

Georg Abts

Einführung in die **Kautschuk- technologie**



2., neu bearbeitete Auflage

HANSER

HANSER

Georg Abts

**Einführung in die
Kautschuktechnologie**

2., neu bearbeitete Auflage

Der Autor:

Dipl.-Ing. Georg Abts

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2019 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Coverbild: Mit freundlicher Genehmigung von Weber & Schaer GmbH & Co. KG, Hamburg

ISBN: 978-3-446-45461-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-45855-0

E-Pub-ISBN: 978-3-446-45994-6

Der Autor

Dipl.-Ing. Georg Abts arbeitete nach seinem Studium 20 Jahre in der damaligen Abteilung Anwendungstechnik des Geschäftsbereichs Kautschuk der Bayer AG, Leverkusen. Danach wechselte er in den Geschäftsbereich Polycarbonates der Covestro AG (ehemals Bayer MaterialScience AG). Er ist Mitglied des CAMPUS-Arbeitskreises und blickt heute auf eine über 30-jährige Erfahrung mit polymeren Werkstoffen zurück. Der Faszination des Werkstoffs Kautschuk kann er sich bis heute nicht entziehen.

Vorwort

Die Entdeckung der Vulkanisation von Kautschuken zu Gummi und damit die Entwicklung leistungsfähiger Elastomere haben den technischen Fortschritt vielleicht ebenso nachhaltig beeinflusst wie die Erfindung des Rades, der Dampfmaschine und die Nutzung der Elektrizität.

Häufig werden Elastomere jedoch nur mit Autoreifen in Verbindung gebracht. Dort übertragen sie enorme Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte und erlauben durch das eingeschlossene Luftpolster komfortables Fahren. Dabei ist eine große Zahl heute selbstverständlich erscheinender Anwendungen ohne das breite Spektrum moderner Elastomere überhaupt nicht denkbar. Sie erfüllen vielfältige Funktionen, jedoch meist im Verborgenen, und werden daher oft unterschätzt oder gar vernachlässigt. So verhindern etwa Dichtungen das Austreten fester, flüssiger oder gasförmiger Stoffe. Schläuche und Förderbänder sind unverzichtbare flexible Bestandteile von Transportsystemen. Antriebsriemen übertragen Kräfte, Zahnriemen steuern Ventile, Bau- und Motorlager dämpfen Vibrationen und Stöße und Kabelmäntel isolieren gegen elektrische Spannungen. Um ihre Aufgaben zuverlässig zu erfüllen, müssen Elastomere nicht nur gute mechanische

Eigenschaften, oft verbunden mit hoher dynamischer Belastbarkeit, sondern oft auch Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse wie Hitze und/oder Kälte, UV-Licht oder Ozon sowie gegen verschiedenste Chemikalien aufweisen.

Die Herstellung eines Elastomerwerkstoffs erfordert nicht nur Kenntnisse über die einzelnen Komponenten, sondern auch eine große Erfahrung hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen untereinander. Das Wissen über die korrekte Verarbeitung eines solchen komplexen Stoffgemisches ist eine weitere Grundvoraussetzung für das Erreichen des gewünschten Eigenschaftsprofils eines Elastomerwerkstoffs.

Im Gegensatz zu thermoplastischen Werkstoffen sind Mischungsaufbau und Verarbeitung von Kautschuken wesentlich komplexer. Thermoplastgranulate sind mehr oder weniger für die gewählte Anwendung maßgeschneidert, sie enthalten in der Regel bereits alle notwendigen Additive und müssen beim Verarbeiter im Prinzip nur noch durch Aufschmelzen unter genügend hohem Druck in die gewünschte Geometrie überführt werden, die sie nach dem Abkühlen beibehalten. (Für eine detaillierte Beschreibung der Thermoplasten und ihrer Verarbeitung sei auf mein Buch *Kunststoff-Wissen für Einsteiger* verwiesen.)

