

W. EPPRECHT

—

WERKSTOFFKUNDE DER KERntechnik

LEHR- UND HANDBÜCHER
DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

BAND 19

WERKSTOFFKUNDE DER KERNTÉCHNIK

EINE EINFÜHRUNG IN DIE EIGENSCHAFTEN UND PROBLEME
DER KERNREAKTORWERKSTOFFE

von

DR. W. EPPRECHT

Titular-Professor an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich
Abteilung für industrielle Forschung des Institutes für Technische Physik



1961
Springer Basel AG

Nachdruck verboten. Alle Rechte vorbehalten,
insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen und der Reproduktion auf
photostatischem Wege oder durch Mikrofilm.

© Springer Basel AG 1961

Ursprünglich erschienen bei Birkhäuser Verlag Basel 1961.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1961

ISBN 978-3-0348-6888-4

ISBN 978-3-0348-6887-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-0348-6887-7

VORWORT

Das vorliegende Buch ist aus Vorlesungen entstanden, die ich seit 1956 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich über die Theorie der Reaktorwerkstoffe gehalten habe. Die Aufnahme, welche diese Vorlesungen gefunden haben, und das hohe Interesse, welches heute den Eigenschaften der Reaktorwerkstoffe entgegengebracht wird, geben mir den Mut, die Vorlesungen hier in erweiterter Form zu veröffentlichen.

Als man daran ging, Kernreaktoren technisch zu verwirklichen, wurde erkannt, dass sich infolge der in ihnen herrschenden speziellen Betriebsbedingungen die Eigenschaften der Werkstoffe zum Teil verändern. Zudem stellte man bei Spaltstoffmetallen merkwürdige, irreversible Formänderungen fest. Es kam daher insbesondere in Ingenieurkreisen die Ansicht auf, dass für die Reaktortechnik eine vollkommen neue Werkstoffwissenschaft gelte. Dies ist indessen nicht der Fall, denn die auftauchenden Phänomene sind zum mindesten ihrer Natur nach in der herkömmlichen Metallkunde bereits bekannt gewesen. Die augenfälligen Erscheinungen traten jedoch infolge von zwei besonderen Umständen erstmals in grösserem Umfange auf: erstens hat man es bei früher gebauten Maschinen und Einrichtungen immer vermieden, Werkstoffe einzusetzen, welche ein extrem ungünstiges Verhalten zeigen. Beim Bau von Kernreaktoren wurde es jedoch aus kernphysikalischen Gründen unumgänglich, metallurgisch gesehen sehr ungeeignete Stoffe, wie zum Beispiel Uran, zu verwenden. Auch wurde es notwendig, früher kaum in grösserem Ausmass verwendete Metalle, wie Zirkon, Beryllium und andere, einzusetzen. Zweitens bewirkt die in Reaktoren auftretende energiereiche Strahlung in allen Materialien mehr oder weniger starke Eigenschaftsveränderungen, von deren Existenz zwar die Festkörperphysiker und Kristallographen schon früher wussten, die indessen bisher nie von technischer Bedeutung waren. Es gilt somit, *schon früher bekannte Gesetze auf bis anhin technisch nicht gebräuchliche Materialien anzuwenden*, und damit auch die stoffkundlichen Kenntnisse zu erweitern.

Zur Meisterung der sich stellenden Materialprobleme genügt es in der Kerntechnik nicht mehr, dass sich nur die Werkstoffspezialisten mit ihnen befassen und zum Beispiel Legierungen mit entsprechenden Eigenschaften entwickeln. Auch die Konstrukteure und sogar die Betriebsleiter fertiger Reaktoren müssen die Probleme und Hintergründe der Materialveränderungen kennen. Nun ist jedoch zum Verständnis des Verhaltens von Werkstoffen mit extremen Eigenschaften (zum Beispiel Uran) und aller Festkörper im Strahlungsfeld eine *eingehende Kenntnis der atomistischen Theorie der Stoffeigenschaften erforderlich*. Alle Materialeigenschaften beruhen ja schlussendlich entweder auf dem Atombau oder der Anordnung und gegenseitigen Bin-

derung der Atome in den Werkstoffen, wobei gerade Atombau, Atomanordnung und -bindung durch Strahlungen verändert werden. Den Ingenieuren fehlen indessen meist eingehendere Kenntnisse hierüber. Zudem ist die heute überholte Ansicht, nach welcher die Metalle homogene, isotrope Stoffe darstellen sollen, vielfach noch tief verwurzelt, muss aber verlassen werden, wenn man ihr Verhalten verstehen will, und zwar nicht nur im Hinblick auf die Kerntechnik.

