

*Kunststoffe im Sport*

---



Martin Holfeld

# Chemie und Sport – über den Sport die Chemie erleben

„Schneller höher, weiter“ - heißt das Motto, dem die Kunststoffe im Sport zur Geltung verhelfen. Sie ermöglichen neue Rekorde, schützen vor Verletzungen und sorgen im Breitensport dafür, dass das Hobby Spaß macht.<sup>1</sup>

Der Sport war schon immer ein Gebiet, das Innovationen aus der Chemie übernommen hat. Einer der ersten Kunststoffe, das Celluloid, wurde von den Brüdern Hyatt auf der Suche nach einem geeigneten Kunststoff für Billardkugeln entwickelt<sup>2</sup>.

Die ersten Billardkugeln wurden aus Elfenbein gefertigt. Um den Bedarf zu decken, wurden bis zur Jahrhundertwende jährlich 12000 Elefanten getötet. Da Elfenbein als Naturstoff kleine Unregelmäßigkeiten besaß, liefen die Kugeln nicht immer geradeaus. Dies veranlasste einen reichen Amerikaner, 10000 Dollar für denjenigen zu bieten, der ein gleichmäßigeres Material bringen konnte. Zwar wurden nie Billardkugeln aus Celluloid gefertigt, aber der Kunststoff ist dennoch nicht aus dem Sport wegzudenken, weil er bis heute noch das Material für Tischtennisbälle ist. (siehe auch Versuch 1)

Für den Chemieunterricht ist es wichtig zu zeigen, welche Rolle die Chemie in unserem Alltagsleben spielt. Gerade Schüler, die nicht leicht für das Unterrichtsfach zu motivieren sind, können durch den Bezug zum Alltag für die Chemie begeistert werden. Viele fachdidaktische Veröffentlichungen<sup>3,4</sup> geben hier Hinweise und Ratschläge, wie man den Alltagsbezug möglichst anschaulich in den Unterricht integrieren kann.

Mit zunehmender Freizeit nimmt der Sport an Bedeutung zu. Ob Mountainbiking, Tennis, Ski oder Golf, die Materialien haben sich grundlegend geändert. Moderne Materialien sind leichter, fester und verwindungssteifer. Ein Weltklasse Skifahrer hätte heute mit einem nur drei Jahre alten Ski nicht mal mehr eine Chance, bei einem Jugendrennen zu gewinnen.

Auch die Sportkleidung verändert sich zunehmend. Moderne Funktionskleidung ist atmungsaktiv, winddicht und federleicht. Durch die Verwendung spezieller Stretchstoffe kann sie wie eine zweite Haut am Körper anliegen.

Die Chemie spielt auch eine große Rolle bei der Trainingsplanung und -steuerung. Nicht nur der Flüssigkeitsverlust wird durch isotonische Getränke ausgeglichen, sondern auch die Regeneration nach dem Training wird durch bestimmte Inhaltsstoffe wie, z.B. Kreatin schneller erreicht.

Auch bei der Behandlung der theoretischen Inhalte im Sportunterricht gewinnen die chemischen Zusammenhänge immer mehr an Bedeutung. Dopingpräparate, anabole Wirkstoffe wie das Wachstumshormon können hier besprochen werden.

Die ganze Bandbreite der Chemie kann über den Bezug zum Sport erschlossen werden. Anorganische-, Allgemeine-, Organische-, Bio- und Polymerchemie besitzen Inhalte aus dem Sport. Im folgenden Abschnitt sollen Beispiele gegeben werden, die Chemiefachkollegen für Einführungen in ihrem Unterricht nutzen können.

Ein Spiel, wie z.B. Fußball, ist durch die Errungenschaften der Chemie stark verändert worden. Der Ball besteht nicht mehr aus Leder, sondern aus Kunststoff. Damit saugt er kein Wasser mehr auf und bleibt formstabil (siehe auch Versuch 2). Auch die Schuhe sind nicht mehr

---

<sup>1</sup> Stepping, K.: Kunststoffe in Freizeit und Sport, Verband der Kunststoffherstellenden Industrie, Karlstr. 21, 60329 Frankfurt, e-mail: info@vke.de

<sup>2</sup> Arbeitsgemeinschaft Deutsche Kunststoffindustrie(AKI): Kunststoffe, Werkstoffe unserer Zeit, Karlstraße 21, Frankfurt am Main, S.28, 1983

<sup>3</sup> Chemie in sinnstiftenden Kontexten: Praxis der Naturwissenschaften Chemie, PdN, Heft 1/50 15. Januar 2001, Aulis Verlag Deubner & Co KG Köln Leipzig

<sup>4</sup> Robert Kopitzke: Modern Sport an Chemistry: What a Chemically Aware Sports Fanatic Should Know, J.ChemEd.wisx.edu, Vol79, No7, July 2002, Journal of Chemical Education

aus Leder, sondern aus einer Vielzahl verschiedener Kunststoffe, die eine gute Dämpfung und einen guten Halt gegen Wegrutschen auch auf feuchtem Rasen garantieren. Das Mannschaftstrikot besteht aus leichten, atmungsaktiven Textilien, und die Schienbeine sind durch Schienbeinschützer geschützt, die so konstruiert sind, dass sie den Impuls eines Tritts leicht abfangen.



**Abb. 1:** Tennisschläger der letzten 15 Jahre von links alt nach rechts neu. Die Schlagfläche ist nicht nur größer geworden, auch das Material hat sich grundlegend geändert.

Bei anderen Sportarten, wie z.B. Tennis oder Skifahren, hat sich durch den Einsatz moderner Werkstoffe noch viel mehr verändert. Tennisschläger haben eine größere Schlagfläche und sind um vieles leichter. Moderne Tennisbälle sind nicht nur hohle Filzkugeln. Die Bälle sind mit 700 Millionen Mikrozellen gefüllt, die ein gleichbleibendes Spielverhalten garantieren sollen. Die Ummantelung besteht aus einer Karkasse aus Titandioxid und Polybutadien zur Verbesserung der Spieleigenschaften, und die Hülle ist aus einem Spezialfilz für lange Haltbarkeit und gutes Ballgefühl auf allen Bodenbelägen gefertigt.



**Abb. 2:** In Ski und Surfbrettern werden häufig faserverstärkte Kunststoffe verwendet

## Faserverstärkte Verbundwerkstoffe

Eine Faser hat eine höhere Festigkeit als das gleiche Material in anderer Form. Je dünner die Faser ist, umso größer wird ihre Festigkeit. Die Faseroberfläche ist in der Regel mit funktionellen Gruppen versehen, die mit der Matrix physikalische oder chemische Bindungen eingehen kann. Die Matrix fixiert die Faser und schützt sie vor Druckbelastungen und vor Umwelteinflüssen. In faserverstärkten Verbundwerkstoffen wird die Leistungsfähigkeit wesentlich durch die Haftfestigkeit der Matrix auf der Faseroberfläche bestimmt<sup>5</sup>. Da die Fasern sehr dünn sind und der Fasergehalt oft sehr hoch ist, ist die Grenzfläche zwischen Matrix und Faser sehr groß. Sie ist für die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe ebenso wichtig, wie die Komponenten selbst.

Besonders Eigenschaften wie niedriges Gewicht, hohe Verwindungssteifheit und große Stabilität werden in den faserverstärkten Kunststoffen in einem Material vereint.

Viele Sportgeräte wie z.B. Tennisschläger, Boote, Fahrradrahmen u.ä. werden heute aus Verbundwerkstoffen gefertigt. Häufig eingesetzt werden Glasfasern, Aramidfasern oder Kohlenstofffasern, die mit einem Epoxid-Härter als Matrix verbunden sind (siehe auch Versuch 6).

Glasfasern sind, historisch gesehen, die erste Faserart. Die industrielle Fertigung erfolgt seit 1910. Sie besitzen eine hohe Festigkeit und ein hohes spezifisches Gewicht im Vergleich zu Kohlenstofffasern und Aramidfasern. Im Sport werden sie vor allem wegen ihrer hohen Bruchdehnung in Stabhochsprungstäben eingesetzt.<sup>6</sup>

Aramid ist ein aromatisches Polyamid. Die Fasern sind unter dem Handelsnamen Kevlar bekannt. Sie besitzen gute Schlagbeanspruchung und hohes Energieaufnahmevermögen. Im Sport werden sie bevorzugt in Sportgeräten eingesetzt, die oft stoßartigen Belastungen ausgesetzt werden, wie z.B.: Tennisschläger, Surfbretter und Skier.

Kohlenstofffasern wurden schon 1880 durch Pyrolyse von Baumwolle hergestellt. 1961 erzeugte der Japaner Shindo durch Pyrolyse von Polyacrylnitrilfasern Kohlenstofffasern mit hervorragenden Festigkeitseigenschaften.<sup>7</sup> Seitdem haben Kohlenstofffasern wegen ihrer hohen Festigkeit und ihrer relativ geringen Dichte zunehmend Bedeutung beim Bau von Sportgeräten gefunden. Verursacht durch ihre günstigen gewichtsbezogenen Eigenschaften, werden sie unter anderem in Skier, Fahrradrahmen und Tennisschlägern verwendet.