Demgegenüber beginnt der Weg vom Kautschuk zum fertigen Elastomererzeugnis zunächst mit der Auswahl des geeigneten Kautschuks und der Komposition einer spezifischen Rezeptur für die gewünschte Anwendung und das hierfür prädestinierte Verarbeitungsverfahren. Die jeweiligen Rezepturbestandteile müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt sein, da sie sich teilweise gegenseitig in ihrer Wirkung beeinflussen. Weiterhin müssen Fließfähigkeit und Vernetzungsgeschwindigkeit an das

jeweilige Verarbeitungsverfahren angepasst sein, welches durch die Funktion und damit durch die Form des Elastomerwerkstoffs festgelegt ist. Zusammen mit den korrekt gewählten Verarbeitungs- und Vulkanisationsbedingungen sind dies die entscheidenden Parameter für den optimalen Einsatz der schließlich hergestellten Elastomere.

Mit dieser nun in zweiter Auflage vorliegenden *Einführung in die Kautschuktechnologie* sollen die oben genannten Zusammenhänge erläutert und damit das grundlegende Verständnis für diese doch sehr spezielle Technologie vermittelt werden. Gegenüber der recht knapp gehaltenen ersten Auflage wurde dieses Buch gründlich überarbeitet und erheblich erweitert. Nach einem historischen Rückblick und der Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung folgt eine Einführung in das Gebiet der Polymere sowie in die Spezifika elastomerer Werkstoffe. Anschließend werden die Eigenschaften der einzelnen Elastomere erläutert. Danach werden der Aufbau von Kautschukmischungen sowie die hierbei verwendeten Zuschlagstoffe vorgestellt. Schließlich werden die üblichen Verarbeitungsverfahren sowie die wichtigsten Prüfmethoden erläutert. Abgerundet wird das Buch mit einer Darstellung typischer Produkte.

Hinsichtlich der geschichtlichen Entwicklung ist zu berücksichtigen, dass die genannten Jahreszahlen in einigen Fällen mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet sind. Die Zeitpunkte der Entdeckung, Veröffentlichung oder Patentierung oder der industriellen Umsetzung stimmen in den verwendeten Quellen nicht immer überein. Diesbezügliche Hinweise sowie Anregungen und Kommentare zum Inhalt werden gerne entgegengenommen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei folgenden Firmen für die Überlassung von Bildmaterial bedanken:

- Gerlach Maschinenbau GmbH, Nettetal
- GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, Buchen
- Harburg-Freudenberger Maschinenbau GmbH, Freudenberg
- Klöckner DESMA Elastomertechnik GmbH, Fridingen
- KraussMaffei Berstorff GmbH, Hannover
- TROESTER GmbH & Co. KG, Hannover
- WEBER & SCHAER GmbH & Co. KG, Hamburg
- Zwick Roell AG, Ulm

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Hanser-Verlags, insbesondere Frau Ulrike Wittmann für ihre Unterstützung als Lektorin sowie Herrn Strohbach für die Umsetzung und Produktion dieses Buches.

Dieses Buch ist meinem Vater Gerhard Abts gewidmet (1932 – 2018).

