

# HANSER



## **Leseprobe**

zu

## **Gefahrgut und Gefahrstoffe in der Logistik**

von Uwe Arens

Print-ISBN: 978-3-446-46871-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-46998-3

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446468719>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Vorwort</b> .....                                             | <b>IX</b> |
| <b>1 Beförderung gefährlicher Güter – Rechtsgrundlagen</b> ..... | <b>1</b>  |
| 1.1 Entwicklung und Struktur .....                               | 1         |
| 1.2 Modellvorschriften .....                                     | 10        |
| 1.2.1 Aufbau und Inhalte .....                                   | 10        |
| 1.2.2 Klassifizierung .....                                      | 15        |
| 1.3 Verkehrsträgerspezifische Besonderheiten .....               | 18        |
| 1.4 Nationale Regelungen .....                                   | 25        |
| 1.5 Zusammenfassung .....                                        | 29        |
| 1.6 Aufgaben und Fragen zur Vertiefung .....                     | 30        |
| <b>2 Chemikalienrecht</b> .....                                  | <b>33</b> |
| 2.1 Entwicklung und Aufbau .....                                 | 34        |
| 2.2 CLP-Verordnung .....                                         | 44        |
| 2.2.1 Aufbau und Inhalte .....                                   | 45        |
| 2.2.2 Einstufungssystem .....                                    | 48        |
| 2.3 Schutz der Beschäftigten .....                               | 62        |
| 2.3.1 Gefahrstoffverordnung .....                                | 63        |
| 2.3.2 Biostoffverordnung .....                                   | 68        |
| 2.4 Zusammenfassung .....                                        | 70        |
| 2.5 Aufgaben und Fragen zur Vertiefung .....                     | 70        |
| <b>3 Stoffe und Größen</b> .....                                 | <b>73</b> |
| 3.1 Stoffeinteilung .....                                        | 74        |
| 3.2 Physikalische Größen .....                                   | 80        |

|          |                                                     |            |
|----------|-----------------------------------------------------|------------|
| 3.3      | Normzustand .....                                   | 85         |
| 3.4      | Zusammenfassung .....                               | 88         |
| 3.5      | Aufgaben und Fragen zur Vertiefung .....            | 88         |
| <b>4</b> | <b>Atome, Elemente und Eigenschaften .....</b>      | <b>91</b>  |
| 4.1      | Atommodell .....                                    | 92         |
| 4.1.1    | Historische Entwicklung .....                       | 92         |
| 4.1.2    | Terminologie .....                                  | 94         |
| 4.1.3    | Elektronenhülle .....                               | 97         |
| 4.2      | Periodensystem der Elemente .....                   | 101        |
| 4.3      | Chemische Bindungen .....                           | 105        |
| 4.4      | Radioaktivität .....                                | 110        |
| 4.5      | Zusammenfassung .....                               | 116        |
| 4.6      | Aufgaben und Fragen zur Vertiefung .....            | 116        |
| <b>5</b> | <b>Gase und Gasverhalten .....</b>                  | <b>119</b> |
| 5.1      | Definition .....                                    | 119        |
| 5.2      | Ideales Gasverhalten .....                          | 122        |
| 5.3      | Gasgemische .....                                   | 132        |
| 5.4      | Reales Gasverhalten .....                           | 138        |
| 5.5      | Bedeutsame Industriegase .....                      | 142        |
| 5.6      | Zusammenfassung .....                               | 143        |
| 5.7      | Aufgaben und Fragen zur Vertiefung .....            | 144        |
| <b>6</b> | <b>Flüssigkeiten und Feststoffe .....</b>           | <b>147</b> |
| 6.1      | Intermolekulare Wechselwirkungen .....              | 148        |
| 6.2      | Flüssigkeiten .....                                 | 153        |
| 6.2.1    | Definition .....                                    | 153        |
| 6.2.2    | Verdunstung und Dampfdruck .....                    | 156        |
| 6.2.3    | Viskosität .....                                    | 159        |
| 6.2.4    | Sicherheitstechnisch bedeutsame Flüssigkeiten ..... | 163        |
| 6.3      | Feststoffe .....                                    | 167        |
| 6.3.1    | Definition .....                                    | 167        |
| 6.3.2    | Struktur und Eigenschaften .....                    | 171        |
| 6.3.3    | Sicherheitstechnisch bedeutsame Feststoffe .....    | 174        |

|          |                                                       |            |
|----------|-------------------------------------------------------|------------|
| 6.4      | Zustandsänderung .....                                | 180        |
| 6.5      | Zusammenfassung .....                                 | 186        |
| 6.6      | Aufgaben und Fragen zur Vertiefung .....              | 187        |
| <b>7</b> | <b>Physikalische und chemische Umwandlungen .....</b> | <b>191</b> |
| 7.1      | Grundlagen der Thermodynamik .....                    | 192        |
| 7.2      | Aggregatzustandsänderungen .....                      | 199        |
| 7.3      | Lösungen .....                                        | 205        |
| 7.4      | Chemische Reaktionen .....                            | 212        |
| 7.5      | Zusammenfassung .....                                 | 216        |
| 7.6      | Aufgaben und Fragen zur Vertiefung .....              | 217        |
| <b>8</b> | <b>Grundtypen chemischer Reaktionen .....</b>         | <b>221</b> |
| 8.1      | Säure-Base-Reaktionen .....                           | 222        |
| 8.1.1    | Säure-Base-Konzepte .....                             | 222        |
| 8.1.2    | Säure-Base-Gleichgewichte .....                       | 225        |
| 8.1.3    | Wichtige Säuren und Basen .....                       | 234        |
| 8.2      | Redoxreaktionen .....                                 | 236        |
| 8.2.1    | Grundlagen .....                                      | 236        |
| 8.2.2    | Elektrochemische Zellen .....                         | 239        |
| 8.2.3    | Technische Anwendungen .....                          | 247        |
| 8.3      | Zusammenfassung .....                                 | 251        |
| 8.4      | Aufgaben und Fragen zur Vertiefung .....              | 252        |
| <b>9</b> | <b>Arbeiten im Labor .....</b>                        | <b>255</b> |
| 9.1      | Laboreinrichtungen und Laborgeräte .....              | 256        |
| 9.2      | Sicheres Arbeiten und persönliches Verhalten .....    | 260        |
| 9.3      | Laborversuche .....                                   | 263        |
| 9.4      | Zusammenfassung .....                                 | 271        |
| 9.5      | Aufgaben und Fragen zur Vertiefung .....              | 272        |
| <b>A</b> | <b>Anhang .....</b>                                   | <b>275</b> |
| A.1      | Aufbau der REACH-Verordnung .....                     | 275        |
| A.2      | Aufbau der CLP-Verordnung .....                       | 277        |
| A.3      | Aufbau des GHS .....                                  | 277        |

|              |                                                      |            |
|--------------|------------------------------------------------------|------------|
| A.4          | Periodensystem der Elemente .....                    | 278        |
| A.5          | Kompressionsmodul und Kompressibilität .....         | 279        |
| A.5.1        | Kompressionsmodul ausgewählter Feststoffe .....      | 279        |
| A.5.2        | Kompressibilität von Flüssigkeiten .....             | 279        |
| A.6          | Ausdehnungskoeffizienten .....                       | 280        |
| A.6.1        | Längenausdehnungskoeffizienten fester Stoffe .....   | 280        |
| A.6.2        | Volumenausdehnungskoeffizient flüssiger Stoffe ..... | 280        |
| A.7          | Dichte von Feststoffen und Flüssigkeiten .....       | 281        |
| A.8          | Umwandlungsenthalpien ausgewählter Stoffe .....      | 282        |
| A.9          | Standardbildungsenthalpien .....                     | 283        |
| A.10         | Elektrochemische Spannungsreihe .....                | 284        |
| <b>Index</b> | .....                                                | <b>285</b> |

# Vorwort

Stoffe beherrschen die materielle Welt. Ohne sie ist ein Leben, wie wir es kennen, nicht denkbar. Stoffe sind Segen und Fluch zugleich. Segen, weil wir sie zum Leben benötigen und sie uns das Leben angenehmer machen. Fluch, weil sie zu Schäden an Mensch, Umwelt und Gütern führen können. Diese Ambivalenz zeigt sich besonders an den Diskussionen um den Klimawandel. Es sind Stoffe wie beispielsweise Methan und Kohlendioxid, die als klimaschädlich gelten. Dagegen werden Wasserstoff und Lithium benötigt, um den Klimawandel aufzuhalten.