**Tabelle 1: Sportkleidung**

Produkt	Material	Funktion	Strukturformel
Sportsocken CoolMax <sup>®8</sup>	Polyester	Durch eine Vierkanalfaser wird Feuchtigkeit nach Außen geleitet	$\text{R}_1-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{R}_2$
Funktionskleidung <sup>9</sup>	Gore-Tex <sup>®</sup>	Perforierte Teflonmembrane	$\cdots \text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}_2 \cdots$

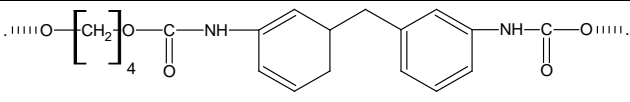
<sup>5</sup> Heißler, H.: Verstärkungsfasern in Hochleistungs-Verbundwerkstoffen, In Gummi-, Fasern, Kunststoffe 40 Jg., Heft 4 Stuttgart, 1987, S.182-184

<sup>6</sup> Michaeli, W.; Wegener, M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe, München, 1990, S.58

<sup>7</sup> Bukatsch, F.; Glöckner W.: Experimentelle Schulchemie, Band 9 Organische Chemie 3, Aulis Deubner & Co Kg, Köln, 1997, SS 65-67

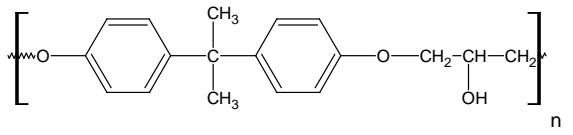
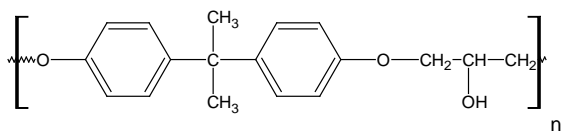
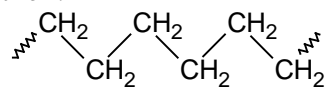
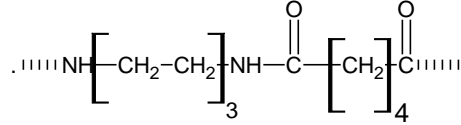
<sup>8</sup> Lidl Stiftung & Co.KG., 74167 Neckarsulm

<sup>9</sup> gore-tex technologies Fachhandel Info, W.L. Gore & Associates GmbH Aiblinger Straße 60, D-Feldkirchen-Westerham www.gore-tex.com

Schwimm und Laufkleidung, z.B. Haifischhaut <sup>10</sup>	Elastan®	Polyurethanfaser, die Kleidung ist sehr dehnbar und liegt glatt auf der Haut.	
Taucheranzüge, Surfanzüge	Neopren®	widerstandsfähiges, gummielastisches Material	$\text{H}_2\text{C}=\underset{\text{Cl}}{\text{C}}-\text{CH}=\text{CH}_2$
Sportschuhe z.B. Puma <sup>11</sup> cell technologie	e <sup>+</sup> cell, i cell, ld cell	Moderne Technologie als Schaumersatz zur Dämpfung in Sportschuhsohlen	

Sogar beim Schwimmen, einer Sportart, bei der man nicht mit einem großen Einfluss durch moderne Materialien rechnet, werden Spezialkunststoffe verwendet. Bei den Olympischen Spielen im Jahr 2000 überraschte die amerikanische Mannschaft durch Ganzkörperschwimmanzüge, die den Widerstand im Wasser absenken sollen.

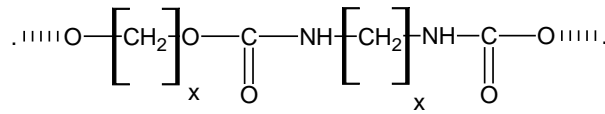
**Tabelle 2: Sportgeräte**

Produkt	Material	Funktion	Strukturformel
Fahrradrahmen (siehe auch Versuch 6)	Faserverstärkte Kunststoffe Karbonfasern mit Epoxid-Härter	Leichtes, sehr stabiles Material für Fahrradrahmen	 mit Karbonfasern
Tennisschläger (siehe auch Versuch 6)	Faserverstärkte Kunststoffe, z.B. Karbonfasern oder Glasfasern mit Epoxid-Härter	Leichte Materialien, die hoher Beanspruchung standhalten.	 mit Karbonfasern oder Glasfasern
Abfahrtsskibeläge	Carbonfaserbeläge (schwarz) Gesinterte Rennbeläge (weiß oder angefärbt).	Hohe Wachaufnahmefähigkeit.	<b>Kohlenstoff oder Polyethen:</b> 
Segel	Nylon	Leichte pflegliche Sportkleidung	

<sup>10</sup> Speedo fast skin, Speedo Deutschland GmbH, Metzingerstraße 75, 72555 Metzingen, Internet: [www.Seedo.de](http://www.Seedo.de)

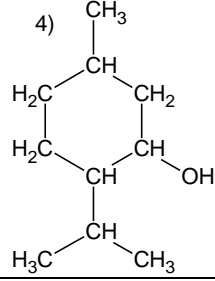
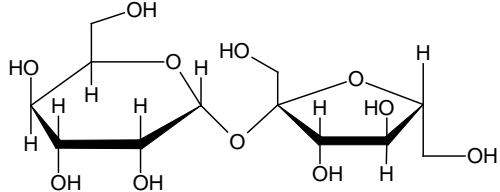
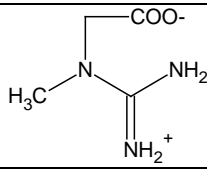
<sup>11</sup> Puma: cell technologie, Informationsmaterial zum Aufbau von Sportschuhen, Puma AG, Würzburger Straße 13, D-91074 Herzogenaurach

**Tabelle 3: Bälle**

Produkt	Material	Funktion	Strukturformel
Tischtennisbälle Schildkröt	Celluloid	Leichter, formstabiler Kunststoff	Mischung aus Campher und Nitrocellulose
Tennisbälle Tretorn® Micro X	Karkasse: Ti-tandioxid Polybutadien Füllung: 700 Millionen Mikrozellen	Formstabile Bälle auch bei hoher Belastung, gleichbleibendes Spielverhalten	
Fußbälle	32 Panels mit einem Gewicht von ca. 420 g. Das obere Drittel besteht aus einem PU-Schaum s. Versuch 4	Bälle, die direkt nach dem Schuss ihre ursprüngliche Form zurückbilden. So bleibt die Flugbahn sehr präzise.	
Golfbälle			

Nicht nur das Equipment vieler Sportarten hat sich durch die Verwendung neuartiger Materialien verändert. Die modernen Errungenschaften in der Medizin haben ebenfalls großen Einfluss auf das Training und die Regeneration der Athleten.

**Tabelle 4: Sportmedizin / Nahrungsergänzung**

Produkt	Material	Funktion	Strukturformel
Kühlspray FCKW frei <sup>12</sup>	1) Butan, 2) Pentan, 3) Propan, 4) Menthol	Zum Kühlen bei Sportverletzungen	1) $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ 2) $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ 3) $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ 4) 
Isostar <sup>®13</sup>	Saccharose	Energienlieferant <sup>14</sup>	
Zell-Tech <sup>®15</sup>	Body-Building Nahrung	Enthält Kreatin <sup>16</sup> , ein energiereiches Körperphosphat.	
Sauerstoff-Wasser <sup>®17</sup>	Sauerstoff angereichertes Mineralwasser		O <sub>2</sub>

<sup>12</sup> wero Kühlspray. wero medical, D-65232, Best. Nr. 031115, www.wero.de

<sup>13</sup> Novartis Consumer Health GmbH, 81366 München, www.isostar.de

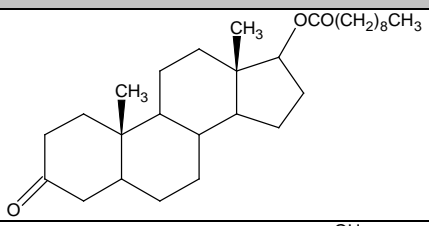
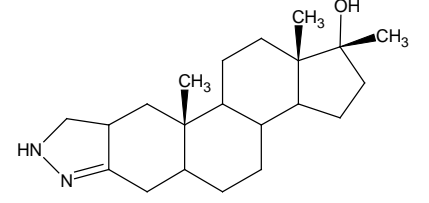
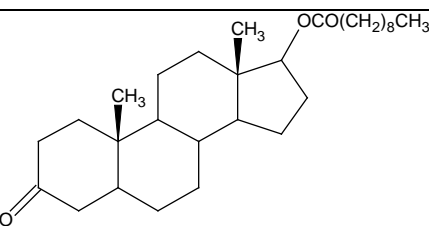
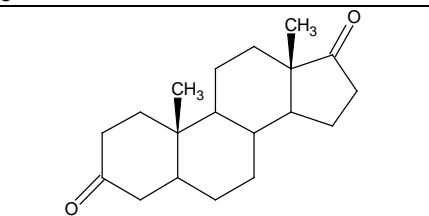
<sup>14</sup> siehe auch: Holfeld, M. Chemie und Sport: PdN ChiS, 5/51 Jg. 2002, S. 17

<sup>15</sup> elero GmbH, All Stars Fitness Producted, Linsenhofer Straße 59-63, D72660 Beuren, www.all-stars.de

<sup>16</sup> Kreatinnachweis bei: Proske, Wiskamp, Holfeld: Energiebereitstellung im Sport: Chem. Sch.(Sakzburg), 17, 2002, Nr. 3

<sup>17</sup> Active O<sub>2</sub>, Adelholzer Quellen GmbH, 83313 Bad Adelholzen Oberbayern, www.activeO2.de

**Tabelle 5: Dopingsubstanzen**

Produkt		Wirkung im Organismus	Strukturformel
Testosteron	Männliches Keimdrüsenhormon	Wachstumshormon und Sexualhormon	
Stanozolol		Das Steroid, das im Blut von Ben Johnson bei den Olympischen Spielen in Seoul festgestellt wurde. <sup>18</sup>	
Nandrolon-decanester		Häufig verwendetes anaboles Steroid, das in der Zahnpasta von Dieter Baumann gefunden wurde. <sup>19</sup>	
Androstenon		Anaboles Steroid, das eine starke Ausschüttung von Testosteron hervorruft. <sup>20</sup>	

<sup>18</sup> George, A. J.: Drugs in Sport; Mottram, D.R. Ed.; Human Kinetics, Champaign, IL, 1988, S. 77

<sup>19</sup> siehe auch: „Kulisse des Glücks“: Spiegel 37/2000, S 217

<sup>20</sup> Liska, K.: Drugs and the Human Body with Implications for Society; Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, 2000

## Experimente

### Versuch 1: Synthese von Celluloid:

**Chemikalien:** Konz. Salpetersäure, konz. Schwefelsäure, Indikatorpapier, Campher, Watte, Aceton

**Geräte:** 2 Bechergläser ( 250 ml), 20 ml Voll-Pipette mit Pipetierhilfe, Waage, Glasstab, Petrieschale, Porzellanschale, Filterpapier

Durchführung: Zunächst wird Nitriersäure hergestellt, indem zu 20 ml konz. Salpetersäure unter vorsichtigem Umrühren 40 ml konz. Schwefelsäure zugegeben wird.

Nach Abkühlen der Nitriersäure wird 1 g Watte in die Säure getaucht und mit dem Glasstab so bewegt, dass sie vollständig durchdrängt wird. Nach 20 min. wird die Nitriersäure abgossen, wobei die Watte mit dem Glasstab zurückgehalten wird. Die Watte wird nun in einem mit Wasser gefüllten Becherglas gewaschen. Dabei wird das Waschwasser so oft erneuert, bis das Indikatorpapier keine Säure mehr anzeigt. Anschließend wird die Watte dann in einem Trichter ca. 2 min. mit fließendem Wasser gespült und auf einer Petrieschale ca. 2,5 Stunden im Trockenschrank bei 40°C getrocknet.

Die getrocknete, nitrierte Watte wird mit einem Gramm Campher versetzt und das Gemenge dann in 10 ml Aceton gelöst. Das Aceton lässt man an der Luft verdampfen.