Die moderne Theorie der Werkstoffeigenschaften ist in einer sehr weit-schichtigen und vielen Interessierten nur schwer zugänglichen Literatur enthalten, insbesondere in derjenigen der Festkörperphysik, Kristallstrukturlehre, physikalischen Metallurgie und Mineralogie. Aus diesem Grunde ist ihr im vorliegenden Buche ein Hauptabschnitt (Kapitel 2) gewidmet, der somit allgemeine Gültigkeit besitzt, jedoch so weit wie möglich Beispiele heranzieht, welche speziell die Kerntechnik interessieren. Dabei wird neben den für den Bau von Kernreaktoren wichtigen Atomeigenschaften vor allem auf die Kristallstrukturlehre und die aus dem gitterartigen Aufbau der kristallisierten Stoffe sich ableitenden Eigenschaften grosses Gewicht gelegt. So wird in diesem Kapitel gezeigt, wie man sich heute auf Grund der Kristallgittertheorie die Festigkeitseigenschaften, die Plastizität, die thermischen Eigenschaften, das Verhalten bei erhöhten Temperaturen usw. erklärt. Die Löslichkeit von Fremdatomen im Kristallgitter leitet sodann von den Struktureigenschaften zu den Mischkristallen, den Mehrstoffsystemen und Legierungen über, welche ihrerseits das Gefüge, die Reaktionen im festen Zustand und die Eigenschaften von chemisch unreinen Stoffen verstehen lassen. Schliesslich werden auch die Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase kurz zusammengestellt, soweit sie die Kerntechnik interessieren, und sodann die Reaktionen zwischen ihnen und festen Werkstoffen — somit das Gebiet der technisch so wichtigen Korrosion — besprochen.

Der zweite Hauptteil (Kapitel 3) führt in die Phänomene ein, welche sich den vorher besprochenen allgemeinen Gesetzmässigkeiten überlagern oder sie modifizieren, wenn energiereiche Strahlen wirken. Dabei wird gezeigt, wie weit man heute das Verhalten der Werkstoffe unter Bestrahlung aus der atomistischen Theorie heraus verstehen kann.

Der Hauptinhalt dieses Buches weicht somit bewusst von anderen Werkstoffbüchern ab, indem nicht wie üblich von den einzelnen Werkstoffarten ausgegangen wird (zum Beispiel Metallen, Speziallegierungen, Kunststoffen usw.), sondern vielmehr von den *Stoffeigenschaften, deren Ursprung und Veränderung unter Bestrahlung beschrieben und erklärt* wird. Die einzelnen Reaktorwerkstoffe sind nur im Schlusskapitel kurz zusammengestellt, da sie in Handbüchern und Spezialwerken bereits mehrfach gesichtet wurden (vgl. Literatur S. 366—378). Es wurde auch absichtlich darauf verzichtet, die Herstellung von Werkstoffen und die Fabrikation wichtiger Konstruktionselemente, zum Beispiel der Spaltstoffelemente, zu behandeln. Das vorliegende Buch soll vielmehr eine gründliche Einarbeit in die Werkstoffprobleme der Kerntechnik ermöglichen. Es wendet sich vor allem an Ingenieure, dane-