Welche Stoffe als gefährlich und welche wiederum als nützlich angesehen werden, hängt zunächst von ihren physikalisch-chemischen Eigenschaften ab. Wollen wir die Auswirkungen des Klimawandels verhindern, ist es notwendig, diese Eigenschaften zu kennen. Insbesondere die Fach- und Führungskräfte der Logistik sind gefordert. Nach Angaben des Umweltbundesamtes ist der Verkehrssektor zu ca. 20 % für den Ausstoß klimaschädlicher Gase verantwortlich und überdies die einzige Branche, bei der sich die Emissionen in der Vergangenheit erhöht haben.

Das Ziel dieses Buches ist es, das Verständnis für die physikalisch-chemischen Grundlagen im Hinblick auf Eigenschaften und Verhalten gefährlicher Stoffe zu fördern und damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Sicherheitstechnik zu leisten. Dieses Lehrbuch liefert keine neuen physikalischen oder chemischen Erkenntnisse, die sich nicht auch in Standardwerken der Chemie oder Physik finden lassen. Vielmehr ist das Besondere die Fokussierung auf rechtliche und naturwissenschaftliche Themen, die zur Beurteilung und Abschätzung schädlicher stofflicher Wirkungen notwendig sind.

Dieses Buch richtet sich in erster Linie an Studierende der Logistik-Studiengänge. Es eignet sich aber auch für Studierende anderer Fachrichtungen, bei denen der Einsatz von und der Umgang mit gefährlichen Stoffen auf dem Lehrplan stehen. Fach- und Führungskräften, die an einem tieferen Verständnis für die rechtlichen und naturwissenschaftlichen Zusammenhänge interessiert sind, möchte dieses Buch ebenfalls eine Unterstützung liefern.

Das Lehrbuch ist auf neun Kapitel beschränkt. Kapitel 1 und 2 bleiben den öffentlich-rechtlichen Grundlagen vorbehalten. Sie beschreiben die historische Entwick-

lung der Rechtsgebiete und geben einen Überblick über Aufbau und Inhalte. Es folgen sechs Kapitel zu den physikalisch-chemischen Grundlagen. Den Auftakt machen Ausführungen zur Strukturierung der Stoffe und zum atomaren Aufbau (Kapitel 3 und 4). Es folgen Definitionen, Gesetzmäßigkeiten und Stoffbeispiele zu den drei Aggregatzuständen (Kapitel 5 und 6). Kapitel 7 und 8 befassen sich mit den physikalischen und chemischen Umwandlungen.

Das Verständnis für naturwissenschaftliche Zusammenhänge kann durch Laborexperimente gefördert werden. Daher behandelt Kapitel 9 das Arbeiten im Labor. Es enthält eine Auswahl an Versuchen, die für eine studienbegleitende Laborveranstaltung genutzt werden können. Auf *plus.hanser-fachbuch.de* sind kurze Videoaufnahmen von einigen der beschriebenen Versuche zu finden.

Jedes Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und einer Aufgabensammlung zur Wiederholung des Erlernten und zum vertieften Verständnis.

Ich danke allen Studierenden, die mich durch ihre Fragen zu diesem Buch inspiriert haben. Mein Dank gilt aber auch dem Lektorat des Carl Hanser Verlags und ganz besonders Herrn Volker Herzberg für seine Unterstützung und Motivation. Nicht zuletzt danke ich meiner Frau für ihre Rücksicht und ihre Anregungen!

Ich hoffe, dass dieses Buch den von mir formulierten Ansprüchen genügt. Darüber können jedoch nur Sie, liebe Lesende, urteilen. Daher freue ich mich über jeden Verbesserungshinweis und jede Anregung.

Bremen, im September 2022

Uwe Arens

# 1

# Beförderung gefährlicher Güter – Rechtsgrundlagen



## Was Sie in Kapitel 1 erwartet

Die Beförderung gefährlicher Güter ist mit hohen Risiken für Mensch und Umwelt verbunden. Es verwundert daher nicht, dass der Gesetzgeber regulativ eingreift. Die Welt verändert sich jedoch und mit ihr auch die Anforderungen, die an den sicheren Transport gefährlicher Güter gestellt werden. Regelmäßige Anpassungen – ausgelöst durch technische Neuerungen, globale Entwicklungen oder neue wissenschaftliche Erkenntnisse – haben mit den Jahren ein umfassendes und detailliertes Regelwerk entstehen lassen, das nicht nur unter Experten als Gefahrgutrecht bekannt ist.

Wir beginnen unsere Reise durch die gefährlichen Güter und Stoffe im Gefahrgutrecht. Um dessen Aufbau zu verstehen, ist es zweckmäßig, die historische Entwicklung in ihren Grundzügen zu kennen, bevor wir Struktur und Aufbau kennenlernen. Danach befassen wir uns mit den Inhalten der „Modellvorschriften“. Am Schluss dieses Kapitels blicken wir auf verkehrsträgerspezifische Besonderheiten.

## ■ 1.1 Entwicklung und Struktur

Die Gefahren, die die Beförderung gefährlicher Güter für Mensch und Umwelt mit sich bringt, sind hoch. Zahlreiche Unfälle belegen diese Aussage (siehe Kasten „Spektakuläre Gefahrgutunfälle“). Aus diesem Grunde gab es schon recht früh Bestrebungen, den Transport gefährlicher Güter zu reglementieren. Bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelten die Binnenschifffahrt und der Eisenbahnverkehr jeweils eigene Bestimmungen zur sicheren Beförderung. Dabei ging es zunächst vordringlich um den Transport militärischer Munition.



## Spektakuläre Gefahrgutunfälle

### *Straßenverkehr*

Im Juli 1987 verunglückte ein Tankfahrzeug, das mit 35 000 l Benzin beladen war, in der Innenstadt von Herborn. Das freigesetzte Benzin verteilte sich über die Kanalisation und den ortsnahe Fluss. Bei einer anschließenden Explosion starben sechs Menschen und 40 weitere erlitten schwere Verletzungen. 12 Häuser wurden zerstört (Ridder 2015, S. 58).

### *Schiffsverkehr*

Im Jahr 1989 verunglückte das Tankschiff Exxon Valdez vor Alaska. Dabei traten mehrere Millionen Liter Rohöl ins Meer. Neben einer Verschmutzung des Strandes verendeten zahlreiche Seevögel und Robben (Stillich 2009).

### *Luftverkehr*

Im Jahr 2010 stürzte eine Frachtmaschine nahe des Flughafens Dubai ab. Dabei kamen die Besatzungsmitglieder ums Leben. Die Frachtmaschine wurde vollständig zerstört. Die Unfalluntersuchung kam zu dem Ergebnis, dass sich die nicht als Gefahrgut gekennzeichneten und verpackten Lithium-Ionen-Batterien entzündet hatten. Die Feuerlöscheinrichtungen an Bord waren nicht in der Lage, den ausbrechenden Brand zu löschen (Flight Safety Foundation 2022).