**Anmerkung:** Es empfiehlt sich, die Watte vor dem Lösen mit Aceton noch einmal zu wiegen und einen kleinen Teil auf einem Filterpapier in einer Porzellanschale zu anzuzünden.

Man kann so die Gewichtszunahme durch die Nitrierung veranschaulichen und die heftige Reaktion beim Verbrennen der nitrierten Watte (Schießbaumwolle) im Vergleich zur nicht behandelten Watte demonstrieren.

### Versuch 2: Verbrennen eines Tischtennisballs

**Geräte:** Porzellanschale, Tischtennisball, Streichhölzer

**Versuchsdurchführung:** Ein Tischtennisball wird in eine Porzellanschale gelegt und angezündet.

**Beobachtung:** Der Tischtennisball verbrennt schnell und heftig mit rußender Flamme. Es riecht nach Campher. Wenige Rußpartikel bleiben zurück.

### Versuch 3: Verkleben von Tischtennisbällen

**Chemikalien:** Aceton

**Geräte:** 2 Tischtennisbälle

Zwei Tischtennisbälle werden jeweils an einer Stelle mit Aceton benetzt und an diesen Punkten ca. 30 Sekunden zusammengedrückt.

**Beobachtung:** Die Bälle sind miteinander verklebt. Die Verklebung ist so stark, dass man die Bälle aus ca. 10 cm auf den Tisch fallen lassen kann, ohne, dass sich die Verklebung löst.

#### Versuch 4: Wasseraufnahme von Leder und Polyurethanbeschichtetem Material

**Geräte:** Alter, nicht beschichteter Lederball; moderner, kunststoffbeschichteter Fußball; Briefwaage; Korkring; Stativ; Klemme; Muffe

**Versuchsdurchführung:** Ein alter Lederfußball und ein moderner, kunststoffbeschichteter Fußball werden auf einem Korkring (damit der Ball nicht wegrollt) auf einer Briefwaage gewogen. Anschließend werden beide Bälle ca. 1 Stunde in einen zur Hälfte mit Wasser gefüllten Eimer gelegt und mit einem umgebauten Stativ unter die Wasseroberfläche gedrückt. Die Bälle sollten vollständig unter Wasser sein. Nach einer Stunde werden die Bälle wieder auf der Briefwaage gewogen.

**Beobachtung:** Der unbehandelte Lederball wog vorher 390g, nachher über 500g. Der kunststoffbeschichtete Fußball wog vorher 425g und nachher 435g.

**Auswertung:** Der alte Lederball wiegt über 100g mehr, während der neue Ball kaum Wasser aufgenommen hat. Ein unbeschichteter Ball kann auf feuchtem Gras nur schwer gespielt werden.

**Anmerkung:** Normalgewicht für Fußbälle Größe 5 ist 420g.

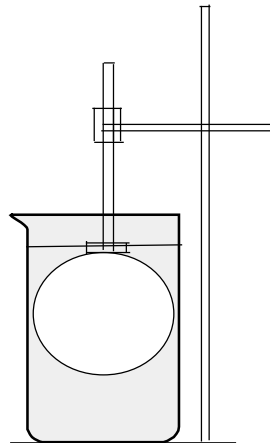


Abb. 3: Wässern des Fußballs

#### Faserverstärkte Verbundwerkstoffe im Sport

##### Versuch 5a): Herstellen einer Polyacrylnitrilfaser

**Chemikalien:** Polyacrylnitril, in 10% Dimethylacetamid (DMA), Wasser

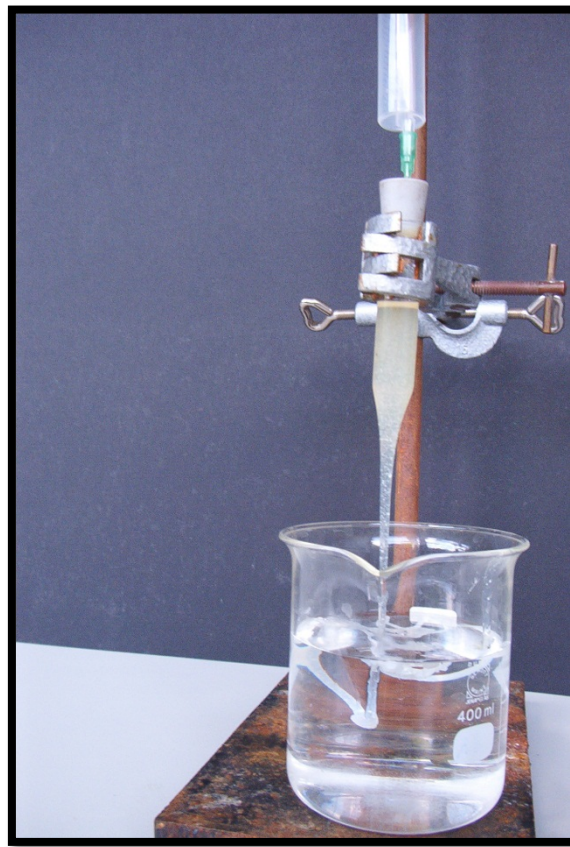
**Geräte:** Selbst hergestellte Spinndüse, s.u., Stativ, Klammer, Muffe, Reagenzglas, Einwegspritze (10ml) mit Kanüle, Gummistopfen, Pinzette Uhrgläser, Zange

**Versuchsdurchführung:** Zunächst wird eine Spinndüse aus einem Reagenzglas hergestellt: Das Reagenzglas wird waagrecht in die Bunsenbrennerflamme gehalten und in der Mitte bei möglichst hoher Temperatur erhitzt. Wenn das Glas zu schmelzen beginnt, werden die Enden auseinandergezogen. Der Reagenzglasteil mit dem Boden wird in den Glasmüll gegeben. Der Reagenzglasteil mit der Öffnung wird mit einer Zange abgeknipst, so dass eine kleine Öffnung entsteht.

Die so hergestellte Spinndüse wird nach unten an einem Stativ befestigt. Unter die Spinndüse wird ein mit Wasser gefülltes Becherglas gestellt. Die Spinndüse wird mit in DMA gelöstem Polyacrylnitril gefüllt. Die Öffnung der Spinndüse sollte so eng sein, dass noch kein Polyacrylnitril austritt. Die Einwegspritze wird mit Luft gefüllt und mit der Nadel ein Gummistopfen durchstoßen. Die Spinndüse wird mit dem Stopfen verschlossen. Die eingespannte Düse wird so weit abgesenkt, dass sie in das Wasserbad eintaucht.

Der Kolben der Spritze wird vorsichtig hineingedrückt. Durch den erhöhten Druck in der Spinndüse wird eine Faser in das Wasser geschoben. Wenn die Faserbildung nachlässt, kann man erneut vorsichtig auf die Spritze drücken und den Faden verlängern.

Die Fasern werden aus mit einer Pinzette aus dem Wasserbad genommen und unter fließendem Wasser gespült. Anschließend werden sie zum Trocknen aufgehängt.



**Abb. 4:** Spinnen einer Polyacrylnitrilfaser

#### **Versuch 5b): Herstellen einer Karbonfaser aus einer Polyacrylnitrilfaser**

Kohlenstofffasern werden in der Industrie u.a. durch Pyrolyse von Polyacrylnitrilfasern hergestellt:

**Versuchsdurchführung:** Die getrocknete Polyacrylnitrilfaser wird auf einem Uhrglas bei 240°C im Trockenschrank über Nacht erhitzt. Es entstehen schwarze, flammfeste Kohlenstofffasern.

## Reaktionsgleichung: Zur Pyrolyse von Kohlenstofffasern<sup>21</sup>

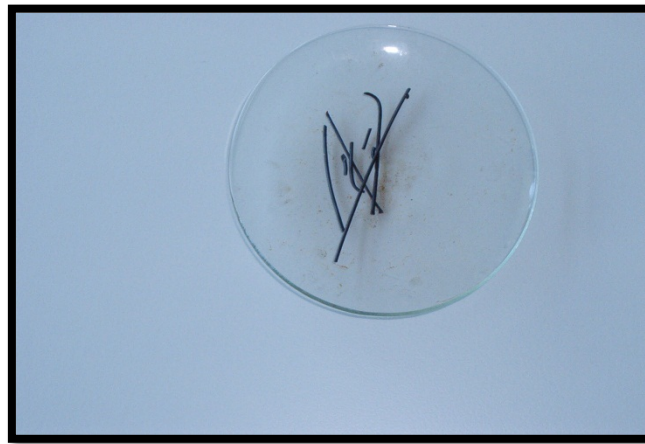
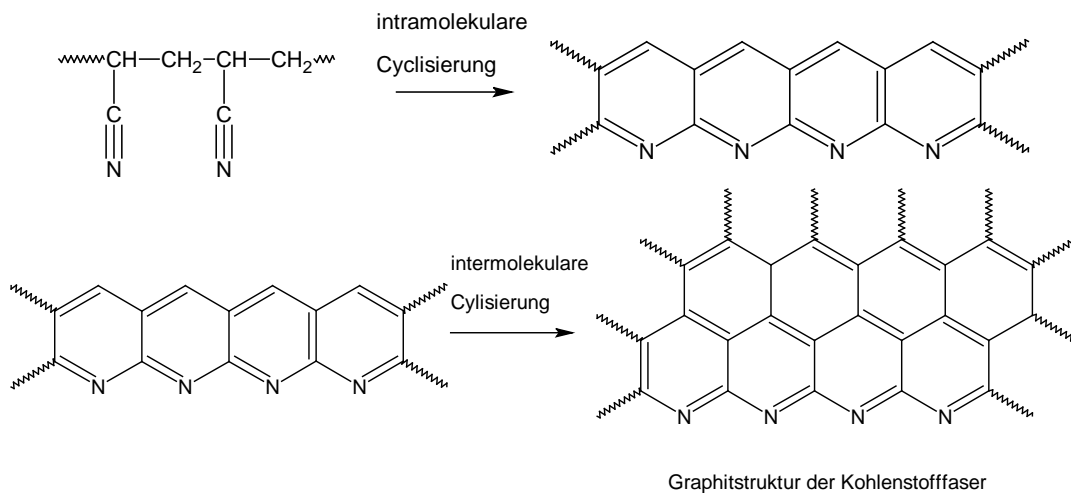


Abb. 5: Kohlenstofffaser

### Versuch 6: Herstellen eines Epoxid / Karbonfaser-Verbundwerkstoffs Variante: Aramidfaser- oder Glasfaser-Verbundwerkstoffe