Inhalt

Titelei

Impressum

Der Autor

Vorwort

Inhalt

1 Einleitung

1.1 Historische Entwicklung

1.2 Wirtschaftliche Bedeutung

2 Grundlagen

2.1 Vom Monomer zum Polymer

2.2 Weitere Verknüpfungsarten

2.3 Arten polymerer Werkstoffe

2.3.1 Übersicht

2.3.2 Rheologisches Verhalten

2.3.3 Temperaturabhängige Charakteristik

2.3.4 Elastomere

2.3.5 Thermoplaste

2.3.6 Thermoplastische Elastomere

2.3.7 Duroplaste

3 Die Vernetzung von Kautschuken zu Elastomeren

3.1 Grundlagen

3.2 Die Vernetzung mit Schwefel

3.3 Die Vernetzung mit Peroxiden

3.4 Weitere Vernetzungsarten

4 Auswahlkriterien für die wichtigsten Kautschuke

4.1 Übersicht und Nomenklatur

4.2 Mechanische und dynamische Eigenschaften

4.3 Alterungs- und Witterungsbeständigkeit

4.4 Wärmebeständigkeit

4.5 Chemische Beständigkeit

4.6 Kälteflexibilität

4.7 Abrieb und Verschleiß

4.8 Der Kostenfaktor

5 Spezifische Eigenschaften der verschiedenen Elastomere

5.1 Einleitung

5.2 Naturkautschuk, NR

5.3 Isoprenkautschuk, IR

5.4 Styrol-Butadien-Kautschuk, SBR

5.5 Butadienkautschuk, BR

5.6 Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (Nitrilkautschuk),
NBR

5.7 Hydrierter Nitrilkautschuk, HNBR/NBM

5.8 Chloroprenkautschuk, CR

5.9 Butylkautschuk/Brombutylkautschuk/
Chlorbutylkautschuk, IIR/BIIR/CIIR

5.10 Chloriertes/Chlorsulfoniertes Polyethylen,
CM/CSM

5.11 Ethylen-Propylen-(Dien)-Kautschuk, EPM/EPDM

5.12 Ethylen-Vinylacetat-Kautschuk, EVM

5.13 Acrylatkautschuk, ACM

5.14 Ethylen-Acrylat-Kautschuk, AEM

5.15 Chlorhydrinkautschuk/Epichlorhydrinkautschuk,
CO/ECO/GECO

5.16 Silikonkautschuk, VMQ/PVMQ/FVMQ

5.17 Fluorkautschuk, FKM/FFKM/FEPM/AFMU

5.18 Norbonenkautschuk, NOR

5.19 Polysulfidkautschuk, T/OT

5.20 Polyurethankautschuk AU/EU

5.21 Sonstige

5.22 Zusammenfassender Vergleich

6 Thermoplastische Elastomere, TPE

6.1 Übersicht und Nomenklatur

6.2 Spezifisches Eigenschaftsprofil

6.2.1 Thermoplastische Elastomere auf Basis von
Polyetheramiden (TPA)

6.2.2 Thermoplastische Elastomere auf Basis Polyetherester (TPC)

6.2.3 Unvernetzte (TPO) und vernetzte (TPV) thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis

6.2.4 Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis (TPS)