### *Eisenbahn*

Am 29. Juni 2009 entgleiste ein mit Flüssiggas beladener Güterzug im Bahnhof von Viareggio, Italien. Durch die anschließende Explosion starben 32 Menschen und 27 weitere erlitten Verletzungen. Es entstand erheblicher Sachschaden an den Gebäuden der Umgebung (Spiegel 2017).

### *Binnenschifffahrt*

Am 13. Januar 2011 kenterte das Tankmotorschiff „Waldhof“ nahe der „Loreley“ bei St. Goarshausen. Dabei wurde ein Besatzungsmitglied getötet, ein weiteres wird seitdem vermisst. Durch die Havarie trat konzentrierte Schwefelsäure aus, sodass der Rhein in Höhe der Unfallstelle für mehr als 30 Tage teilweise vollständig gesperrt werden musste (Verkehrsrundschau 2013).

Nachhaltige Bemühungen um einheitliche Festlegungen zum Transport gefährlicher Güter begannen jedoch erst nach 1945. Durch die Zunahme des weltweiten Handels und den technischen Fortschritt stieg die Menge transportierter Gefahrgüter stetig an. Um den internationalen Warenaustausch nicht zu behindern, war es wirtschaftlich geboten, den grenzüberschreitenden Verkehr gefährlicher Güter zu harmonisieren. Den Grundstein dazu legte der Wirtschafts- und Sozialausschuss der Vereinten Nationen (ECOSOC) 1956 mit der Veröffentlichung der ersten Fassung der „Recommendations concerning the classification, listing and labelling of dangerous goods and shipping papers for such goods“ (Ridder 2015, S. 32). Das als „Orange Book“ bezeichnete Regelwerk setzte einen Standard, der bis heute in

seinen Grundlagen Bestand hat (Ridder 2015, S. 33). Zu den wesentlichen Errungenschaften dieser Empfehlungen der Vereinten Nationen (UN aus engl.: *United Nations*) zählen u. a.

- Gefahrklassen

Die Bildung von Gefahrklassen ermöglicht die Unterteilung gefährlicher Stoffe und Güter nach ihrem Gefahrenpotenzial. Das zugrunde liegende Prinzip beruht auf den inhärenten Stoffeigenschaften. Berücksichtigt werden außerdem mögliche Reaktionen, die sich durch Kontakt mit anderen Stoffen oder durch die Art des Transports ergeben.

- Gefahrenkommunikation

Gefahrzettel weisen auf das von den Stoffen ausgehende Gefahrenpotenzial hin. Sie sind und enthalten ein Symbol, das in anschaulicher Weise auf die Gefahr hinweist. Diese Gestaltungsmerkmale sind auch heute noch gültig und ermöglichen eine über sprachliche Grenzen hinausgehende einheitliche Gefahrenkommunikation.

- Gefahrgutliste

Bekannte gefährliche Güter werden in einer Liste zusammengeführt. Als Ordnungsmerkmal dient eine vierstellige Nummer, der das Kürzel UN vorangestellt wird. Diese als UN-Nummer bekannte Zahlenfolge ermöglicht eine eindeutige Identifizierung gefährlicher Güter.

Zunächst verzichteten die UN-Empfehlungen auf Festlegungen zu radioaktiven Materialien, denn damit setzte sich die 1957 gegründete Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) auseinander. 1962 veröffentlichte die IAEO die erste Ausgabe der „*Regulation for the Safe Transport of Radioactive Materials – Safety Series No. 6*“. Nach mehreren Überarbeitungen in den darauffolgenden Jahren wurde diese 1997 erstmalig in die UN-Empfehlungen übernommen und ist seitdem fester Bestandteil (Ridder 2015, S. 33).

Die UN-Empfehlungen werden heute unter dem Namen „*Recommendations on the Transport of Dangerous Goods Model Regulations*“ geführt und regelmäßig den aktuellen Entwicklungen angepasst (UN a 2021, S. iii). Seit Erscheinen der zehnten überarbeiteten Auflage der UN-Empfehlungen werden die „Modellvorschriften“ als Anhang aufgenommen. Dadurch sollte eine Übernahme der Regelungen durch Verkehrsträger und Mitgliedsländer erleichtert werden (UN a 2021, S. iii).

Eine Anpassung der Modellvorschriften durch die jeweiligen Verkehrsträger ist aufgrund unterschiedlicher Risiken sinnvoll. Kommt es beispielsweise im Straßenverkehr durch einen Verkehrsunfall zu einer Freisetzung einer entzündbaren Flüssigkeit, dann ist zu erwarten, dass die Einsatzkräfte schnell zur Stelle sind und einer Ausweitung der Schadensfolgen entgegenwirken können. Das ist jedoch nicht der Fall, wenn dieselbe Flüssigkeit auf hoher See austritt oder es in der Luft

zu einem Brandereignis kommt. Die Unterschiede in der Risikobewertung schlagen sich u. a. in den Anforderungen an Verpackung, Stauung und Zusammenlagerung nieder. Neben den Sachgründen haben auch historische Entwicklungen dazu beigetragen, dass für jeden Verkehrsträger eigene Regelungen existieren. Gegenwärtig sind folgende verkehrsträgerspezifische Übereinkommen gültig:

- Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung von gefährlichen Gütern auf Binnenwasserstraßen (franz.: *Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voie de navigation intérieure* – ADN)

Flüsse und Kanäle sind seit je her wichtig für den Warenaustausch und den Handel. Vor allem der Rhein hat eine große Bedeutung, denn er verbindet nicht nur mehrere europäische Länder miteinander, sondern schafft auch den Zugang zum offenen Meer. Um die freie Schifffahrt auf dem Rhein sicherzustellen, bildete sich bereits 1815 die Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) (siehe Kasten „Bedeutsame Organisationen und Institutionen“). Bis heute arbeitet die ZKR daran, die Sicherheit der Rheinschifffahrt zu gewährleisten. Die sichere Beförderung gefährlicher Güter ist Teil dieser Aufgabe. 1971 veröffentlichte die ZKR die Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf dem Rhein (ADNR) (ZKR 2021, S. iii).

Europäische Bestrebungen nach einheitlichen Regelungen für die Binnenschifffahrt führten 1995 zu einer Zusammenarbeit zwischen der ZKR und der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE). Als Ergebnis wurde 2008 das „Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung von gefährlichen Gütern auf Binnenwasserstraßen (ADN)“ verabschiedet. Es greift einerseits die bekannten Regelungen für den Straßen- und den Eisenbahnverkehr auf und berücksichtigt andererseits die Anforderungen der ADNR. Durch die Richtlinie 2008/68/EG wurde der Geltungsbereich des ADN auf alle Binnenwasserstraßen der Europäischen Union ausgedehnt.

Das Übereinkommen besteht aus dem Vertragstext und einer Anlage, die in neun Teile untergliedert ist. Die Anwendung des Übereinkommens für Seeschiffe ist ausgeschlossen (Artikel 1 Nr. 2 ADN).



## Bedeutsame Organisationen und Institutionen

### *Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR)*

Die Gründung der ZKR erfolgte 1815 auf dem Wiener Kongress. Zu ihren Aufgaben gehört die Sicherstellung der freien Schifffahrt auf dem Rhein. Dazu befasst sie sich mit Fragen zum effizienten Schiffstransport, zur Sicherheit und zu den sozialen Bedingungen sowie zum Umweltschutz. ZKR ist als internationale Organisation mit dem Recht zum Erlass von Verordnungen ausgestattet.