**Chemikalien:** Epoxid-Laminierharz-System EP 210 / EPH 414, Kohlefasergerewebe  $93\text{g/m}^2$  (besser aber  $160\text{g/m}^2$  oder noch mehr) oder Glasfaserfilamentgerewebe  $25\text{g/m}^2$ , oder Aramidfasergerewebe  $61\text{g/m}^2$ <sup>22</sup>

**Geräte:** Pinsel, Schere, Becherglas, Glasstab

**Versuchsdurchführung:** In einem Becherglas werden 4 Volumenteile Härter mit 10 Volumenteilen Harz gemischt und mit dem Glasstab umgerührt. Ein ca. 10 mal 10 cm großes Stück wird aus dem Fasergerewebe mit der Schere ausgeschnitten. Es wird auf Papier gelegt und

<sup>21</sup> Ehrenstein, G.W.: Faserverbundwerkstoffe München 1992, S.32

<sup>22</sup> Das Härterssystem und die Fasergerewebe können bei der Firma: „bacuplast Faserverbundtechnik GmbH, Dreherstr. 4, Industriegebiet Groshülsberg, D-42899 Remscheid-Lüttringhausen bestellt werden. Die kleinste Größe für die Fasergerewebe beträgt  $1\text{m}^2$ . Das Härterssystem (Gebinde aus Härter und Harz) kostet 11,99€ Die Kohlenstoffgerewebe ist mit 33,25€ relativ teuer, auch wenn viele Versuche damit durchgeführt werden können, ebenso das Aramidfasergerewebe (Preis pro  $\text{m}^2$  28,00 €). Es empfiehlt sich deshalb das Glasfasergerewebe (Preis pro  $\text{m}^2$  5,35 €) zu verwenden.

mit dem Laminierharz bestrichen. Anschließend lässt man es trocknen, bis es nicht mehr klebt (ca.30 min.). Nach dem Trocknen sind die Fasermatten fest. (Da die Matten rel. dünn sind, kann man mehrere Mattenteile verkleben, um die zunehmende Stabilität zu verdeutlichen.)

**Empfehlung:** Es bietet sich an, hierzu ein Video aus der Serie „Molekulare Schöpfung“ Folge<sup>23</sup> zu zeigen. Hier wird ein Fahrradrahmen aus Karbonfasern gebaut.

**Aussicht:** Die Materialforschung ist bei den Sportgeräten immer besonders weit fortgeschritten. Derzeit gibt es Bestrebungen, moderne Tennisschläger nicht mehr auf der Grundlage von Karbonfasern zu fertigen, sondern auf sog. Nanoröhrchen. Sie versprechen hervorragende mechanische Eigenschaften, zur Zeit gibt es allerdings noch Probleme, sie in Kunststoffmatri-  
zen einzubetten.<sup>24</sup>

---

<sup>23</sup> Video: Molekulare Schöpfung, Sendedatum 30.12.2002-05.01.2003, 3sat, contact Udo Tschimmel, mediaprojekts@csi.com

<sup>24</sup> Lindinger, Manfred: Fußbälle und Zylinder aus der Nanowelt, „Die Zeit“: Seite N2, Mittwoch 4. Dezember 2002

## **Kunststoffe steigern die Mobilität im Sport**

Beweglichkeit, Schnelligkeit und Fitness sind entscheidend im Sport. Aber nicht nur im Sport sondern in allen Bereichen des Lebens sind sie von großer Bedeutung. „Wer zu langsam ist, den bestraft das Leben....“ - damit ist nicht nur die Schnelligkeit sondern auch die Flexibilität und die Mobilität gemeint. Wer mobil ist, ist im Vorteil.

Im Lexikon wird Mobilität oft als Fähigkeit zur Eigenbewegung von Personen auch mit Hilfsmitteln beschrieben<sup>1</sup>. Die Beschaffenheit der Hilfsmittel kann die Mobilität verändern. Leichte Materialien lassen sich einfach und schnell bewegen- schwere Materialien sind nur unter größerem Energieaufwand zu bewegen.

Die Sportart kann sich grundlegend durch die Einführung eines neuen Werkstoffs ändern. Ein leichter Ball, ein handlicherer Tennisschläger bewirken ein, viel schnelleres (mobileres) Spiel.

Ein biegsamer Hochsprungtag hat zur Folge, dass die Bestleistungen sprunghaft ansteigen.

Kunststoff lässt Metall oft alt aussehen. Im Formel-1-Wagen und im Porsche Carrera GT sorgen faserverstärkte Kunststoffe bereits für mehr Sicherheit. Am Fraunhoferinstitut arbeiteten Wissenschaftler an einer Großfertigung anspruchsvoller Kunststoffbauteile, die zukünftig auch Klein- und Mittelklassewagen leichter und sicherer machen sollen.<sup>2</sup>

Im Folgenden sollen Inhalte und Denkanstöße zu einem Fachübergreifenden Chemie- und Sportunterricht gegeben werden. Den Schülerinnen und Schülern soll bewusst werden, wie der Einzug der Kunststoffe den Sport verändert hat. Durch ein niedrigeres Gewicht oder eine höhere Stabilität im Vergleich zu konventionellen Materialien wird der Sport schneller, leichter und mobiler.

Im zweiten Teil werden Versuchsvorschriften aufgeführt, die die Behandlung der Kunststoffe im Chemieunterricht ergänzen können.<sup>3</sup>

### **Tennisschläger werden handlicher - mobiler**

In den Sport haben die Kunststoffe längst Einzug gehalten und ihn nachhaltig verändert.

Tennislegenden wie Jimmy Connors oder Björn Borg hätten heute wohl kaum noch eine Chance. Ihre Schläger waren schwer und unhandlich.

Viele Sportgeräte wie z.B. Tennisschläger, Boote, Fahrradrahmen u.ä. werden heute aus Verbundwerkstoffen gefertigt. Häufig eingesetzt werden Glasfasern, Aramidfasern oder Karbonfasern, die mit einem Epoxid-Härter als Matrix verbunden sind (*siehe Versuch 1*).

---

<sup>1</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Mobilit%C3%A4t>

<sup>2</sup> Jakob, Klaus: Kunststoff lässt Metall alt aussehen, Beilage Fraunhofer Magazin 2004

<sup>3</sup> Siehe auch: M. Holfeld, V. Wiskamp: Kunststoffe in Sportartikeln. – In: RAAbits-Chemie, Ausgabe 4/2004 (Ergänzungslieferung Dezember 2004), Raabe Verlag, Stuttgart, Kap. 8 II H, S. 1-26

*Glasfasern* sind, historisch gesehen, die erste Faserart. Die industrielle Fertigung erfolgt seit 1910. Sie besitzen eine hohe Festigkeit und ein hohes spezifisches Gewicht. Im Sport werden sie vor allem wegen ihrer hohen Stabilität eingesetzt.

Auch die Besaitung der Schläger hat sich grundlegend verändert. Während man noch vor 25 Jahren mit Naturdarmsaiten die Schläger bespannte, werden die Rackets heute mit verschiedenen Kunststoffen, wie z.B. Nylon bespannt. Früher mussten die Schläger in der Regenpause in Wimbledon neu bespannt werden, heute macht der Regen der Bespannung nichts mehr aus. (*Versuch 2,3*)



Abb. 1: Tennisschläger der letzten 15 Jahre von links alt nach rechts neu. Die Schlagfläche ist nicht nur größer geworden, auch das Material hat sich grundlegend geändert.

### **Mit dem neuen Material erreichen die Stabhochspringer neue Höchstleistungen**

1900 wurde noch mit leichten Bambusstäben gesprungen. Dieses Material wurde 4 Jahrzehnte im Hochsprung verwendet. Der Weltrekord mit einem Bambusstab liegt bei 4,77 m (1942). 1957 verbesserte Bob Gutowski den alten „Bambus-Weltrekord“ um einen Zentimeter auf 4,78m mit einem Aluminiumstab. 1960 wurden die Aluminiumstäbe durch Stahl ersetzt und Don Bragg steigerte den Rekord um einen weiteren Zentimeter auf 4,80 m. Eine Schlagartige Veränderung der Bestmarken im Stabhochsprung wurde 1956 in den USA eingeleitet. Der Glasfiberstab bewirkte durch seine Handlichkeit und Bruchsicherheit eine Verbesserung des Bestwerts beim ersten internationalen Einsatz um 3 Zentimeter auf 4,83 m. Heute liegt der Weltrekord bei 6,14 m, gesprungen von Serhij Bubka 1994! Auch wenn Serhij Bubka ein herausragender Stabhochspringer war, dessen Rekord bis heute nicht übertroffen wer-

den konnte, steht außer Frage, dass auch er mit einem anderen Material nicht in diese Höhe hätte springen können. (siehe Versuch 1, Variante: Glasfieber)<sup>4</sup>

## **Fahrräder werden leichter – Der Fahrer wird mobiler**

Heute haben Aramidfasern in vielen Bereichen den Glasfasern den Rang abgelaufen. Besonders beim Bau von Fahrradrahmen ist Aramid wegen seines geringen Gewichts sehr beliebt.<sup>5</sup>

Aramid ist ein aromatisches Polyamid. Die Fasern sind unter dem Handelsnamen Kevlar bekannt. Sie besitzen gute Schlagbeanspruchung und hohes Energieaufnahmevermögen. Im Sport werden sie bevorzugt in Sportgeräten eingesetzt, die oft stoßartigen Belastungen ausgesetzt werden, wie z.B.: Tennisschläger, Surfbretter und Skier.

Karbonfasern wurden schon 1880 durch Pyrolyse von Baumwolle hergestellt. 1961 erzeugte der Japaner Shindo durch Pyrolyse von Polyacrylnitrilfasern Kohlenstofffasern mit hervorragenden Festigkeitseigenschaften.<sup>6</sup> (Siehe auch Versuch 4)

Seitdem haben Kohlenstofffasern wegen ihrer hohen Festigkeit und ihrer relativ geringen Dichte zunehmend Bedeutung beim Bau von Sportgeräten gefunden. Verursacht durch ihre günstigen gewichtsbezogenen Eigenschaften, werden sie unter anderem in Skier, Fahrradrahmen und Tennisschlägern verwendet.

In den letzten Jahren sind viele neue Werkstoffe für Fahrradrahmen entwickelt worden. Die Rahmen wurden immer leichter. Neben dem „alten“ Stahlrahmen haben sich längst Materialien wie: Carbon-, Kevlar- und Glasfaserverstärkte Kunststoffe etabliert. Auch andere Metalle als Stahl, z.B. Aluminium und Titan sowie verschiedene Legierungen werden ebenfalls für den Bau von Fahrradrahmen verwendet.

Noch vor wenigen Jahren haben ausschließlich Profiradrennfahrer Fahrräder mit solchen Rahmen gefahren. Für den Durchschnittsradler waren diese ultraleichten Rahmen viel zu teuer.

