatur und der Praxis bereits bekanntgeworden. Die Herstellung und auch die Wiederaufbereitung von Brennstoffen wird zum Teil über die gemischten Uran- und Plutoniumnitrate ausgeführt. In zahlreichen engen und dicht beieinanderstehenden Behältern werden die salpetersauren Lösun-

gen der Nitrate gelagert und behandelt. Eine solche Anordnung stellt bei ausreichendem Füllungsgrad der Behälter quasi eine Atombombe dar, weil die kritische Masse überschritten wird. Aus diesem Grunde sind in Großbritannien die Behälter zunächst mit Polyäthylenblöcken umkleidet, um die Neutronen auf thermische Energie abzubremesen. Das Absorbieren der so verlangsamten Neutronen könnte hier mit Cadmiumblech vorgenommen werden, da die harte Gamma-Sekundärstrahlung nicht stört. Cadmiumblech ist jedoch ungeeignet, da bei einem Leck die Salpetersäure das Blech zerfressen und die Anlage kritisch würde. Aus diesem Grunde wurde Epoxidharz mit Cadmiumoxid gefüllt. Versuche ergaben hier, daß mit Cadmiumoxid gefülltes Harz bessere mechanische Festigkeitseigenschaften aufweist als ein mit Cadmumpulver gefülltes System. Nach Angaben der britischen Atomenergiebehörde enthalten die Epoxidgießharze 1 g Cd pro cm^3 . Die Biegefestigkeit der Platten liegt bei $880 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2}$, die Wärmestandfestigkeit bei $123,5^\circ\text{C}$. Der Wert für die Schlagzähigkeit nach Izod ist mit $0,86 \text{ kp} \cdot \text{m}$ angegeben.

Weitere Angaben der britischen Atomenergiebehörde betreffen mit Bor 10 gefüllten Gummi für Dichtungen, flexible Verbindungsstücke, Fugenabdichtungen usw. Der Borgehalt von 1,2 g pulverisiertem, metallischem Bor pro cm^3 der Gummimischung liegt ziemlich hoch und entspricht einem makroskopischen Absorptionswirkungsquerschnitt für thermische Neutronen von etwa 40 bis $45 \Sigma a [\text{cm}^{-1}]$.

Eine interessante Patentanmeldung der The Goodyear Tire and Rubber Company beansprucht ein kalt härten des Gießharz auf der Basis von Butadien-Methacrylsäure-Mischpolymerisaten oder Asphaltstoffen oder bekannten anderen Gießharzen, die mit Polyäthylen- oder Polypropylenkugeln hoher Schüttdichte als Füllstoff versehen sind. Diese Anmeldung bezweckt die Herstellung fugenloser Reaktorabschirmungen, zumeist biologischer Schilde, zur Abbremsung schneller Reaktorneutronen auf thermische Energie. Bislang bestehen solche Schilde aus Polyäthylen- oder Polypropylenblöcken von etwa $600 \times 600 \times 300 \text{ mm}$ Kantenlänge. Diese Blöcke werden mehrschichtig in Verbundbauweise auf- und hintereinandergesetzt, untereinander mit Aluminiumnägeln verbunden, und die Wände werden beidseitig mit Stahl abgedeckt und gestützt.

In der Literatur wird Polyäthylen bisher als ein strahlenbeständiger Kunststoff angegeben, dessen mechanische Eigenschaften sich in einem weiten Bereich durch Bestrahlung sogar wünschenswert verbessern. Neuere Untersuchungen, die sich zwangsläufig über mehrere Jahre erstreckten und die bei den Farbwerken Hoechst AG durchgeführt wurden, haben gezeigt, daß Polyäthylen im Langzeitversuch, d.h. also unter Bedingungen der Praxis, nur einen Fünftel bis einen Zehntel der Strahlendosis verträgt, die als Schadendosis im Kurzzeitversuch angegeben wurde. Im Langzeitversuch haben sich Aromaten enthaltende Kunststoffe am besten bewährt, wobei dann keine oder nur unbedeutende Unterschiede zwi-

schen Kurz- und Langzeit-Schadendosis festzustellen waren.

Ein kurzes Wort zu den Kunststoffen selbst sei mir noch gestattet. Die Einwirkung ionisierender Strahlung auf makromolekulare Stoffe stellt den Chemiker vor völlig neue Probleme. Eine Unzahl von Veröffentlichungen befaßt sich bereits mit der Strahlenbeständigkeit bzw. -schädigung von Kunststoffen. Dabei ist es nicht ausgeblieben, daß häufig Widersprüche festzustellen sind. Meist beruhen diese Widersprüche auf Unkenntnis über die Natur der untersuchten Kunststoffe. Wenn ein Autor Epoxidharze als strahlenbeständig beschreibt, ein zweiter Autor findet Äthoxylinharze jedoch als weniger strahlenbeständig, so muß man solche Beurteilungen auf mangelhaftes Teamwork zurückführen. Bei der Vieltätigkeit der verschiedenen Kunstharztypen muß bei solchen Angaben der spezielle chemische Aufbau der Harze bekanntgegeben und in Betracht gezogen werden. Die Fehlschlüsse, die durch Kurzzeitbestrahlung mit sehr hohen Strahlendosen entstehen können, habe ich vorhin am Beispiel des Polyäthylens bereits erwähnt.

Interessant ist nun, daß die von anderen Einsatzgebieten her als besonders beständig bekannten Kunststoffe häufig gegenüber ionisierender Strahlung besonders empfindlich sind, beispielsweise Polytetrafluoräthylen, Silicone und andere. Als allgemeine Richtlinien für eine verbesserte Strahlenbeständigkeit können folgende angesehen werden:

1. möglichst viele aromatische Ringe,
2. diese sollten sich in der Seitenkette befinden,
3. keine quartären Kohlenstoffatome,
4. keine Halogene,
5. keine aliphatischen Äthergruppen,
6. keine aliphatischen Estergruppen,
7. keine aliphatischen Doppelbindungen,
8. keine Polythiogruppen,
9. keine cellulosehaltigen Füllstoffe, während
10. anorganische Füllstoffe die Strahlenbeständigkeit verbessern.

Selbstverständlich dürfen die für die Kerntechnik vorgesehenen Kunststoffe auch keine Spuren von Katalysatoren enthalten, die zu harter und langdauernder Aktivierungsstrahlung Anlaß geben. Hierzu gehören u. a. Mangan, Kobalt, Kalium und Zink.

Die Verwendung der Kunststoffe in der Kerntechnik allgemein ist außerordentlich mannigfaltig. Für die in diesem Vortrag erwähnten gefüllten Kunststoffe als Schildmaterialien, strahlenabsorbierende Dichtungen usw. ist verständlicherweise der Markt heute noch relativ klein und der Absatz diskontinuierlich. Trotzdem werden die hohen Kosten für Einzelfertigungen, besondere Füllstoffe und Kunstharze einschließlich der erforderlichen Entwicklungsarbeiten in Kauf genommen, weil sich, wie am Beispiel der Brennstoffaufbereitungsanlage gezeigt wurde, bestimmte Verfahren oder Geräte nur mit Hilfe solcher Kunstharzsysteme verwirklichen lassen.