Der ZKR gehören fünf Mitgliedsstaaten an (Deutschland, Belgien, Frankreich, Niederlande, Schweiz). Sie hat ihren Sitz in Straßburg (ZKR 2022).

### *Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE)*

UNECE (engl. für *United Nations Economic Commission for Europe*) ist die Bezeichnung einer regionalen Kommission des Wirtschafts- und Sozialrates der Vereinten Nationen. UNECE ist eine von fünf Regional-Kommissionen des Wirtschafts- und Sozialrates der Vereinten Nationen (ECOSOC), deren Ziel es ist, die wirtschaftliche Integration in der Welt zu fördern. Sie umfasst gegenwärtig 56 Staaten. Ihr Hauptsitz ist Genf (UNECE 2022).

### *Zwischenstaatliche Organisation für den internationalen Eisenbahnverkehr (OTIF)*

OTIF (franz.: *Organisation intergouvernementale pour les transports internationaux ferroviaires*) ist die Kurzbezeichnung für den Zusammenschluss von 50 Staaten, deren Aufgabe es ist, sich für die Erleichterung des internationalen Eisenbahnverkehrs einzusetzen. Dazu beschäftigt sich OTIF sowohl mit rechtlichen als auch mit technischen Fragestellungen (OTIF 2022).

### *International Civil Aviation Organization (ICAO)*

Bei der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation handelt es sich um eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen mit Sitz in Montreal. Zu ihren Aufgaben gehört die Festlegung verbindlicher Standards in der Luftfahrt. Gegenwärtig gehören ihr 193 Regierungen an (ICAO 2022).

### *International Air Transport Association (IATA)*

IATA ist ein Zusammenschluss von derzeit 290 internationalen Luftverkehrsgesellschaften mit Sitz in Montreal. Sie wurde 1945 mit dem Ziel gegründet, sichere, zuverlässige und wirtschaftliche Luftverkehrsdienstleistungen anzubieten (IATA 2022).

### *International Maritime Organization (IMO)*

IMO ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen mit Sitz in London. IMO wurde 1948 gegründet. Zu den Aufgaben gehören u. a. die Sicherheit der Schifffahrt und der Meeresumweltschutz (IMO 2019). Gegenwärtig sind 174 Nationen Mitglied der IMO (IMO 2019a).

- Verordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter (franz.: *Règlement concernant le transport international ferroviare des marchandises dangereuses* – RID)

Für den grenzüberschreitenden Eisenbahnverkehr gab es schon sehr früh einheitliche Regelungen. So trat bereits 1890 das „Internationale Übereinkommen über den Eisenbahn-Frachtverkehr“ in Kraft, dem bald darauf die Gründung einer zwischenstaatlichen Organisation folgte, zu deren Zielen die Erleichterung des internationalen Eisenbahnverkehrs gehörte (OTIF 2022). Diese Organisation besteht auch heute noch unter der Bezeichnung OTIF mit Sitz in Bern (siehe Kasten „Bedeutsame Organisationen und Institutionen“).

Zu den grundlegenden Regelungen der OTIF gehört das „COTIF 1999 Übereinkommen über den internationalen Eisenbahnverkehr“ (OTIF 2019). Es besteht aus sieben Anhängen. Der Anhang C enthält die „Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter“.

Der Anwendungsbereich des RID geht weit über die europäischen Grenzen hinaus (Bild 1.1). Durch die Richtlinie 2008/68/EG ist RID verpflichtend für nationale Beförderungen gefährlicher Güter innerhalb der Europäischen Union.



**Bild 1.1** Übersicht über die OTIF-Mitgliedstaaten (Quelle: OTIF 2022)

- Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (*Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road, bis 2020 Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route* – ADR)

Die Straße hat sich in den zurückliegenden Jahrzehnten zu einem der wichtigsten Verkehrsträger für den Transport gefährlicher Güter entwickelt. Allein in

Deutschland beträgt der Anteil der Straße an der Gesamttransportmenge gefährlicher Güter nahezu 50 % (Destatis 2021, S. 6).

Das ADR wurde erstmalig 1957 von der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) erarbeitet und trat am 29. Januar 1968 in Kraft (UNECE 2020). Es orientiert sich an dem RID und ist daher nahezu inhaltsgleich. Gegenwärtig haben 52 Staaten das ADR unterzeichnet. Durch die Richtlinie 2008/68/EG ist das ADR im innereuropäischen Bereich verpflichtend anzuwenden.

- International Civil Aviation Organization – Technical Instructions – (ICAO-TI)/ International Air Transport Association – Dangerous Goods Regulation (IATA-DGR)

Auch in der Luft werden täglich gefährliche Güter befördert. Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO (siehe Kasten „Bedeutsame Organisationen und Institutionen“) hat daher 1984 auf der Grundlage der UN-Modellvorschriften Regelungen für die sichere Beförderung gefährlicher Güter im Luftverkehr durch Luftfahrzeuge erarbeitet und als Annex 18 mit dem Titel „*Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods*“ (Dokument 9284) dem Übereinkommen für den internationalen Zivilluftverkehr (auch bekannt als „Chicagoer Konvention“) beigefügt.

Bereits vorher hat sich die Internationale Luftverkehrs-Vereinigung IATA (siehe Kasten „Bedeutsame Organisationen und Institutionen“) mit dieser Thematik auseinandergesetzt und für ihre Mitglieder Gefahrgutvorschriften unter der Bezeichnung IATA Gefahrgutvorschriften (engl.: *IATA Dangerous Goods Regulation – IATA-DGR*) herausgegeben. IATA-DGR haben sich weltweit zu den dominierenden Regelungen entwickelt. Da jedoch nur die ICAO-TI rechtsverbindliche Wirkung erzeugen, übernimmt IATA die Regelungen der ICAO und ergänzt diese durch eigene Festlegungen, die über die Anforderungen der ICAO-TI hinausgehen. Die Anpassungsintervalle sind unterschiedlich. IATA-TI werden einmal jährlich angepasst (IATA 2019, S. xvii).

- International Maritime Dangerous Code (IMDG Code)

Der Schutz des menschlichen Lebens steht im Mittelpunkt einer Konvention der Vereinten Nationen, die unter dem Akronym SOLAS (engl.: *The International Convention for the Safety of Life at Sea*) bekannt ist. Das Übereinkommen wurde 1974 verabschiedet und zwischenzeitlich ergänzt. SOLAS besteht aus einem Vertragstext und einem Anlagenteil. In Kapitel VII des Anlagenteils sind Festlegungen zur Beförderung gefährlicher Güter enthalten, die fünf Themenbereichen zugeteilt sind. Dazu gehören (IMO 2019 b):

- Teil A: Beförderung gefährlicher Güter in verpackter Form mit Verweis auf den IMDG Code
- Teil A1: Beförderung gefährlicher Güter in fester Form als Massengut und Verweis auf *International Maritime Solid Bulk Cargoes Code (IMSBC Code)*

- Teil B: Bauart und Ausrüstung von Schiffen zur Beförderung gefährlicher Flüssigkeiten als Massengut und Verweis auf den *International Bulk Chemical Code (IBC Code)*
- Teil C: Bauart und Ausrüstung von Schiffen zur Beförderung verflüssigter Gase als Massengut und Verweis auf *International Gas Carrier Code (IGC Code)*
- Teil D: Besondere Vorschriften für die Beförderung verpackter bestrahlter Kernbrennstoffe, Plutonium und hochradioaktiver Abfälle auf Seeschiffen und Verweis auf den *International Code for the Safe Carriage of Packaged Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High-Level Radioactive Wastes on Board Ships (INF Code)*

Ein weiteres Übereinkommen mit Auswirkungen auf die Beförderung gefährlicher Güter ist unter der Bezeichnung MARPOL bekannt (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*). Es trat am 02. Oktober 1983 in Kraft und dient dem Schutz der Meeresumwelt. Ergänzend zum IMDG Code enthält es Festlegungen zur Vermeidung von Meeresumweltverschmutzung durch Schadstoffe, die in verpackter Form auf Seeschiffen befördert werden.