Heutzutage sind viele Fahrradrahmen aus anderen Materialien als Stahl erschwinglich geworden. Viele Jugendliche finden den konventionellen Stahlrahmen „langweilig“ und altmodisch.

Neben der Dichte sind die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe von besonderer Bedeutung. Dazu zählen die Zugfestigkeit, Elastizität, Abriebfestigkeit und Steifigkeit der Werkstoffe. Ein Maß für die Steifigkeit ist das Elastizitätsmodul (E-Modul), welches das Verhältnis der auf einen Werkstoff einwirkenden Spannung zur Längsdehnung beschreibt. Diese Werkstoffeigenschaft steht im direkten Zusammenhang mit den Bindungskräften der Atome

---

<sup>4</sup> Siehe auch: [www.wdrmaus.de/sachgeschichten/stabhochsprung/](http://www.wdrmaus.de/sachgeschichten/stabhochsprung/) - 74k

<sup>5</sup> Michaeli, W.; Wegener, M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe, München, 1990, S.58

<sup>6</sup> Bukatsch, F.; Glöckner W.: Experimentelle Schulchemie, Band 9 Organische Chemie 3, Aulis Deubner & Co Kg, Köln, 1997, SS 65-67

untereinander. Je fester die Bindung ist, desto höher ist der Wert des E-Moduls.

Werkstoff	E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]	Dichte [g/cm <sup>2</sup> ]
Stahl	210	7,8
Aluminium	73	2,8
Glas	73	2,4
Kohlenstofffaser- Verbundwerkstoff	200	2,0
Holz	14	0,5
Aluminiumoxid	380	4,0

Tab. 1: Eigenschaften von Werkstoffen im Vergleich<sup>7</sup>

Doch die meisten Schäden treten nicht auf, weil ein Material einer zu starken Kraft ausgesetzt wird, sondern durch Materialermüdung. Häufig altern Materialien bei ständiger gleichbleibender Belastung.

Gerade hier hat Eisen einen besonderen Vorteil. Eisenrahmen sind sehr stabil. Tests haben gezeigt, dass ein Eisentretlager erst nach 25 Mio. Umdrehungen Verschleißerscheinungen zeigt. Eine solch große Zahl an Umdrehungen schafft kein noch so ambitionierter Radfahrer!

Zudem sind Rahmen aus Eisen relativ günstig, schließlich kann sich nicht jeder Hobbyradfahrer für eine Bergetour ein neues Fahrrad bauen lassen, wie es für dies für Jan Ullrichs Bergetappen bei der Tour gemacht wird.

Je mehr neue Materialien im Spitzensport Einzug finden, je häufiger werden sie auch im Breitensport unkritisch und wenig reflektiert übernommen. Aber gerade ein Breitensportler sollte nachrechnen, ob die teuer erkaufte Gewichtsparsnis von wenigen Kilogramm überhaupt sinnvoll ist, wenn er z.B. selbst ein paar Kilo zu viel auf die Waage bringt.

Im Fahrradbau ist man teilweise wieder von den High-Tech- Kunststoffen abgekommen und weis die guten Materialeigenschaften von Stahl und Stahlliegierungen wieder zu schätzen.



Abb. 2: Moderne Fahrradrahmen werden aus Carbonfasern oder Aluminium gebaut

<sup>7</sup> Easterling Zschech, 1997, S.37

## Bälle – mobile Sportgeräte

Das Fußballspiel ist durch die Errungenschaften der Chemie verändert worden. Während *Fritz Walter*, *Uwe Seeler* und *Franz Beckenbauer* bei Regenschlachten immer damit rechnen mussten, dass das „Leder“ mit zunehmender Spieldauer schwerer wurde, weil es Wasser aufsaugte, hat *Michael Ballack* dieses Problem nicht, denn sein Spielgerät besteht zu einem großen Teil aus Polyurethan. Dieses weist Wasser ab. Außerdem bewirkt es, dass der Ball nach einem Schuss sehr rasch wieder seine ursprüngliche Form annimmt, so dass die Flugbahn präzise ist. Wie wäre es im Unterricht mit folgendem Experiment? Ein alter Leder- und ein moderner PU-Ball werden eine Stunde unter Wasser getaucht. Dann werden die Massenveränderungen bestimmt und mit beiden Bällen Elfmeter geschossen. Ergänzend darf natürlich die Herstellung eines Polyurethan-Schaumes nicht fehlen (*siehe Versuch 5*), um den Schülern exemplarisch die PU-Stoffklasse vorzustellen.



Abb. 3: Hightech-Fußball: EUROPASS, der Ball der EM 2008

### **Schwimmanzüge machen schneller - mobiler**

Die neuen Schwimmanzüge gleiten besonders gut durch das Wasser. Eine der Haifischhaut nachempfundene Oberflächenstruktur ermöglicht es, dass der Wasserwiderstand herabgesetzt wird. Während sich früher häufig ein Schwimmer seine Körperhaare abrasiert, um – aalglatt – als erster das Ziel zu erreichen, werden jetzt neue Anzüge verwendet um den Widerstand des Wassers niedrig zu halten. Das Material besitzt V-förmigen Erhebungen, die in Höhe und Breite wissenschaftlich vermessen wurden und proportional genau den Hautzähnen der Haifischhaut entsprechen<sup>8</sup>. Amerikanische Schwimmer waren

---

<sup>8</sup> Speedo fast skin: Speedo Deutschland GmbH, Metzingerstraße 75, 72555 Metzingen, [www.speedo.de](http://www.speedo.de)

die ersten, die bei den Olympischen Spielen 2000 mit solchen Anzügen, die eine besonders gut anliegende Faser aus Elastan<sup>®</sup> (Polyurethan) starteten. In der Zwischenzeit haben viele Schwimmer einen solchen Anzug. Allerdings sind die Anzüge nicht ganz billig, so dass sich auf Kreis- und Bezirksebene oft nicht jeder Schwimmer einen solchen Anzug leisten kann.

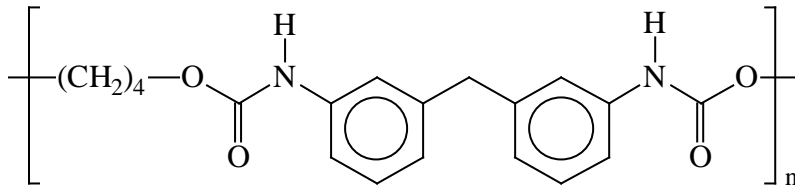


Abb. 4: Formelausschnitt eines Polyurethans

Der deutsche Schwimmverband erwägt deshalb, die Schwimmanzüge für deutsche Schwimmer bei allen Wettkämpfen zu sperren, durch die gleichen Bedingungen auf nationaler Ebene würde so wieder Gerechtigkeit herrschen, aber gleichzeitig wären die deutschen Sportler auf internationaler Ebene benachteiligt.

### Funktionskleidung

Mobil ist man, wenn man unabhängig ist. Ein Läufer, der unabhängig vom Wetter sein Lauftraining gestalten kann, ist seinem Konkurrenten der nur bei schönem Wetter trainiert gegenüber im Vorteil.

Jogging bei Wind und Regen ist nicht nur für den Menschen, sondern auch für seine Kleidung eine Herausforderung. Einerseits muss die Sportkleidung den verdampfenden Schweiß nach außen leiten, damit kein Wärmestau entsteht, und den flüssigen Schweiß aufsaugen, damit der Körper des Sportlers trocken bleibt und er sich wohl fühlt. Andererseits muss sie den Aktiven vor Wind schützen, um eine Unterkühlung zu vermeiden, und Regentropfen abstoßen, damit die Kleidung nicht schwer wird und kein Nässegefühl entsteht.

Früher wurde Baumwolle als Material für Sportkleidung empfohlen. Die Cellulose hält zwar warm und lässt Luft durch, nimmt aber sehr leicht Wasser – Schweiß und Regen – auf. Die von Bob Gore entwickelte und nach ihm benannte Gore-Tex<sup>®</sup>-Membran hat die Sportkleidung revolutioniert. Die hauchdünne Membran aus Polytetrafluorethen (ein Material, das u.a. auch unter dem Handelsnamen Teflon<sup>®</sup> zur Beschichtung von Bratpfannen dient) besitzt 1,4 Milliarden Mikroporen pro Quadratzentimeter. Die Porengröße ist so, dass gasförmiges Wasser – verdunstender Schweiß – hindurch kann, Regentropfen hingegen abperlen. Nachteilig ist lediglich, dass der flüssige Schweiß nicht aufgesaugt wird. Dieses Defizit hat beispielsweise das neue HIGH<sub>2</sub>OUT-Laminat der Firma Sympatex<sup>®</sup> nicht. Dieses Verbundmaterial passt seine Wasserdurchlässigkeit der Schweiß-Menge an. Auf der Körperseite befindet sich eine Wasser saugende Lage. Die darauf laminierte Membran hat hydrophobe und hydrophile Elemente, vergleichbar einer Mauer aus Steinen, die mit Mörtel verklebt sind. Die kleinen hydrophilen Kanäle (vergleichbar dem Mörtel) kann lediglich das gasförmige Wasser, also der verdunstende Schweiß, durchqueren. Regentropfen von draußen können hingegen nicht nach innen. Sie perlen ab. Bei erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit, die nur auf der

körpernahen Innerseite resultieren, quellen die hydrophilen Bereiche auf, so dass auch der flüssige Schweiß absorbiert werden kann und der Schweißtransport somit insgesamt verbessert wird.

Für die Schüler ist es reizvoll, das Verhalten der Goretex<sup>®</sup>- und Sympatex<sup>®</sup>-Materialien gegenüber flüssigem und gasförmigen Wasser zu untersuchen und mit dem beispielweise einer Frischhaltefolie aus Polyamid zu vergleichen (*Versuch 6*).

### **Ski – Mobilität im Schnee**

Wer in den Bergen wohnt, weiß, dass Ski nicht nur ein Sportgerät, sondern auch ein Fortbewegungsmittel sein können. Bei tiefem Schnee sind Ski oft das einzige Fortbewegungsmittel – sie machen mobil.