6.2.5 Thermoplastische Polyurethan-Elastomere (TPU)

7 Kautschukchemikalien

7.1 Aufbau von Kautschukmischungen (Compounding)

7.2 Vernetzungssysteme

7.2.1 Vernetzung mit Schwefel

7.2.1.1 Vulkanisationsbeschleuniger und Schwefelspender

7.2.1.2 Vernetzungsaktivatoren

7.2.1.3 Vulkanisationsverzögerer (Retarder)

7.2.2 Peroxidvernetzung

7.2.3 Vernetzung mit Metalloxiden

7.2.4 Weitere Vernetzungsarten

7.3 Füllstoffe

7.3.1 Ruße

7.3.2 Kieselsäuren

7.3.3 Weitere Füllstoffe

7.4 Weichmacher und Verarbeitungshilfsmittel

7.4.1 Mineralölweichmacher

7.4.2 Synthetische Weichmacher

7.4.3 Verarbeitungshilfsmittel

7.5 Alterungs- und Ozonschutzmittel

7.6 Haftmittel

7.7 Mastizierhilfsmittel

7.8 Treibmittel

7.9 Sonstige Produkte

8 Die Verarbeitung von Kautschuk und Kautschukmischungen

8.1 Übersicht

8.2 Mastikation von Naturkautschuk

8.3 Mischen

8.3.1 Mischen im Innenmischer

8.3.2 Mischen auf dem Walzwerk

8.4 Formgebung und Vulkanisation

8.4.1 Pressverfahren

8.4.1.1 Kompressionsverfahren (Compression-Moulding)

8.4.1.2 Transferpressverfahren (Transfer-Moulding)

8.4.1.3 Spritzgießverfahren (Injection-Moulding)

8.4.1.4 Spritzprägeverfahren (Injection-Transfer-Moulding)

8.4.2 Extrusion und kontinuierliche Vulkanisation

8.4.2.1 Extrusion

8.4.2.2 Kontinuierliche Heißluftvulkanisation

8.4.2.3 Kontinuierliche Dampfvulkanisation

8.4.2.4 Kontinuierliche Heißgasvulkanisation

8.4.2.5 Salzbadvulkanisation (LCM – Liquid-Curing-Medium)

8.4.2.6 Vulkanisation im Fließbett (Fluid-Bed)

8.4.2.7 Vernetzung durch energiereiche Strahlen

8.4.2.8 Extrusion und Vulkanisation von verstärkten Schläuchen

8.4.2.9 Beflocken von Profilen

8.4.3 Kalandrierte Artikel

8.4.4 Vulkanisation im Autoklaven (Freiheizung)

8.4.5 Vulkanisation mit heißem Wasser

8.4.6 Tempern

8.5 Artikelbezogene Spezialverfahren

8.5.1 Walzenbeläge

8.5.2 Antriebs- und Zahnriemen

8.5.3 Reifen

8.5.4 Moos-, Zell- und Schwammgummi

8.6 Die Verarbeitung und Anwendung von Latex

9 Prüfung von Kautschukmischungen und Elastomeren

9.1 Rheologische Prüfungen

9.1.1 Mooney-Viskosität und Mooney-Relaxation (DIN 53523, ISO 289)

9.1.2 Anvulkanisation (DIN 53523, ISO 289)

9.1.3 Bestimmung der Vernetzungsisotherme (DIN 53529)

9.2 Mechanische Prüfungen

9.2.1 Bestimmung der Härte (ISO 7619, ISO 48)

9.2.2 Zugversuch (ISO 37)

9.2.3 Rückprallelastizität (ISO 4662)

9.2.4 Weiterreißwiderstand (ISO 34)

9.2.5 Druckverformungsrest (ISO 815)

9.2.6 Abriebwiderstand (ISO 4649, ISO 5470, ASTM D394)

9.3 Dynamische Prüfungen

9.3.1 Zermübnungsprüfungen

9.3.2 Ermüdungsprüfungen

9.4 Alterung und chemische Beständigkeit

9.5 Kälteflexibilität

10 Typische Produkte

10.1 Formteile

10.1.1 O-Ringe

10.1.2 Faltenbälge und Schutzkappen (Manschetten)

10.1.3 Wellendichtringe und Gleitringdichtungen

10.1.4 Federelemente: Puffer und Schwingungsdämpfer

10.2 Schläuche

10.3 Profile

10.4 Antriebs- und Steuerriemen

10.5 Transportbänder (Fördergurte)

10.6 Walzenbeläge

10.7 Kabel

10.8 Beschichtete Gewebe

10.9 Reifen

11 Anhang

11.1 Chemische Beständigkeit von Elastomeren

11.2 Weiterführende Fachliteratur

11.3 Fachzeitschriften

11.4 Verbände

11.5 Studiengänge

1 Einleitung

Die Nutzung des Kautschuks hat mindestens eine Jahrhunderte alte, wenn nicht sogar eine Jahrtausende alte Tradition. Allerdings liegt der Beginn der großtechnischen industriellen Nutzung sowie die Entwicklung von Synthekautschuken gerade einmal ein Jahrhundert zurück.

Bevor auf die näheren Einzelheiten eingegangen wird, erscheint es sinnvoll, zunächst einige häufig genannte Begriffe zu erklären.