Der IMDG Code wurde 1965 als Empfehlung von der IMO verabschiedet. Seit dem 01. Januar 2004 ist der IMDG Code bis auf wenige Ausnahmen bindend. Inhaltlich orientiert sich der IMDG Code an den Modellvorschriften. Eine Anpassung erfolgt daher im regelmäßigen Turnus von zwei Jahren (IMO 2019 c).

Neben internationalen und europäischen Festlegungen existieren nationale Regelungen. Zu den wichtigsten zählen:

- Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter (Gefahrgutbeförderungsgesetz – GGBefG)

Das GGBefG ist Grundlage für die Gefahrgutbeförderung in Deutschland. Es enthält wichtige Legaldefinitionen (z.B. gefährliche Güter, Beförderung), ermächtigt zum Erlass von Rechtsverordnungen (z.B. Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn, Binnenschifffahrt) und regelt Einzelheiten zum Vollzug. Überdies legt es die Verantwortlichkeit für die Beförderung fest.

- Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen (Gefahrgutverordnung See – GGVSee)

Die GGVSee ist die konkretisierende Vorschrift für die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen. Sie überführt den IMDG Code, IMSBC Code, IBC Code, IGC Code und INF Code in deutsches Recht und konkretisiert die Zuständigkeiten und Pflichten in der Seeschifffahrt.

- Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern (Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt – GGVSEB)

Die GGVSEB wird u. a. zur Umsetzung der Anforderungen aus der Richtlinie 2008/68/EG genutzt und überführt ADR, RID und ADN in deutsches Recht. Überdies beschreibt sie die Pflichten der Transportbeteiligten und die damit einhergehenden Ordnungswidrigkeiten bei Nichtbeachtung.

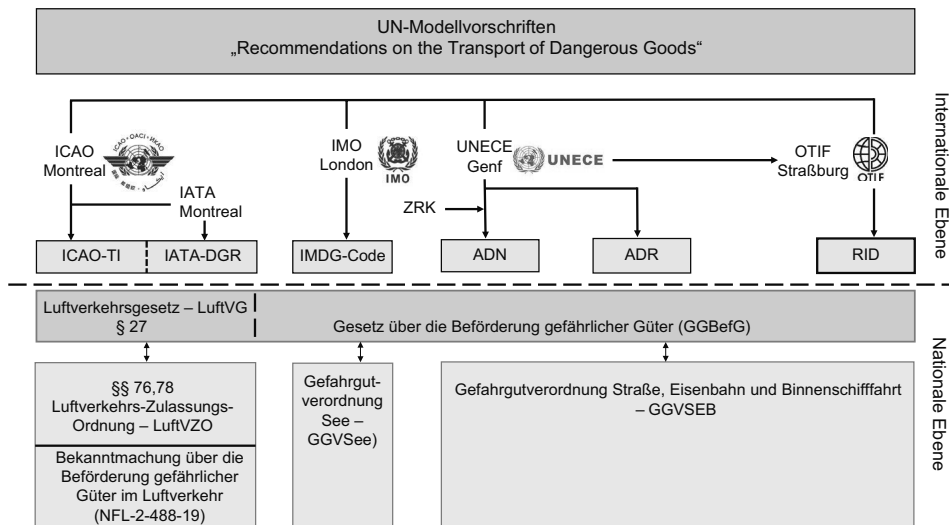
Die GGVSEB wird durch die „Richtlinien zur Durchführung der Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) – RSEB“ ergänzt (RSEB 2019). Dabei handelt es sich um eine Verwaltungsvorschrift mit dem Ziel, einen einheitlichen Vollzug der Gefahrgutregelungen durch die einzelnen Bundesländer sicherzustellen. Neben konkretisierenden Erläuterungen enthält RSEB Formblätter und einen Ordnungswidrigkeitenkatalog.

- Verordnung über die Bestellung von Gefahrgutbeauftragten in Unternehmen (Gefahrgutbeauftragtenverordnung – GbV)

Die GbV konkretisiert die Forderungen des ADR, ADN, RID und IMDG Code nach Bestellung eines Sicherheitsberaters (Gefahrgutbeauftragter). Neben Ausnahmen von der allgemeinen Bestellverpflichtung enthält die GbV Details zur Schulung und zu den Aufgaben eines Gefahrgutbeauftragten.

Die Aufzählung der nationalen Regelungen ist unvollständig. Es gibt weitere mit einem direkten oder indirekten Bezug zur Gefahrgutbeförderung. Hierzu zählen beispielsweise das Luftverkehrsgesetz, die Luftverkehrszulassungs-Ordnung oder auch die Straßenverkehrsordnung, die u. a. Verbotsschilder für Kraftfahrzeuge mit Gefahrgütern enthält.

Bild 1.2 liefert eine Orientierung über die Struktur der Regelungen und das Zusammenwirken internationaler und nationaler Regelungen.



**Bild 1.2** Übersicht über die Struktur der Gefahrgutregelungen

## ■ 1.2 Modellvorschriften

Mit der Aufnahme der „Modellvorschriften“ als Anhang zu den UN-Empfehlungen wurde eine zügige und reibungslose Übernahme durch die jeweiligen Mitgliedsländer und die Verkehrsträger bezweckt (UN a 2021, S. iii). Dieses Ziel kann als erreicht angesehen werden, denn alle relevanten Verkehrsträger haben zwischenzeitlich Regelungen zum Transport gefährlicher Güter erlassen, die dem Aufbau und der Struktur der Modellvorschriften weitgehend folgen.

Im Folgenden machen wir uns daher zunächst mit dem Aufbau und der Struktur der Modellvorschriften vertraut und verschaffen uns einen Überblick über die Regelungsinhalte. Im Anschluss widmen wir uns dem Klassifizierungssystem.

### 1.2.1 Aufbau und Inhalte

Die Modellvorschriften bilden den Anhang der UN-Empfehlungen und bestehen aus sieben Teilen, die auf zwei Bände verteilt sind. Jeder Teil des Anhangs wird in Kapitel, Abschnitte und Absätze untergliedert (UN a 2021, S. 11).

Die sieben Teile der Modellvorschriften behandeln folgende Inhalte:

- Teil 1: Allgemeine Bestimmungen, Definitionen, Schulung und Sicherheit (engl.: *General Provisions, Definitions, Training and Security*)

Teil 1 enthält allgemeingültige Regelungen. In fünf Kapiteln werden Details zum Anwendungsbereich, Begriffsdefinitionen, Schulungserfordernisse und Anforderungen an die Transportsicherheit genannt. Das letzte Kapitel enthält besondere Bestimmungen zu radioaktiven Materialien (UN a 2021, S. 13).

Die Modellvorschriften formulieren ein grundsätzliches Beförderungsverbot für gefährliche Güter. Eine Beförderung ist nur unter den Bedingungen der Modellvorschriften erlaubt (UN a 2021, S. 21).