Die ersten Skier waren aus Vollholz (Föhre, Hickory, Ahorn, Buche). Ihre Unterseiten wurden mit Speck- oder Hering-Schwarten bestrichen, um sie gleitfähiger zu machen [9]. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurden die Vollholzschi durch verleimte Ski ersetzt, die sich durch eine bis dahin nicht gekannte Elastizität auszeichneten. 1950 entwickelte der Luftfahrtpionier Ludwig Bölkow die ersten Kunststoffschi. Diese hatten eine hohe Bruchfestigkeit und eine gute Schwingungsdämpfung [10]. 1972 wurden die ersten Ski basierend auf einem Epoxid-Harz und Carbonfasern von der Firma Völkl hergestellt. Während beim Holzski oft Unfälle mit Skibruch vorkamen, sind die modernen Skier bruchfest und lassen sich fast zu Ellipsen biegen, ehe sie brechen [11]. Ein Skibelag sollte eine gute Wachsaufnahmefähigkeit, Alterungsbeständigkeit, Abriebfestigkeit, Kälteelastizität und Gleitfähigkeit auf dem Schnee besitzen. Im heutigen Skibau wird für die Lauffläche eine Kombination von Niederdruck-Polyethen für eine gute Wachsaufnahme und Hochdruck-Polyethen für eine gute Festigkeit verwendet. Im Unterricht kann auf die Herstellung der unterschiedlichen PE-Typen eingegangen werden, bevor mit einem im Sportgeschäft erhältlichen PE-Stift ein beschädigter Ski repariert und anschließend gewachst wird, wobei die Schüler mit den thermischen Eigenschaften von Polyethen und Wachs vertraut werden (*Versuch 7*).



Abb. 5 :Skifahrer mit modernen Kunststoffschi

## Versuch 1

### Herstellung von Faserverbundmaterialien

*Geräte:*

Papp- oder Plastikbecher, Holzspatel

*Chemikalien:*

Fasergewebeproben (Karbonfasern, Glasfasern oder Aramidfasermatten), Epoxid-Laminiersystem (Epoxid EP 210 und Härter EPH 414; Bezugsquelle: Firma Bacuplast Faserverbundtechnik GmbH, Dreherstr. 4, Industriegebiet Groshülsberg, D-42899 Remscheid-Lüttringhausen), alternativ Bayer Versuchspaket 12 Lekutherm E 320<sup>®</sup> und Kalthärter T 3<sup>®</sup> (Bezugsquelle: Bayer AG, E-Mail: [Anne.Papsdorf@bayer-ag.de](mailto:Anne.Papsdorf@bayer-ag.de), Internet: [www.bayer.schule.de](http://www.bayer.schule.de))

*Sicherheitshinweis:*

Einen Hautkontakt mit dem Harz und Härter ist unbedingt zu vermeiden. Deshalb Schutzhandschuhe tragen!

*Hinweis:*

**Die Mischung aus Epoxid und Härter muss unmittelbar nach ihrer Herstellung verwendet werden.**

*Durchführung:*

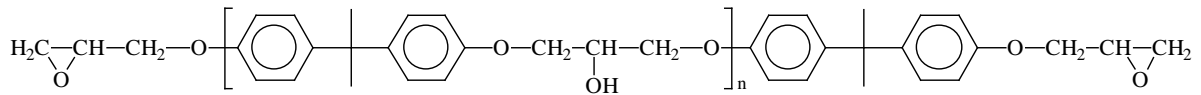
In einem Papp- oder Plastikbecher werden 10 ml Härter EPH 414 und 25 ml Harz EP 210 mit einem Holzspatel gründlich gemischt. Ein Fasergewebestücke (10 cm<sup>2</sup>) wird auf Papier gelegt und mit der Harzmischung bestrichen. Mehrere Fasergewebestücke können miteinander verklebt werden.

*Versuchsalternative unter Verwendung des Bayer-Versuchspaket 12:*

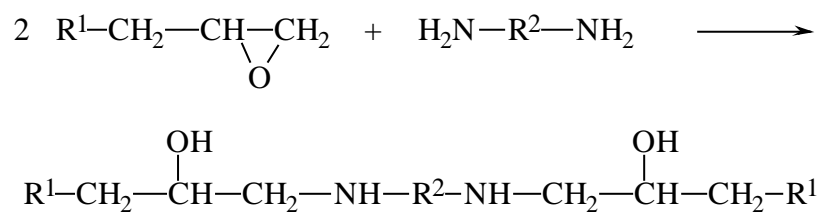
In einem Papp- oder Plastikbecher werden 40 g Lekutherm 320<sup>®</sup> und 8 g Kalthärter T<sup>®</sup> 3 mit einem Holzspatel gründlich gemischt. Ein Fasergewebestück (10 cm<sup>2</sup>) wird auf Papier gelegt und mit der Harzmischung bestrichen. Es können mehrere Fasergewebestücke miteinander verklebt werden. Die Trocknungszeit beträgt ca. einen Tag.

*Sachinformationen zum Versuch  
„Herstellung von Faserverbundmaterialien“*

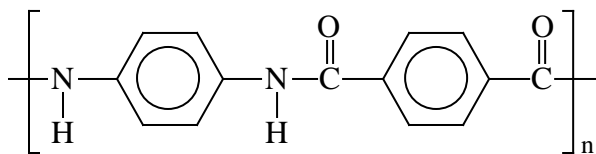
Epoxidharze entstehen, wenn lineare Oligomere (Molmasse ca. 2000 g/mol) mit mindestens zwei Epoxidgruppen, z. B.



mit Diaminen vernetzt werden:



Wenn Glas-, Kohlenstoff- oder Kunststoff-Fasern, z. B. das flüssigkristalline Polyamid Kevlar<sup>®</sup>



in das Harz eingebettet sind, spricht man von Verbundwerkstoffen.

## Versuch 2

### Herstellung von Polyamid 6.6 durch Phasengrenzflächenkondensation („Nylonfaden-Trick“)

#### *Geräte:*

Messzylinder (25 ml), Becherglas (250 ml), Fortuna-Pipette (2 ml), Tropfpipette, Pinzette, Glasplatte

#### *Chemikalien:*

1,6-Diaminohexan (C, ätzend), Natronlauge ( $c = 1 \text{ mol/l}$ ; C, ätzend), Phenolphthalein-Lösung ( $w = 0,1 \%$  in Ethanol; F, leichtentzündlich), Adipinsäuredichlorid (C, ätzend), Hexan oder Petrolether (F, leicht entzündlich)

#### *Sicherheitshinweis:*

Die entstandenen Fäden enthalten noch Natronlauge, deshalb dürfen sie nicht mit ungeschützten Händen angefasst werden. Aus diesem Grund müssen Handschuhe getragen werden, falls die Fäden als Anschauungsmaterial herumgereicht werden sollen, oder sie müssen in eine Schutzhülle eingepackt werden.

#### *Durchführung:*

1,1 g 1,6-Diaminohexan werden in 10 ml Wasser gelöst. Zu der Lösung werden 2 Tropfen Phenolphthalein-Lösung und 20 ml Natronlauge gegeben. Abschließend wird auf ein Gesamtvolumen von 50 ml mit Wasser aufgefüllt (Lösung I).

2 ml Adipinsäuredichlorid werden in 50 ml Hexan oder Petrolether gelöst (Lösung II).

10 ml der Lösung I werden in das Becherglas gegeben und vorsichtig mit der gleichen Menge Lösung II überschichtet. (Dies kann mit einer Tropfpipette erfolgen, die gegen die Wand des Becherglases entleert wird.) (Die beiden Lösungen reichen für 4-5 Versuche.) An der Grenzfläche der beiden Lösungen entsteht eine Haut. Mit einer Pinzette werden Fäden herausgezogen und auf einer Glasplatte aufgewickelt.

Die Fäden werden unter fließendem Wasser gewaschen und an der Luft getrocknet. (Dabei kann es durch restliche Natronlauge zur Hydrolyse und Bräunung des Produktes kommen.)

#### *Entsorgung:*

Restliche Lösungen werden zu den organischen Lösungsmittelabfällen gegeben. Die Polyamidfäden werden getrocknet und im Hausmüll entsorgt.

## Versuch 3

### Herstellung von Polyamid 6.6 aus AH-Salz

*Geräte:*

Reagenzglas, Reagenzglashalter, Brenner, Feuerzeug, Alufolie, Filterpapier

*Chemikalien:*

AH-Salz, Adipinsäure, 1,6-Diaminohexan (C, ätzend), Methanol (F, leicht entzündlich; T, giftig, wasserfreies Kupfersulfat)

*Hinweis:*

Falls das AH-Salz nicht gekauft wird, kann es selbst hergestellt werden. Dazu werden 8,6 g Adipinsäure in möglichst wenig Methanol gelöst. 6,8 g Hexamethylendiamin werden zugerührt wobei sich die Mischung erwärmt, beim Abkühlen fällt das AH-Salz aus. Es wird abfiltriert und an der Luft getrocknet.

*Durchführung*

Ein Reagenzglas wird etwa 2 cm hoch mit AH-Salz gefüllt. Es wird mit dem Brenner solange erhitzt, bis kein Wasser mehr ausgetrieben und der Inhalt honiggelb wird. Dann wird dieser auf eine Alufolie gegossen.

*Beobachtung:*

Auf der Alufolie kühlt der Kunststoff aus und bildet einen weißen Überzug.

*Anmerkung:*

Im Gegensatz zu Kerzenwachs, das beim Erhitzen auch flüssig wird und bei Abkühlen wieder fest, kondensiert Wasser. Das Kondenswasser bei der Polyamidbildung kann mit wasserfreiem Kupfersulfat nachgewiesen werden (Blaufärbung).

*Entsorgung:*

Der Kunststoff und die Alufolie können im Hausmüll entsorgt werden.

## Versuch 4

### Herstellung von Kohlenstofffasern aus Polyacrylnitrilfasern

*Geräte:*

Stativ mit Klammer und Muffe, Plastikinjektionsspritze (20 ml) mit großer Kanüle (2,1 x 30 mm), Becherglas (400 ml, hohe Form), Pinzette

*Chemikalien:*

10%ige Lösung von Polyacrylnitril in Dimethylacetamid (T, giftig)

*Sicherheitshinweis:*

Ein Hautkontakt mit der Polyacrylnitril-Lösung ist unbedingt zu vermeiden. Deshalb Schutzhandschuhe tragen!

*Durchführung:*

Eine Spritze wird senkrecht in ein Stativ eingespannt, dass die Kanüle nach unten auf ein mit 300 ml Wasser gefülltes Becherglas zeigt. Der Spritzenkolben wird herausgezogen und die Spritze wird mit der Polyacrylnitril-Lösung gefüllt.

Der Kolben wird wieder auf die Spritze gesetzt und vorsichtig gedrückt, dass die Lösung langsam in das Wasser läuft. Die entstandenen Fasern werden mit der Pinzette aufgenommen und an der Luft getrocknet. Anschließend werden sie über Nacht bei 250° C in den Trockenschrank gegeben.

Die resultierenden Fasern sind schwarz und flammfest.