Naturkautschuk ist ein elastischer Feststoff, der aus dem Saft eines tropischen Baumes, der *Hevea brasiliensis*, gewonnen wird. Durch eine spezielle Ritztechnik, dem so genannten Zapfen, wird zunächst eine weiße, milchähnliche Flüssigkeit erhalten, die sich an Luft langsam verfestigt und dabei verdunkelt. Der Ähnlichkeit zur Milch verdankt diese Flüssigkeit den Namen *Latex*. Der Name Kautschuk geht auf die indianische Bezeichnung „weinender Baum“ zurück. Vor allem die in Südamerika wild wachsenden Kautschukbäume bildeten insbesondere in den ersten Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts die Basis aller Elastomererzeugnisse, bis der ostasiatische Plantagenkautschuk den überwiegend aus Brasilien stammenden Wildkautschuk verdrängte. Dazu gesellten sich im Laufe des zwanzigsten

Jahrhunderts viele Spielarten neu entwickelter Synthesekautschuke.

Kautschuk ist elastisch, das heißt, er ist in der Lage, nach einer Verformung in gewissen Grenzen seine ursprüngliche Form wieder anzunehmen. Solche Stoffe bezeichnet man generell als *Elastomere*. Allerdings weist reiner Kautschuk, gleich ob Natur- oder Synthesekautschuk, nur eine begrenzte Elastizität auf. Er lässt sich mit vergleichsweise geringer Kraft überdehnen und demnach plastisch verformen. Außerdem wird Kautschuk bei Wärmeeinwirkung klebrig, bei Kälte jedoch so steif, dass er nur mit großen Kräften zu verformen ist. Aufgrund seines molekularen Aufbaus kann Kautschuk nicht wie ein Thermoplast durch Erwärmen aufgeschmolzen werden, vielmehr wird er bei zu großer Hitzeeinwirkung zersetzt.

Seine herausragenden Eigenschaften, insbesondere die hohe Gummielastizität, erhält Kautschuk erst durch die *Vernetzung*, bei der die Kautschukmoleküle in bestimmter Weise chemisch miteinander verbunden werden (vgl. [Kapitel 3](#)). Da dieser Vorgang in der Regel bei Temperaturen oberhalb von 100 °C abläuft, wird er auch als *Vulkanisation* bezeichnet, die hierdurch erhaltenen Produkte heißen demnach *Vulkanisate*. Die Begriffe Elastomer, Vulkanisat und *Gummi* werden definitionsgemäß nur für vernetzten Kautschuk verwendet und sind somit ebenbürtig. (Im internationalen Sprachgebrauch bezeichnet man jedoch sowohl Kautschuk als auch Vulkanisate als „rubber“ oder „elastomers“.) Die deutsche Bezeichnung „Gummi“ beruht dabei auf der ursprünglichen und falschen Annahme, dass Latex identisch mit dem Pflanzensaft bestimmter Akazienarten sei, der als *Gummi arabicum* bezeichnet wird. Beim populären „Gummibaum“ (*Ficus elastica*) handelt es sich übrigens um eine

Feigenart, die Pflanze ist nicht mit der *Hevea brasiliensis* verwandt.

Gummierzeugnisse sind in der weit überwiegenden Mehrheit schwarz eingefärbt, da spezielle Ruße zur Erzielung guter mechanischer und dynamischer Eigenschaften eingesetzt werden. Bei weißen oder farbigen Gummierzeugnissen werden Kieselsäuren, Talkum, Kaolin, Kreide und dergleichen als Füllstoff verwendet. Man bezeichnet diese als *helle Füllstoffe*. Zudem werden bei der Verarbeitung Weichmacher verwendet, die nicht nur die Viskosität reduzieren, sondern im Verbund mit den Füllstoffen die Härte des Vulkanisats bestimmen oder die Kälteflexibilität verbessern. Neben Füllstoffen und Weichmachern sind noch Alterungsschutzmittel, Verarbeitungshilfsmittel und insbesondere die Chemikalien des Vulkanisationssystems in einer Kautschukmischung enthalten. Die Dosierung aller Komponenten wird additiv zu 100 Teilen Kautschuk berechnet und als *phr* (per hundred rubber) ausgedrückt.