ben wird jedoch mancher Abschnitt auch Chemiker, Physiker und Metallurgen interessieren, welche auf dem Gebiete der Kerntechnik arbeiten oder sich mit den in ihr auftretenden Problemen vertraut machen möchten. Vor allem soll es auch Studierenden den Weg zu diesem Spezialgebiet erleichtern. Dabei ist das Buch so abgefasst, dass — entsprechend der sehr verschiedenen Vorbildung der an der Reaktortechnik Interessierten — in den Spezialgebieten, wie Kristallographie, Metallkunde und Reaktorphysik, keine weitgehenden Grundkenntnisse vorausgesetzt werden. Aus diesem Grunde wurde ihm insbesondere als erstes Kapitel eine Einführung in die Reaktorphysik und die Konstruktionsprinzipien einiger Reaktortypen vorangestellt. Das Zurückgreifen auf Grundbegriffe in mehreren Spezialgebieten führt allerdings dazu, dass dem Leser — je nach seinen speziellen Vorkenntnissen — eventuell einzelne Abschnitte überflüssig erscheinen. So wird zum Beispiel für Metallurgen das einführende Kapitel nützlich, für Reaktoringenieure und -physiker indessen uninteressant sein. Demgegenüber werden dem Metallurgen die im Kapitel 2 gemachten Ausführungen weitgehend bekannt sein. Dies lässt sich jedoch nicht vermeiden, weil das vorliegende Buch eine Einführung für möglichst alle jene sein soll, welche einen tieferen Einblick in die sich stellenden Probleme gewinnen möchten.

Es sei an dieser Stelle allen, welche mich in irgendeiner Weise bei der Ausarbeitung dieses Werkes unterstützten, für ihre Mithilfe gedankt, so insbesondere Herrn Prof. E. BAUMANN, dem Leiter des Institutes für Technische Physik an der ETH. Ferner danke ich den Herren Dr. W. ZÜNTI und Prof. Dr. W. HÄLG für die Durchsicht des Manuskriptes und viele wertvolle Anregungen. Zu besonderem Dank bin ich auch den Herren E. BODMER, Winterthur, und Dr. R. AMMANN, Zürich, für die Mitarbeit bei den Korrekturen verpflichtet.

Zürich, im November 1960

W. EPPRECHT

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort.....	5
1. Einführung in die Reaktortechnologie	13
11. <i>Physikalische Grundlagen</i>	13
12. <i>Aufbau und Einteilung einiger wichtiger Kernreaktortypen</i>	20
12.1 Einteilungsprinzipien	20
12.2 Einige wichtige Reaktortypen	21
12.21 Schnelle Reaktoren	21
12.22 Thermische Reaktoren	25
12.221 Homogene thermische Reaktoren	25
12.222 Heterogene thermische Reaktoren	27
2. Für den Reaktorbau wichtige Eigenschaften der Materialien	33
21. <i>Atomeigenschaften</i>	35
21.1 Eigenschaften der Atomkerne und radioaktive Strahlungen	35
21.11 Wirkungsquerschnitte gegenüber Neutronen	35
21.12 Radioaktivität und radioaktive Strahlungen	43
21.121 Allgemeines über die Radioaktivität	43
21.122 γ -Strahlen.....	44
21.123 β -Strahlen	45
21.124 Weitere Strahlenarten	45
21.13 Der Brutvorgang	47
21.2 Eigenschaften, welche in der Elektronenhülle der Atome begründet sind ..	48
21.21 Atom- und Ionengrösse.....	48
21.22 Weitere Atomhülleneigenschaften	50
22. <i>Struktur- und Aggregatseigenschaften von kristallinen Festkörpern.....</i>	51
22.1 Chemische Bindungstypen in Festkörpern und zugehörige Kristallstrukturen	51
22.11 Ionische Bindung.....	51
22.12 Homöopolare Bindung	54
22.13 Metallische Bindung	57
22.14 Van der Waalssche Bindung	60
22.15 Gemischte Bindungen	60
22.2 Die Polymorphie und ihr Einfluss auf die Kristalleigenschaften	60
22.21 Wesen der Polymorphie reiner Stoffe	60
22.22 Einfluss der Polymorphie auf die Festkörpereigenschaften	66
22.3 Die Mischkristalle und ihre Bedeutung für die Kristalleigenschaften.....	69
22.31 Wesen der Mischkristalle	69
22.32 Ausscheidungs- und Auflösungsphänomene.....	75
22.33 Einfluss der Polymorphie und eutektoider Zerfall	76
22.34 Eigenschaftsbeeinflussung durch Mischkristallbildung und durch Ausscheidungsvorgänge	79
22.341 Auswirkungen der reinen Mischkristallbildung	79
22.342 Auswirkungen der Ordnungsprozesse	82
22.343 Die Ausscheidungshärtung	83