Die Anforderungen an die Transportsicherheit verfolgen den Zweck, den Diebstahl und den Missbrauch gefährlicher Stoffe und Güter insbesondere durch Trainingsmaßnahmen der beteiligten Personen auszuschließen. Darüber hinausgehende Forderungen werden für gefährliche Güter mit einem hohen Gefährdungspotenzial erhoben (UN a 2021, S. 40, 41). Dazu zählen z.B. entzündbare Flüssigkeiten. Es wird davon ausgegangen, dass Güter mit einem hohen Gefährdungspotenzial für terroristische Zwecke missbraucht werden können. Daher gelten besondere Sicherheitsanforderungen.

- Teil 2: Klassifizierung (engl.: *Classification*)

Die Klassifizierung bezeichnet den Vorgang, wonach gefährliche Güter in Bezug auf ihre Eigenschaften und Kriterien in Klassen unterteilt werden. Zu den

Gütern zählen Stoffe und Gemische ebenso wie Gegenstände. Die Zuordnung erfolgt im Wesentlichen auf der Grundlage sicherheitstechnischer und toxikologischer Kriterien. Es werden neun Klassen gebildet und durch arabische Ziffern bezeichnet. Die Klassen 1, 2, 4, 5 und 6 werden in Unterklassen unterteilt. Eine Abstufung nach dem Gefahrengrad wird durch die Einführung von Verpackungsgruppen erreicht. Diese sind:

- Verpackungsgruppe I: hohes Gefahrenpotenzial
- Verpackungsgruppe II: mittleres Gefahrenpotenzial
- Verpackungsgruppe III: geringes Gefahrenpotenzial

Von der Zuordnung zu den Verpackungsgruppen sind Stoffe und Güter der Klassen 1, 2, 5.2, 6.2, 7 und der selbstzersetzlichen Stoffe der Unterklasse 4.1 ausgenommen (UN a 2021, S. 52).

- Teil 3: Gefahrgutliste, allgemeine Bestimmungen und Ausnahmen (engl.: *Dangerous Goods List, Special Provisions and Exceptions*)

Teil 3 zählt zu den zentralen Bestandteilen der Modellvorschriften. Kern ist die Gefahrgutliste, die eine Auflistung der am häufigsten beförderten Gefahrgüter umfasst. Für jedes in der Gefahrgutliste enthaltene Gefahrgut ist das Ergebnis der Klassifizierung festgehalten. Ebenso finden sich Anforderungen für die Verpackung oder den Tank. Bild 1.3 zeigt den Aufbau der Gefahrgutliste.

Die erste Spalte der Gefahrgutliste enthält die UN-Nummer. Sie dient als Ordnungsmerkmal. Für den Fall, dass die UN-Nummer eines Gutes nicht bekannt ist, hilft eine alphabetische Auflistung mit Zuordnung des Namens zur UN-Nummer.

Einen weiteren inhaltlichen Schwerpunkt bilden die Freistellungsmöglichkeiten für verpackte Gefahrgüter. Unterschieden wird zwischen Gefahrgütern, die in begrenzten Mengen („Limited Quantities“) oder in freigestellten Mengen („Excepted Quantities“) befördert werden. Unter Berücksichtigung der genannten Festlegungen sind Erleichterungen bei Verpackung und Beförderung möglich. Besondere Kennzeichen an den Versandstücken weisen auf die Nutzung dieser Freistellungsmöglichkeiten hin.

| UN No. | Name and description | Class or division | Subsidiary hazard | UN packing group | Special provisions | Limited and excepted quantities |      | Packagings and IBCs   |                            | Portable tanks and bulk containers |                    |
|--------|----------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------------------------------|------|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------|
|        |                      |                   |                   |                  |                    | (7a)                            | (7b) | Packing instruction   | Special packing provisions | Instructions                       | Special provisions |
| (1)    | (2)                  | (3)               | (4)               | (5)              | (6)                | (7a)                            | (7b) | (8)                   | (9)                        | (10)                               | (11)               |
| -      | 3.1.2                | 2.0               | 2.0               | 2.0.1.3          | 3.3                | 3.4                             | 3.5  | 4.1.4                 | 4.1.4                      | 4.2.5 / 4.3.2                      | 4.2.5              |
| 1229   | MESITYL OXIDE        | 3                 |                   | III              |                    | 5 L                             | E1   | P001<br>IBC03<br>LP01 |                            | T2                                 | TP1                |
| 1230   | METHANOL             | 3                 | 6.1               | II               | 279                | 1 L                             | E2   | P001<br>IBC02         |                            | T7                                 | TP2                |

**Bild 1.3** Aufbau der Gefahrgutliste der Modellvorschriften (Quelle: UN a 2021, S. 193 ff.)

- Teil 4: Verpackungs- und Tank-Vorschriften (engl.: *Packing and Tank Provisions*)

Eine wichtige Voraussetzung für die sichere Beförderung gefährlicher Güter ist die Verwendung geeigneter Umschließungen. Dieses ist der Oberbegriff für alle Arten von Verpackungen, Tanks und Container. Welche Voraussetzungen für die Auswahl und die Verwendung zu berücksichtigen sind, behandelt Teil 4.

Teil 4 ist in drei Kapitel unterteilt (UN b 2021, S. iii). Das erste Kapitel befasst sich mit Verpackungen, Großverpackungen und Intermediate Bulk Container (IBC) und legt die Anforderungen fest, die für die richtige Auswahl zu beachten sind. Dabei geht es u. a. um die Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Belastungen und den Einfluss der Umgebungsbedingungen wie z. B. Temperatur, Luftdruck oder Luftfeuchtigkeit. In spezifischen Verpackungsanweisungen werden Art und Volumen der Verpackungen festgelegt.

Das zweite Kapitel behandelt die Verwendung von Tanks und dem Multiple Energy Gas Container (MEGC). In diesem Kapitel geht es u. a. um den Füllgrad. Temperaturschwankungen zwischen dem Zeitpunkt der Befüllung und während des Beförderungsvorganges können zu Volumenänderungen und damit zu gefährlichen Zuständen führen. Um diese zu verhindern, ist eine Obergrenze für die Befüllung vorgeschrieben. Zusätzlich werden weitere Anforderungen wie z. B. Prüfdruck, Wandstärke und Druckentlastungseinrichtungen in Tankanweisungen festgelegt.

Das dritte Kapitel enthält spezifische Anweisungen für die Verwendung von Schüttgutcontainern.

- Teil 5: Versandvorschriften (engl.: *Consignment Procedures*)

Die Beförderung gefährlicher Güter ist nur unter Beachtung der Versandvorschriften erlaubt. Dazu gehören z. B. eine vollständige Kennzeichnung sowie eine Dokumentation. Wichtiger Bestandteil der Kennzeichnung ist der Gefahrzettel. Tabelle 1.1 zeigt eine Übersicht aller Gefahrzettel.

Abweichungen von der Gestaltung und der Farbgebung sind nicht erlaubt. Auch die Größe ist vorgeschrieben. Für die Anbringung an Versandstücken beträgt die Kantenlänge 100 mm. Für größere Umschließungen, z. B. Tanks, ist eine Kantenlänge von mindestens 250 mm gefordert (UN b 2021, S. 180).

Neben Gefahrzetteln sind zusätzliche Kennzeichnungen möglich. Hierzu gehören z. B. Ausrichtungspfeile, Kennzeichen für umweltgefährdende Stoffe oder für besondere Transportumstände.