1.1 Historische Entwicklung

Das genaue Datum des ersten Kontakts mit Kautschuk bleibt im Dunkel der Vergangenheit verborgen. Die Einwohner Südamerikas verwendeten den Saft des Kautschukbaums, der *Hevea brasiliensis*, wahrscheinlich schon seit Urzeiten.

Während ihrer Reisen nach Südamerika (1495/1519) stießen der Entdecker Christoph Kolumbus und der Konquistador Hernán Cortez erstmals auf elastische Bälle, die bei den dortigen Einwohnern in Verwendung waren, maßen aber ihrer

Entdeckung keine weitere Bedeutung bei. In Europa wurde das Interesse an Kautschuk aufgrund von Berichten des Astronomen und Geographen Charles-Marie de La Condamine und des Ingenieurs François Fresneau geweckt, die sich seit 1736 zur Vermessung von Meridianen in Südamerika aufhielten und dabei das Zapfen von Kautschukbäumen beobachteten. Aus der Rinde des später von Botanikern „*Hevea brasiliensis*“ genannten Baumes gewannen die Einwohner eine weiße, klebrige Flüssigkeit, die ihnen ermöglichte, verschiedene wasserdichte Gebrauchsgegenstände herzustellen. Aufgrund der äußerlichen Ähnlichkeit zu Milch (lateinisch „*lac*“, spanisch „*lacteo*“: milchig sein) prägte de La Condamine die Bezeichnung *Latex* für den Pflanzensaft, der bis zu 40 % Kautschuk enthält. Die einheimische Bezeichnung „*caa ochu*“ für weinender Baum wurde über das französische Wort *caoutchouc* zum heutigen Begriff *Kautschuk*. (In der Literatur finden sich auch weitere hiervon abweichende Schreibweisen.)

Der Verwendung dieses neuen Rohstoffs für die Herstellung wasserdichter Artikel wie Regenplanen oder Stiefel stand jedoch seine geringe Haltbarkeit entgegen. Problematisch war insbesondere der durch Zersetzungsprozesse in Naturlatex enthaltene Eiweiße entstehende Geruch. Um dieses Problem zu umgehen, wurde der Latex schließlich unmittelbar nach seiner Gewinnung über offenem Feuer getrocknet. Der Rauch diente dabei auch als Konservierungsmittel. Dieses Verfahren wird auch heute noch in abgewandelter Form bei der Gewinnung von Naturkautschuk angewendet; die erhaltenen Felle nennt man „*smoked sheets*“ (vgl. [Abschnitt 5.2](#)).

Der auf diese Weise erhaltene Kautschuk ließ sich zwar verschiffen, war aber für eine weitere Verarbeitung zu zäh. Somit waren Verarbeitung und Anwendung von Latex auf regionale