22.4	Gitterstörungstypen in Realkristallen	85
22.5	Grundlagen der Festigkeit, Plastizität und Verfestigung	92
22.51	Das Festigkeitsverhalten der Einkristalle	92
22.511	Kompressibilität und Elastizitätsmodul	92
22.512	Elastizitätsgrenze, Gleitelemente, kritische Schubspannung und kritische Normalspannung	96
22.513	Gleitverfestigung und Kornaufteilung	103
22.514	Versetzungstheorie der Plastizität und Verfestigung	106
22.52	Das Festigkeitsverhalten der polykristallinen Materialien	109
22.521	Modifizierung der Einkristallplastizität im Aggregat	109
22.522	Spezifische Festigkeitseigenschaften der Kristallaggregate	110
22.523	Verfestigung und Erhöhung der Reaktionsfähigkeit infolge Kalt- bearbeitung	117
22.524	Kriechen	119
22.6	Der Einfluss der Temperatur auf kristalline Stoffe	125
22.61	Diffusion in kristallinen Stoffen	125
22.611	Selbstdiffusion in Einkristallen	126
22.612	Selbstdiffusion im Vielkristall	129
22.613	Fremdstoffdiffusion	130
22.62	Rekristallisation und Erholung	136
22.621	Rekristallisation	138
22.622	Erholung	141
22.63	Reaktionen im festen Zustand	146
22.64	Wärmedehnung	148
22.641	Allgemeines	148
22.642	Zyklische Wärmebeanspruchung	151
22.7	Wärmeleitfähigkeit und Wärmeübertragung in Festkörpern	159
22.71	Wärmeleitfähigkeit	159
22.72	Wärmeübertragung	161
22.73	Temperaturverteilung und thermische Spannungen in festen Spalt- stoffelementen	162
22.74	Temperaturwechselbeständigkeit	165
22.8	Die elektrische Leitfähigkeit in Festkörpern	167
22.81	Theorie der elektrischen Leitfähigkeit	167
22.82	Beeinflussung der elektrischen Leitfähigkeit durch äussere Einflüsse	173
23.	<i>Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase</i>	176
23.1	Allgemeines	176
23.2	Flüssige Stoffe	176
23.21	Struktur der Flüssigkeiten	176
23.22	Für den Reaktorbau wichtige Eigenschaften der Flüssigkeiten	178
23.221	Thermische Eigenschaften	178
23.222	Dichte und Viskosität	181
23.3	Gase	181
24.	<i>Oberflächenreaktionen von Festkörpern mit Gasen und Flüssigkeiten</i>	183
24.1	Reaktionen von Metallen mit Gasen; Verzunderung	183
24.2	Reaktionen fester Stoffe mit Flüssigkeiten	186
24.21	Reaktionen zwischen einem festen und einem flüssigen Metall.	186
24.22	Chemische Reaktionen zwischen Festkörpern und nichtmetallischen Flüssigkeiten	190
24.23	Elektrochemische Umsetzungen zwischen Festkörpern und Elektro- lytlösungen	191