# Index

## A

Absolutdruck 87  
ADN 22  
ADR 6, 20  
Aerosole 51, 78  
Aggregatzustand 74, 138, 199  
Aktivität 114  
akute Toxizität 56  
Alkali-Mangan-Zelle 247  
Alkalimetalle 108, 169  
Alkane 164  
Alpha-Strahlung 110  
Aluminium 169  
Ammoniak 235  
Ampholyt 224  
Anode 241  
ansteckungsgefährliche Stoffe 18  
Anteile (Zusammensetzung von  
Lösungen) 206  
Arbeit 197  
Arbeitsstoffverordnung 34  
Archimedes 184  
Argon 142  
Arrhenius, Svante August 222  
Asbest 177  
Aspirationsgefahr 60  
Atemwege oder Haut  
– Sensibilisierung 58  
Atomdurchmesser 103  
Atomkern 94  
Atommodell 92  
ätzende Stoffe 18  
Ätz-/Reizwirkung auf die Haut 57

Auftriebsmethode 184  
Augenschädigung 57  
Avogadro, Amedeo 128  
Avogadrosches Prinzip 130

## B

Basen 222  
– schwache 231  
– starke 230  
Basendissoziationskonstante 229  
Basenrest 223  
Benzin 167  
Benzol 164  
Berufskrankheit 177  
besonders besorgniserregende  
Stoffe 39  
Beta-Strahlung 111  
Betriebsanweisungen 260  
Bindung, chemische 105  
Bindung, kovalente 106  
Bindung, metallische 108  
Binnenschifffahrt 22  
BioStoffV *Siehe* Biostoffverordnung  
Biostoffverordnung 68  
Biozid-Verordnung 43  
Biphenyle 165  
Blei 169  
Blei-Säure-Akkumulator 248  
Bohr, Niels 93  
Bohrsches Atommodell 93  
Boyle-Mariottesches Gesetz 123  
Boyle, Robert 122

brennbare Stoffe 179  
Brennstoffe 166  
Brennstoffzelle 250  
Broglie, Louis de 98  
Brom 154  
Brønsted, Johannes Nicolaus 223  
Brønstedt-Lowry-Konzept 223  
Buntmetalle 169

## C

Cadmium 169, 176  
Celsius-Skala 86  
Charles, Jacques 125  
ChemG *Siehe* Chemikaliengesetz  
Chemikaliengesetz 37, 44  
Chemikalienrecht 34  
Chlorkohlenwasserstoffe 164 f.  
Chromatographie 76  
CKW 164  
Clapeyron, Émile 158  
Clausius-Clapeyron-Gleichung 158, 202  
Clausius, Rudolf 196  
CLP-Verordnung 41, 44, 277  
Cobalt 169  
Coulomb, Charles Augustin de 149  
Curie, Marie Skłodowska 110  
Curie, Pierre 110  
Cyclohexan 164  
Cyclopentan 164

## D

Dalton, John 92, 134  
Daltonsches Gesetz 135  
Dampf 52  
Dampfdruck 121, 156, 211  
Dampfdruckkurve 158, 201  
Daniell-Element 241  
Daniell, Frederic 241  
Demokrit 92  
Demonstrationsversuche 263  
desensibilisierte explosive Stoffe 55  
Destillation 76  
Dichte 81

Dipolwechselwirkung 151  
Dispersionen 78  
Dispersionswechselwirkung 151  
Dissoziation 208  
Dissoziationsprozess 223  
Druck 82  
Durchstrahlungsverfahren 115

## E

ECHA *Siehe* Europäische Chemikalien-  
agentur  
Edelgaskonfiguration 105  
Eigenschaften  
– von Stoffen 75  
Einheitengleichung 83  
Einstufungssystem der CLP-  
Verordnung 48  
Eisen 169  
Eisenbahnverkehr 19  
elektrochemische Spannungsreihe 242  
elektrochemische Zelle 241  
Elektrolyse 250  
Elektronegativität 104  
Elektronen 95  
Elektronenaffinität 104  
Elektronengas-Modell 109  
Elektronenhülle 95, 97  
Elektronenkonfiguration 100  
Elementarteilchen 94  
Elementarzelle 171  
Energie  
– innere 196  
Energiespeicher 247  
Enthalpie 198  
– freie 244  
Entropie 196 f.  
entzündbare Aerosole 51  
entzündbare feste Stoffe 16  
entzündbare Feststoffe 52  
entzündbare Flüssigkeiten 16, 51  
entzündbare Gase 49  
Erdalkalimetalle 169  
Erzeugnis 40, 79  
Essigsäure 235

EU-Rechtsakte 43  
Europäische Chemikalienagentur 39  
explosive Stoffe 15, 49  
Explosivstoffe 180

## F

Faserstaub 177  
Festkörper  
– Konstellationen 172  
Feststoffe 52, 74, 147, 167  
Filtern 76  
Fließkurven 161  
Flüssiggas 142  
Flüssigkeit 51, 74, 147, 153  
Flusssäure 235

## G

Galvani, Luigi Aloisio 241  
galvanische Zelle 241  
Galvanisieren 251  
Gamma-Strahlung 111  
Gas 15, 51, 119  
– ideales 122  
Gasdichte 131  
Gasgemische 132  
Gaskomprimierung 138  
Gasverhalten 119  
Gay-Lussac, Joseph Louis 125  
GbV *Siehe* Gefahrgutbeauftragten-  
verordnung  
Gefährdungsbeurteilung 64, 66, 260  
Gefahren  
– physikalische 49  
Gefahrenklassen 49  
Gefahrenkommunikation 3  
Gefahrenpiktogramm 46  
Gefahrensymbole 36  
Gefahren- und Sicherheitshinweise 47  
Gefahrgutbeauftragtenverordnung 9  
Gefahrgutbeförderungsgesetz 8  
Gefahrgutliste 3  
Gefahrgutregelungen 9  
Gefahrguttransporte 163

Gefahrgutunfälle 2  
Gefahrgutverordnung *See* 8, 27  
Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn  
und Binnenschifffahrt 8, 27  
Gefahrklassen 3  
Gefährlichkeitsmerkmale 15, 34  
Gefahrstoffverordnung 63  
Gefahrzettel 13  
Gemisch 40, 77ff.  
Gesundheitsgefahren 56  
gewässergefährdend 60  
GGBefG *Siehe* Gefahrgutbeförderungs-  
gesetz  
GGVSEB *Siehe* Gefahrgutverordnung  
Straße, Eisenbahn und Binnenschiff-  
fahrt  
GGVSee *Siehe* Gefahrgutverordnung *See*  
GHS-System 41, 277  
Gibbsche Phasenregel 204  
Gibbs, Josiah Willard 214  
giftige Stoffe 17  
Gleichgewicht  
– dynamisches 157  
Gleichgewichtsreaktionen 223  
Gleichgewichtszellspannung 242f., 246  
Größengleichung 83  
Gruppen 103

## H

Halbreaktionen 237  
Halbwertszeit 114  
Halogene 108  
Halogenkohlenwasserstoffe 165  
Hauptquantenzahl 98  
Hauptsätze der Thermodynamik 197  
Heizöl 167  
Henry-Konstante 210  
Henry, William 209  
Hersteller 40  
H-Hinweise 48

## I

IATA 5  
 IATA-DGR 7  
 IATA-Gefahrgutvorschriften 25  
 IBC Code 8  
 ICAO 5  
 IGC Code 8  
 IMDG Code 8, 23  
 IMO 5  
 Importeur 40  
 IMSBC Code 7  
 Industriegase 142  
 INF Code 8  
 innere Energie 195  
 International Air Transport Association 5  
 International Bulk Chemical Code 8  
 International Civil Aviation Organization 5  
 International Gas Carrier Code 8  
 International Maritime Organization 5  
 International Maritime Solid Bulk  
   Cargoes Code 7  
 Inverkehrbringen 66  
 Ionenbindung 107  
 Ionenverbindung 209  
 Ionisierungsenergie 104  
 Isochore 128  
 Isocyanate 166  
 Isotherme 124