Erzeugnisse beschränkt, oder man musste die zu beschichtenden Gegenstände auf die kostspielige und zeitaufwendige Reise nach Brasilien senden. Getreu der Devise „Wenn der Prophet nicht zum Berg kommt, dann muss der Berg zum Propheten kommen“ ließ beispielsweise der damalige König von Portugal im Jahr 1755 seine Reitstiefel nach Brasilien verschicken, um sie dort wasserfest beschichten zu lassen. Fresneau gelang es 1761, Kautschuk in Terpentin zu lösen. Die beiden Wissenschaftler Pierre-Joseph Macquer und L. A. M. Hérisant stellten ab 1763 Formartikel aus in Terpentin gelöstem Kautschuk her, 1768 ersetzten sie Terpentin durch Ether. Sie bestrichen Wachsformen mit solchen Kautschuklösungen und konnten (nach Verdunsten des Lösungsmittels) durch Abschmelzen des Wachses die ersten Formartikel wie Schläuche oder Schuhe herstellen. Allerdings waren die Eigenschaften dieser Kautschukerzeugnisse völlig unzureichend, da das Verfahren der Vulkanisation noch nicht bekannt war. Die Produkte waren in der Wärme klebrig und verbreiteten hauptsächlich durch die bei der Verarbeitung verwendeten Lösungsmittel besonders im Sommer immer noch einen starken Geruch. Im Winter verhärteten die Produkte durch die einsetzende Kristallisation des Kautschuks. Es war jedoch immerhin möglich, die Gasdurchlässigkeit von Textilien durch Beschichtungen mit Kautschuk zu reduzieren. So konstruierte der Physikprofessor Jacques Alexandre César Charles aus mit Kautschuk beschichteter Seide 1783 den ersten Wasserstoffballon. Schließlich fand Antoine François De Fourcroy 1791 heraus, dass sich Latex durch Zugabe von Alkalien stabilisieren ließ und somit für den Transport von Brasilien nach Europa haltbar gemacht werden konnte. Allerdings gelangte erst 1824 eine erste Lieferung derart stabilisierten Latex nach Europa.

Der Mechaniker Edward Nairne entdeckte 1770 die Möglichkeit, fehlerhafte Bleistiftzeichnungen durch Reiben mit Kautschuk anstelle des bisher benutzten Brotes zu korrigieren. Dieser Effekt wurde vom Chemiker Joseph Priestley veröffentlicht, der daher für lange Zeit auch als der Erfinder des Radiergummis galt. Nairne vermarktete seine Radierer unter dem Namen *Indian Rubber*, das Wort „rubber“ („Reiber“) wird im englischen Sprachgebrauch heute sowohl für unvulkanisierten Kautschuk als auch für Gummi verwendet. J. Ingenhousz nutzte 1779 die hohe Klebrigkeit frisch angeschnittenen Kautschuks zur Fertigung erster Schläuche. S. D. de la Vega verwendete 1798 Latex zum Verkleben von Ledersäcken.

Weitere frühe Einsatzgebiete für Naturkautschuk waren elastische Bänder für Hosenträger und Strumpfbänder (1803), mit Kautschuk beschichteter Textilriemen (John Bright, 1810), Bezüge für Laufräder (Karl Friedrich Christian Ludwig Freiherr Drais von Sauerbronn, 1818) sowie Regenmäntel. Der Arzt James Syme fand 1821 heraus, dass sich Kautschuklösungen auf Basis des preiswerten Naphta aus der Erdöldestillation herstellen ließen. Der Chemiker Charles Macintosh umging das Problem der hohen Klebrigkeit durch das erste Sandwichverfahren: ein mit in Naphta gelöstem Kautschuk bestrichenes Baumwollgewebe wurde mit einer zweiten Gewebelage abgedeckt (1823). Allerdings waren auch diese Regenmäntel im Winter immer noch sehr steif und unhandlich und das Problem der Geruchsentwicklung in der Wärme war ebenfalls noch nicht gelöst. Der Name Macintosh prägte aber immerhin den noch heute in der englischen Umgangssprache gebräuchlichen Begriff *Mackintosh* oder kurz „Mac“ für Regenmäntel. Er hat sogar in der Popmusik Einzug gehalten (im Lied „Penny Lane“ der Beatles). Es

lässt sich aber nicht mehr nachvollziehen, wann und warum der Buchstabe „K“ hinzugefügt wurde.

1826 erhielt H. C. Lacy ein Patent auf eine Kutschenfederung durch Kautschukblöcke. Thomas Hancock, der ursprünglich das Handwerk des Möbelschreiners erlernt hatte, beschäftigte sich mittlerweile intensiv mit Kautschuk und arbeitete schließlich mit Charles Macintosh zusammen. 1824 hatte er bereits vorgeschlagen, Kunstleder aus mit Latex beschichtetem Gewebe herzustellen, 1830 vertrieb er mit Latex beschichtete Kleidung. Schon im Jahr 1828 erhielt auch J. N. Reithofer ein Patent auf gummierte Fäden zur Herstellung von elastischen Textilien.