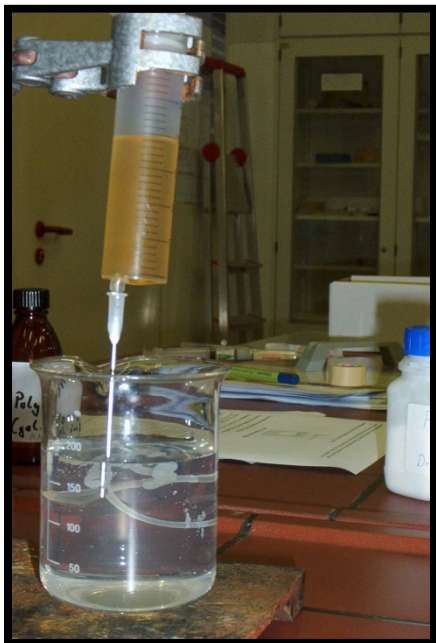
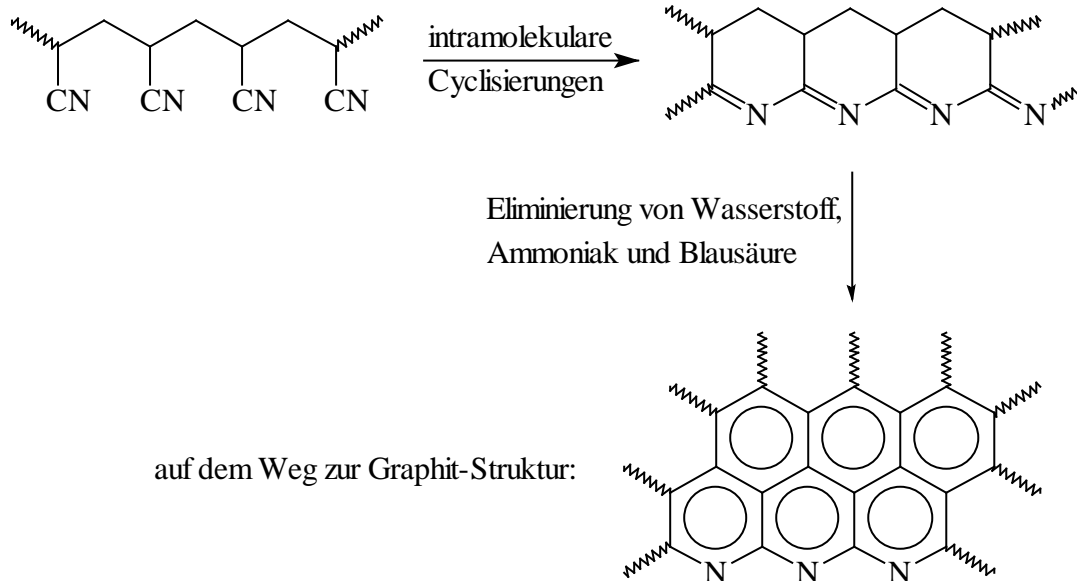
*Entsorgung:*

Die Lösung von Polyacrylnitril in Dimethylacetamid wird in den organischen Lösungsmittelabfällen entsorgt.

## Sachinformationen zum Versuch

### „Herstellung von Kohlenstofffasern aus Polyacrylnitrilfasern“

Anisotrope Kohlenstofffasern, die aus ineinander greifenden und in Faserrichtung orientierten Graphitschichten bestehen, können aus Polyacrylnitrilfasern synthetisiert werden. Diese werden zunächst oberhalb 200 °C an der Luft (Trockenschrank) vorbehandelt. Dabei wird die Oberfläche der PAN-Faser unter Bildung von Hydroxyl-, Carbonyl- und Carbonsäuregruppen oxidiert und die Faser dadurch in ihrer Form stabilisiert. Außerdem setzen Cyclisierungen (Additionen benachbarter Nitrilgruppen), Dehydrierungen und Eliminierungen von Ammoniak, Blausäure und Wasser ein.



FotoX: Fällung von Polyacrylnitril

## Versuch 5

### Chemie des Fußballs

#### *Chemikalien:*

Desmophen<sup>®</sup> (X, gesundheitsschädlich), Desmodur<sup>®</sup> (X, gesundheitsschädlich)

#### *Geräte:*

alter, nicht beschichteter Lederball, moderner, kunststoffbeschichteter Fußball, Waage, Korkring, Stativ, Klemme, Muffe, 2 Eimer, Handtuch; Plastikbecher (200 ml, weiß oder durchsichtig), Holzspatel

#### *Sicherheitshinweis:*

Einen Hautkontakt mit Desmodur<sup>®</sup> und Desmophen<sup>®</sup> ist unbedingt zu vermeiden. Deshalb müssen Schutzhandschuhe getragen werden.

Um den Arbeitstisch nicht zu verunreinigen, wird er mit Papier abgedeckt.

#### *Durchführung:*

#### Wasseraufnahme verschiedener Fußbälle

Ein alter, nicht beschichteter Lederball sowie ein moderner, mit Polyurethan beschichteter Fußball werden auf einem Korkring gewogen. Anschließend werden beide Bälle ca. 1 Stunde in je einen zur Hälfte mit Wasser gefüllten Eimer gelegt und mit einem umgebauten Stativ unter die Wasseroberfläche gedrückt. Dann werden die Bälle oberflächlich abgetrocknet und gewogen.

Der unbehandelte Lederball nimmt deutlich an Masse zu, der kunststoffbeschichtete Fußball kaum.

#### Herstellung von Polyurethan-Schaum

In einen Plastikbecher wird 0,5 cm hoch Desmodur<sup>®</sup> gefüllt. Dann wird etwa die gleiche Menge Desmophen<sup>®</sup> zugegeben. Die beiden Stoffe werden mit einem Holzspatel gründlich verrührt, eventuell einige Tropfen Wasser zugegeben. Dann wird der Spatel aus der Mischung genommen und gewartet.

#### *Beobachtung:*

Nach ca. 2 Minuten beginnt sich Gas in der Mischung zu entwickeln. Es bildet sich ein Schaumpilz.

#### *Entsorgung:*

Nach dem Aushärten des Schaums können die Jugendlichen den Stoff mit nach Hause nehmen.

#### Ergänzender Versuch: Bau eines C<sub>60</sub>-Modells

Mit einem Molekülbaukasten wird ein Modell der Kohlenstoffmodifikation C<sub>60</sub> gebaut.

## Versuch 6

### Membrane für atmungsaktive Sportkleidung

#### *Geräte:*

Becherglas, Tropfpipette, Gore-Tex<sup>®</sup>-Membran (Bezugsquelle: W. L. Gore & Associates GmbH, Postfach 1162, D-83618 Feldkirchen-Westerham, [www.gore-tex.com](http://www.gore-tex.com).) Test-Kit zur HIGH<sub>2</sub>OUT-Membran (Bezugsquelle: (inkl. Informations-material) Sympatex<sup>®</sup> Technologies GmbH, Postfach 100149, D-42097 Wuppertal), Polyamid-Frischhaltefolie

#### *Durchführung:*

Zunächst wird etwas Wasser auf beide Seiten der Gore-Tex<sup>®</sup>-Membran bzw. des Sympatex<sup>®</sup>-Laminates getropft.

Dann wird die Gore-Tex<sup>®</sup>-Membran – und im Vergleichsversuch eine Polyamid-Frischhaltefolie – über ein Glas mit heißem Wasser gespannt und ein Spiegel in geringem Abstand darüber gehalten.

Mit dem Sympatex<sup>®</sup>-Test-Kit wird auf ähnliche Weise die Wasserdampfdurchlässigkeit der HIGH<sub>2</sub>OUT-Membran geprüft (s. Gebrauchsanweisung auf dem Test-Kit).

#### *Beobachtung:*

Die Gore-Tex<sup>®</sup>-Membran bzw. das Sympatex<sup>®</sup>-Laminat lassen von der Außenseite kein Wasser durch. Das Wasser bildet einen kugelförmigen Tropfen.

Tropft man Wasser auf die Innenseite des Sympatex<sup>®</sup>-Laminates, so verteilt es sich schnell und wird von der Laminat-Innenseite aufgenommen.

Der aufsteigende heiße Wasserdampf kann die Gore-Tex<sup>®</sup>-Membran von der Innenseite her durchdringen. Der Spiegel beschlägt.

Die Polyamid-Frischhaltefolie kann vom Wasserdampf nicht durchdrungen werden. Das Wasser kondensiert und bildet an der Innenseite der Folie Kondenswasser-Tropfen.

Der Sympatex<sup>®</sup>-Test-Kit zeigt, dass die HIGH<sub>2</sub>OUT-Membran wie die Gore-Tex<sup>®</sup>-Membran eine Durchlässigkeit für Wasserdampf besitzt.

## Versuch 7

### Reparieren und Wachsen von Skiern

#### *Information:*

Kleine Löcher in Skiern, die nicht direkt neben der Kante sind, können mit geschmolzenem Polyethen gefüllt werden. Nach dem Erstarren des Kunststoffes und neuem Wachsen sind die Ski wieder einsatzbereit.

#### *Geräte und Chemikalien:*

Alte Skistücke (ca. 30 cm lang, siehe Anmerkung), Messer, Pfeile, Schmirgelpapier, Feuerzeug, Ski-Reparaturstangen aus Polyethen, Spiritus (F, leicht entzündlich) oder Aceton (F, leicht entzündlich), altes Bügeleisen, alpines Skihartwachs, Lappen

#### *Durchführung:*

Mit einem Messer werden ausgefranzte Stellen im Reparaturbereich möglichst geradlinig ausgeschnitten. Eine Ski-Reparaturstange aus Polyethen wird angezündet und so über die zu reparierende Stelle gehalten, dass das schmelzende Polyethen in die zu reparierende Stelle tropft. Nach dem Trocknen und Abkühlen wird der Belag mit einer Pfeile und Schmirgelpapier geglättet.

Altes Wachs auf dem Skistück wird mit einem in Spiritus oder Aceton getränkten Lappen entfernt. Dann wird ein Stück alpines Skihartwachs an ein altes Bügeleisen (niedrige Wärmestufe) gehalten. Das Wachs wird flüssig. Die Wachstropfen werden in ca. 3-5 cm Abstand auf die Lauffläche des Skis getropft, so dass sie möglichst gleichmäßig auf der Lauffläche verteilt sind. Anschließend werden sie mit dem Bügeleisen in den Belag gebügelt.

Nach dem Erkalten wird das überschüssige Wachs mit einer Metall- oder Kunststoffplatte abgezogen.