3. Die Wirkung der Reaktorstrahlungen auf die Materialien	199
31. <i>Natur, Energie und Intensität der in Kernreaktoren auftretenden Strahlungsarten</i>	199
31.1 Strahlungsarten	199
31.2 Energie der verschiedenen Strahlungsarten	200
31.3 Strahlenfluss, integrierte Strahlendosis und Dosimetrie	200
32. <i>Überblick über die Wechselwirkungen zwischen Strahlen und Festkörpern</i>	205
32.1 Das Strahlungspartikel gibt Energie an Elektronen ab	205
32.2 Das Strahlungspartikel kollidiert elastisch mit dem Atomkern	207
32.3 Das Strahlungspartikel reagiert mit dem Atomkern	210
33. <i>Die Störung des Kristallgitters durch Bestrahlung im Kernreaktor und damit verbundene Eigenschaftsveränderungen</i>	213
33.1 Die Natur der durch schnelle Neutronen bewirkten Veränderungen in Kristallgittern	213
33.2 Gitterveränderungen durch Protonen, α -Teilchen, Spaltfragmente, β - und γ -Strahlen	224
33.3 Die auf strahlungsbedingten Gitterstörungen beruhenden Veränderungen der Festkörpereigenschaften in Reaktoren	227
33.31 Der Strahlungseinfluss auf mechanische Eigenschaften	227
33.311 Veränderung der kritischen Schubspannung, Streckgrenze, Zugfestigkeit und Dehnung	228
33.312 Beeinflussung des Elastizitätsmoduls	237
33.313 Kerbzähigkeit	238
33.314 Härte	239
33.315 Kriechen	240
33.316 Einfluss der Vorgeschichte	242
33.317 Einfluss der Bestrahlungstemperatur und nachträglicher Glühbehandlungen	245
33.32 Grösse-, Volumen-, Dichte-, Form- und Gefügeveränderungen	247
33.321 Veränderungen der Kristallgitterdimensionen	248
33.322 Veränderungen der Dichte und der makroskopischen Form	250
33.323 Gefügeveränderungen	270
33.33 Der Einfluss von Bestrahlungen auf die Wärmeleitfähigkeit	273
33.34 Der Strahleneinfluss auf den elektrischen Widerstand	275
33.341 Metalle	276
33.342 Halbleiter	277
33.343 Ionenkristalle	278
33.35 Erhöhung der Gitterenergie durch Bestrahlungen	279
33.36 Thermoelektrische Kraft	282
33.37 Magnetische Eigenschaften	282
33.38 Veränderung des Korrosionsverhaltens durch Reaktorstrahlungen ..	284
34. <i>Erwärmung von Festkörpern durch Strahlen in Kernreaktoren</i>	287
35. <i>Chemische Wirkungen der Strahlungen in Reaktormaterialien</i>	292
35.1 Chemische Veränderungen in Festkörpern infolge Bestrahlung	293
35.11 Anorganische Festkörper	293
35.12 Organische Festkörper	295
35.2 Chemische Vorgänge in bestrahlten Flüssigkeiten	307
35.21 Wasser und wässrige Lösungen	308
35.211 Reines Wasser	308
35.212 In Wasser gelöste Stoffe	313
35.22 Organische Flüssigkeiten und Schmiermittel	314

35.3	Strahleneinfluss auf Gase	317
35.4	Die Bedeutung der Radiolyse für die Korrosion	318
36.	<i>Die induzierte Radioaktivität in Reaktormaterialien</i>	321
36.1	Feste Werkstoffe	321
36.2	Flüssigkeiten, Lösungen und Suspensionen	324
36.21	Flüssige Metalle	325
36.22	Wasser sowie wässrige Lösungen und Suspensionen	326
36.23	Organische Kühlmittel	328
36.3	Gasförmige Kühlmittel	328
37.	<i>Die Spaltprodukte</i>	330
37.1	Spaltprozess, Zerfallsreihen, Spaltausbeute und Radioaktivität der Spaltprodukte	330
37.2	Vergiftung des Spaltstoffes durch Spaltprodukte	333
37.3	Metallurgische Bedeutung der Spaltprodukte	336
4.	Übersicht über die Reaktorwerkstoffe	343
41.	<i>Spalt- und Brutstoffe</i>	343
41.1	Feste Spaltstoffe	343
41.2	Feste Brutstoffe	346
41.3	Flüssige Spalt- und Brutstoffe	346
42.	<i>Hüllstoffe für feste Spaltstoffelemente</i>	349
43.	<i>Moderator- und Reflektormaterialien</i>	351
44.	<i>Kühlmittel</i>	354
44.1	Wasser und flüssige organische Stoffe	354
44.2	Flüssige Metalle	355
44.3	Gase	357
44.4	Geschmolzene Salze	358
45.	<i>Absorptionsmaterialien</i>	358
46.	<i>Konstruktionsmaterialien</i>	359
47.	<i>Abschirmmaterialien</i>	364
	Literaturverzeichnis	367
	Sachverzeichnis	380