Der Siegeszug des Gummis wurde schließlich durch die Entdeckung der Vulkanisation eingeläutet. Die Vulkanisation stellt gleichzeitig die erste chemische Umwandlung eines Naturstoffs durch Zusatz von Chemikalien dar. Der Ursprung dieser zentralen Entdeckung für die gesamte Kautschuktechnologie beruhte interessanterweise auf Überlegungen zur Verbesserung der Verfahrenstechnik. Nach wie vor bestand das Problem, dass getrockneter Kautschuk äußerst schwierig zu verarbeiten war. Artikel aus Kautschuklösungen wiesen dagegen eine hohe Klebrigkeit und einen unangenehmen Geruch auf. Thomas Hancock hatte 1821 beobachtet, dass man frisch angeschnittene Kautschukstücke durch Verpressen miteinander verbinden konnte. Mit einer von ihm konstruierten Maschine, dem sogenannten *Masticator*, sollte der zähe Kautschuk daher zerkleinert werden, um leichter zu verarbeitende Stücke zu erhalten. Es stellte sich jedoch heraus, dass durch die mechanische Bearbeitung die Klebrigkeit noch weiter zunahm, und der Kautschuk schließlich sogar eine teigige Konsistenz annahm (vgl. Mastikation, [Abschnitt 8.2](#)).

Verschiedene Forscher versuchten, die Klebrigkeit durch Pudern zu kompensieren, ein damals übliches Pudermittel war Schwefel. 1832 beobachtete Friedrich Wilhelm Lüdersdorff, dass ein Gemisch aus Kautschuk und wenig Schwefel nach Erwärmen eine deutlich reduzierte Klebrigkeit aufwies. Nathaniel Hayward bemerkte 1838, dass die Oberfläche von mit Schwefel gepudertem Naturkautschuk durch Solarisation, also unter Einwirkung von Sonnenlicht, verhärtete, allerdings auf Kosten der Haltbarkeit. Der amerikanische Erfinder Charles Nelson Goodyear erwarb von Hayward das entsprechende Patent und stellte mit diesem Verfahren 150 Postsäcke her, die allerdings nach einiger Zeit nur noch eine klebrige Masse bildeten. Versuche, Schwefel mit Terpentin in den Kautschuk einzuarbeiten, scheiterten. Goodyear, der in dieser Zeit oft in bitterer Armut lebte, arbeitete wie besessen daran, die hohe Klebrigkeit des Kautschuks zu eliminieren und haltbare Produkte herzustellen. Er hatte inzwischen erkannt, dass Bleiweiß (basisches Bleioxid, heute üblicherweise durch Zinkoxid ersetzt) die Reaktion des Kautschuks mit Schwefel aktivierte, und dass diese Reaktion durch Wärme begünstigt wurde. Schließlich stellte er 1839 fest, dass eine versehentlich auf eine Herdplatte gefallene Mischung aus Kautschuk, Schwefel und Bleiweiß nicht mehr klebrig war, sondern teilweise verkohlt. Somit war Kautschuk von seinen Nachteilen befreit (oder geheilt: „*cured*“ – im englischen Sprachgebrauch synonym mit „vernetzt“ oder „vulkanisiert“). In den folgenden Jahren versuchte Goodyear, die optimalen Bedingungen zu finden, die zu einem nicht mehr klebrigen, aber elastischen Produkt führten. Schließlich beschrieb er eine Erhitzung mit Dampf von 130 °C unter Druck und über einen Zeitraum von vier bis sechs Stunden als geeignet. Es bedurfte jedoch noch einer Reihe weiterer Experimente, bis Goodyear endlich die für eine vollständige Vernetzung