## K

Karzinogenität 58  
 Kathode 241  
 Keimzellmutagenität 58  
 Kelvin-Skala 86  
 Kernladungszahl 95  
 Klassifizierung von Stoffen, Gemischen  
   und Gegenständen 15  
 Knallgasreaktion 238  
 Kohlendioxid 143  
 Kohlenstoff 170  
 Kohlenwasserstoffverbindungen 163  
 Komprimierung  
   – von Gasen 120

Konzentration 206  
 Korrekturparameter 140  
 Kraft 82  
 Kraftstoffe 166  
 Kristallsysteme 172  
 kritischer Punkt 203

## L

Laboreinrichtungen 256f.  
 Laborgeräte 256, 258  
 Laborpraktika 263  
 Laborversuche 263  
   – Bestimmung der Dampfdruckkurve 264  
   – Bestimmung der Siedetemperatur 265  
   – Dichtebestimmung mit dem  
     Pyknometer 266  
   – Wirkung des Luftdrucks 263  
 Leichtmetalle 168  
 Leitfähigkeit, elektrische 108  
 Lewis, Gilbert Newton 106, 224  
 Listenprinzip 45  
 Lithium-Ionen-Akkumulator 249  
 Lithiumzelle 248  
 Lösungen, Zusammensetzung 206  
 Lowry, Thomas Martin 223  
 Luft 133  
 Luftverkehr 24

## M

Magnetquantenzahl 99  
 Mariotte, Edme 123  
 Markierungsverfahren 115  
 MARPOL 8  
 Massenanteil 136, 206  
 Massendefekt 96  
 Massenkonzentration 206  
 Massenzahl 95  
 Mendelejew, Dmitri Iwanowitsch 101  
 Messtechnik 251  
 Metalle 168  
   – edle 243  
   – unedle 243

metallische Bindung 108  
Methanverbrennung 213  
Meyer, Julius Lothar 101  
Mineralfasern 178  
Modellvorschriften 10  
Molalität 206  
molare Masse 82  
molare Masse ausgewählter Gase 132  
Münzmetalle 169

## N

nachgeschaltete Anwender 40  
Natriumchlorid 107  
Natronlauge 235  
Nebenquantenzahl 98  
Nernst, Walther 245  
Neutronen 94  
Newton, Isaac 159  
Newtonsches Reibungsgesetz 160  
Nichteisenmetalle 169  
Nichtmetalle 170  
Nickel 169  
Nickel-Metallhydrid-Akkumulator 248  
Nitrocellulose 180  
Nukleonen 94  
Nuklide, radioaktive 115

## O

Orange Book 2, 61  
Orbitale 99  
organische Peroxide 55  
OTIF 5  
OTIF-Mitgliedstaaten 6  
Oxidation 236  
Oxidationsmittel 237  
Oxidationszahlen 238  
oxidierende Flüssigkeiten und  
Feststoffe 54  
oxidierende Gase 51  
Ozonschicht, schädigend 61

## P

PCB 165  
Pearson, Ralph G. 224  
Penetrometerv Verfahren 163  
Perioden 102  
Periodensystem der Elemente 102, 278  
Permeation 208  
Phase 74  
Phasenzustandsdiagramm 202  
P-Hinweise 48  
Phosphor 170  
Phosphorsäure 235  
pH-Wert 227  
physikalische Größen 80  
Primärelement 247  
Prinzip von Avogadro 130  
Protonen 94  
Pyknometer-Methode 185  
pyrophore Flüssigkeiten und  
Feststoffe 53

## Q

Quantenzahlen 100  
Quecksilber 154

## R

Radioaktivität 110  
REACH-Verordnung 38, 275  
Reaktionen  
– chemische 212, 221  
Rechtsakte der Europäischen Union 42  
Redoxpaar 237  
Redoxreaktionen 236  
Redox-Systeme 239, 244  
Reduktionsmittel 237  
Reinstoffe 77, 79  
Reproduktionstoxizität 59  
RID 6, 19  
Risikokommunikation 40  
Rutherford, Ernest 93, 110

## S

Salzsäure 234  
Sauerstoff 142  
Sauerstoffverbindungen 166  
Säure-Base-Reaktionen 222f.  
Säuredissoziationskonstante 228  
Säuren 222  
– schwache 231  
– starke 230  
Säurerest 223  
Schmelzdruckkurve 201  
Schmelzenthalpie 199  
Schmelztemperatur 203  
Schrödinger, Erwin 98  
Schutzmaßnahmen 66  
Schwefel 170  
Schwefelsäure 235  
Schwermetalle 169, 176  
Sedimentieren 76  
Seeverkehr 23  
Sekundärelement 248  
Selbsteinstufung 45  
selbstentzündliche Stoffe 17  
selbsterhitzungsfähige Stoffe und  
Gemische 53  
selbstzersetzliche Stoffe und  
Gemische 52  
Seltenerdmetalle 170  
Sensibilisierung der Haut 58  
SI-Basiseinheiten 80  
Sicherheit im Labor 260  
Signalworte 47  
Silberoxidzelle 247  
Silizium 170  
SI-Vorsätze 80  
SOLAS 7  
Spannungsreihe  
– elektrochemische 242, 284  
spezifische Zielorgan-Toxizität 59  
Spinquantenzahl 99  
Staub 174  
Stickoxid 134  
Stickstoff 142  
Stickstoffverbindungen 166  
Stöchiometrie 239

Stoff 40

– organischer und anorganischer 77  
Stoffeinteilung 74  
Stoffmengenanteil 206  
Stoffmengenkonzentration 206  
Stofftrennung 76  
Strahlungsarten 111  
Straßenverkehr 20  
Sublimationsdruckkurve 201  
Sublimationsenthalpie 199  
SVHC 41 *Siehe* besonders besorgnis-  
erregende Stoffe  
System 193

## T

Technische Regeln für Gefahrstoffe 67  
Temperatur-Energie-Diagramm 201  
Thermodynamik  
– Grundlagen 192  
Thompson, Josef John 92  
Torricelli, Evangelista 87  
TRGS *Siehe* Technische Regeln für  
Gefahrstoffe  
Trinitrotolul 180  
Tripelpunkt 203  
Troutonsche Regel 200

## U

Umwandlungsenthalpie 199, 282  
Umweltgefahren 60  
UNECE 5  
Unterweisungen 261

## V

Valenzelektronen 100  
van der Waals, Johannes Diderik 139  
Van-der-Waals-Zustandsgleichung  
142  
Verdampfung 159  
Verdampfungsenthalpie 199  
Verdunstung 159  
Verpackungsgruppen 11

Videoaufnahmen von Laborversuchen

- Bestimmung der Dampfdruckkurve **265**

- Bestimmung der Siedetemperatur **266**

- Dichtebestimmung mit dem Pyknometer **267**

- Wirkung des Luftdrucks **264**

Viskosität **159, 162**

- Messverfahren **162**

Volumen **81**

Volumenanteil **137**

## W

Wärme **192**

Wärmeleitung **194**

Wärmestrahlung **195**

Wärmeübergang **195**

Wasser **155**

Wasserstoff **96, 143**

Wasserstoffbrückenbindung **152**

Wechselwirkung **148**

Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa **5**

## Z

Zellen, elektrochemische **247**

Zentralkommission für die Rheinschiffahrt **5**

Zentrifugieren **76**

Zerfall, radioaktiver **111**

Zink **169**

ZKR **5**

Zustandsänderungen **180**

Zustandsgrößen **84**

Zwei-Flächen-Modell **160**

Zwischenstaatliche Organisation für den internationalen Eisenbahnverkehr **5**