#### *Beobachtung:*

Die beschädigte Lauffläche ist repariert. Falls der Belag farbig ist, ist die beschädigte Stelle jetzt mit einem weißen Ersatzstoff gefüllt. Nach dem Reinigen mit einer fettlöslichen Flüssigkeit sieht der Belag milchig weiß aus. Die Oberfläche fühlt sich teilweise rau an. Ist der Ski neu gewachst, verschwindet der milchig, weiße Ton und der Belag hat seine ursprüngliche Farbe. Die Oberfläche ist nach dem Abziehen glatt und glänzt.

#### *Anmerkung:*

Auf dem Sperrmüll findet man häufig alte Ski, die man zersägen kann. Ski-Reparaturstangen aus Polyethen sind im Sportgeschäft erhältlich.

## **Kunststoffe im Sport – Gibt es schon wieder etwas Neues nach der Carbonfaser?**

*Martin Holfeld und Ingo Eilks*

Kunststoffe haben den Sport revolutioniert. Ob Tennisschläger, Fahrradrahmen, Turnschuhe oder Alpin Ski, alle bestehen heute vermeintlich aus Kunststoffen. Doch Auswahl und Verwendung der Kunststoffe ändern sich kontinuierlich. Hierüber gibt dieser Beitrag einige ausgewählte Einblicke.

Stichworte: Kunststoffe, nachwachsende Rohstoffe, Materialien im Sport

### **Einleitung**

Sport spielt im Alltag vieler Schülerinnen und Schüler eine wichtige Rolle. Deshalb liegt es nahe, seine Motivation auch für den Chemieunterricht zu nutzen [1,2]. Viele Sportgeräte bestehen heute aus innovativen Materialien der Chemie, insbesondere den Kunststoffen. Wurden neue Kunststoffe vor wenigen Jahren noch für vielerlei andere Anwendungen entwickelt, etwa die Raumfahrt, wird heute im Bereich der Herstellung von Kunststoffen speziell mit dem Blick auf Sportgeräte und Sportbekleidung geforscht.

Moderne Sportkleidung besteht heute immer mehr aus Kunstfasern (etwa Polyester), weil Kleidung aus Kunstfasern leichter als Baumwolle ist und keinen Schweiß aufsaugt. Naturstoffe und -fasern fand man eine Zeitlang im Sport immer weniger. Weder Turnschuhe, Fußbälle noch Schutzhelme bestehen heute in der Regel noch aus Leder. Trikots oder Hosen werden nicht mehr aus Baumwolle gemacht. Sie bestehen etwa aus *Nylon*, das als Faser in vielen Funktionskleidungsstücken, aber auch bei Tennisschlägern, eingesetzt wird. Moderne Fahrrad- oder Sturzhelme werden oft aus *Polystyrol* hergestellt, wie auch Schwimmhilfen. Betrachtet werden kann auch etwa das *Polyurethan*. Polyurethan ist ein wahres Chamäleon im Sport. Es kann je nach Vernetzungsgrad als klarer harter Kunststoff auftauchen oder als weicher PU-Schaum. Man findet ihn in vielen Sportgeräten (etwa Surfbrettern), bei Sportschuhen oder modernen Fußbällen [3-6].

Alle diese Kunststoffe finden sich auch im Chemieunterricht. Teilweise kann eine Auswahl bereits in der Sekundarstufe I behandelt werden [7]. Aber spätestens in der Sekundarstufe II stehen diese Kunststoffe und ihre Polyreaktionen in vielen Bildungsplänen und Schulbüchern. Hierbei sollten dann auch neuere Entwicklungen thematisiert werden, in die dieser Artikel einen kleinen Einblick und Vorschläge zur Umsetzung im Unterricht geben will.

### **Zurück zu Naturfasern im Sport?**

Um die Vielfalt der Kunststoffe in Sportgeräten und Bekleidung zu zeigen, bietet es sich an, Schülerinnen und Schüler einmal einen alten Sportschuh mit in den Unterricht bringen zu lassen und diesen dann zu zerschneiden [4,7]. Die Schülerinnen und Schüler erkennen so die unterschiedlichen Komponenten des Sportschuhs und untersuchen die Eigenschaften der verwendeten Materialien. Schnell wird klar, dass hier ganz unterschiedliche Materialien verwendet werden; die meisten davon sind Kunststoffe. Auch bei der Untersuchung von modernen Fußbällen können sie erkennen, dass diese nichts mehr mit den „Lederkugeln“ von früher zu tun haben. Auch sie bestehen heute fast nur noch aus Kunststoffen.

Bei der Untersuchung von Sportschuh oder Fußball wird auch schnell deutlich, dass bei der Fertigung von Sportgeräten (und hierzu gehört vielleicht zu allererst auch der Sportschuh) selten reine Kunststoffteile verwendet werden. So werden Glas-, Aramid- oder Carbonfasern in eine Kunststoffmatrix eingebettet. Im Faserverbundkunststoff (FVK) wird die Faser von der Matrix (dem eigentlichen Kunststoff) umgeben, so kann die hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit der Faser genutzt werden, was ohne die Matrix nicht möglich wäre. Je nach Richtung der Faser besitzt der fertige Kunststoff ein unterschiedliches Elastizitätsverhalten. In der Industrie werden Carbonfasern durch Pyrolyse von Polyacrylnitrilfasern unter Entstehung von Ammoniak und Blausäure hergestellt. Allerdings gibt es auch Möglichkeiten, die Herstellung solcher *Carbonfasern* aus Polyacrylnitril im Schulversuch zu verdeutlichen (Versuch 1).

Zwar haben Carbonfaser-verstärkte Kunststoffe (Versuch 2) wegen ihrer hohen Festigkeit und gleichzeitig geringem Gewicht, einen erfolgreichen Einzug beim Bau vieler Sportgeräte, wie Fahrradrahmen gehalten, aber die aufwändige Herstellung hat dazu geführt, dass heute statt ihrer wieder mehr Naturfasern verwendet werden. Diese *Naturfaser-verstärkten Kunststoffe (NFK)* sind eine gelungene Kombination der klassischen Kunststoffe als Matrixmaterial und nachwachsenden Rohstoffen als Fasermaterial. Die eingesetzten Naturfasern stammen meist von Bastfaserpflanzen wie Flachs, Hanf oder Jute. In einigen Ländern werden Palmenfasern oder Reisschalen verwendet [8]. Im Automobilsport wurde erst kürzlich sogar ein Auto vorgestellt, das völlig ohne Carbonfasern auskommt. Eine Rückkehr zu Naturfasern auch bei Trikots oder Trainingshosen zeichnet sich allerdings noch nicht ab.

### **Ausgewählte Entwicklungen bei Sportgeräten im Detail betrachtet**

#### *Tennisschläger*

Am Anfang des vorigen Jahrhunderts wurden Tennisschläger aus verschiedenen Holzsorten hergestellt. Nahezu eine Revolution war es, dass diese ab 1920 nicht mehr verschraubt, sondern nur noch verleimt wurden. Die nächste grundlegende Umwälzung ließ lange auf sich warten. Mit dem zunehmenden Einsatz von Leichtmetallen in vielen Bereichen drangen diese auch in den Sport vor. In den 1970er Jahren wurden die ersten Metallschläger entwickelt, insbesondere aus Aluminium. Mit einem solchen Metallschläger gewann Jimmy Connors acht Grand Slam Turniere.

Heute, und eigentlich schon ab den 1990er Jahren, gibt es kaum noch Holz- oder Metallschläger. Abgelöst wurden sie durch Carbonfaser-verstärkte Kunststoffe (CFK). Diese sind noch einmal leichter und verwindungssteifer als Aluminium [9]. Auch das Saitenmaterial hat sich grundlegend geändert. Während man früher meist natürliches Material verwendete wie Darmsaiten, kommen heute Nylon und Polyesterfasern zum Einsatz.

Heutzutage versucht man aus den CFK-Schlägern „intelligente“ Schläger zu entwickeln, die ihre Steifigkeit der Schlagintensität anpassen. Dazu werden Piezoelemente verwendet, die je nach Schlaghärte eine unterschiedliche Spannung erzeugen, die das Material verändert. In der Zukunft enthalten Tennisschläger vielleicht Nanoröhrchen. Das sind hohle, zylinderförmige Gebilde mit einem Durchmesser von wenigen Nanometern und einer Länge von mehreren Mikrometern. Sie versprechen noch bessere mechanische Eigenschaften als die augenblicklich verwendeten Fasern. Schwierigkeiten bestehen zurzeit noch, sie in Kunststoffmaterialien einzubetten [10]. Eine Einbindung, auch von Naturfasern, ist ebenfalls möglich, wird aber derzeit noch nicht umgesetzt.

#### *Fahrradrahmen*

Auch Fahrradrahmen haben sich im Lauf der Zeit verändert. Während man vor gut 20 Jahren, auch im Leistungssport, noch mit Stahlrahmen fuhr, findet man Fahrräder aus Stahl heute selbst im Alltag immer seltener. Im Sport ging auch hier die Entwicklung zunächst in Richtung der Leichtmetalle, insbesondere Aluminium. Aluminium ist leichter und weniger korrosionsanfällig als Stahl [11]. Mittlerweile werden allerdings zunehmend Fahrradrahmen auf Carbonfaser-Basis hergestellt. Auch im Hochpreissegment für den Freizeitsport finden sich diese Räder immer mehr.

Carbonrahmen sind extrem leicht und nicht korrosionsgefährdet. Allerdings sind sie besonders schlaganfällig, da Carbon nur in Faserrichtung belastbar ist. Auch ist die Matrix bei großer Hitze nicht beständig. In letzter Zeit findet man immer einmal wieder Berichte, dass sich Carbonfelgen beim Bremsen verziehen oder sogar platzen. Die beim Bremsen entstandene Wärme bewirkt, dass das Epoxydharz [12], in das die Carbonfasern der Felge eingebettet sind, schmilzt. Die Schichten aus Carbongewebe verlieren den Zusammenhalt, und das Laufrad somit seine Form. Auch ist die Gewichtersparnis nicht sehr groß und der Preis enorm, selbst wenn nur der Flaschenhalter oder die Felge aus Carbon gefertigt sind. Hinzu kommt, dass gebrochene Felgen oder Fahrradrahmen nicht repariert werden können. Den Bau eines solchen Fahrradrahmens aus Carbonfasern kann man sich im Unterricht auf einem Video anschauen [8]. Häufig sind die Fasern in ein Epoxid-Harz eingebettet. Dies kann man auch im Schulversuch zeigen (Versuch 2). Die Materialien zeichnen sich im Vergleich zu klassischen Werkstoffen durch eine geringere Dichte und größere mechanische Belastbarkeit aus; sie sind allerdings auch anfälliger bei bestimmten Belastungen. Diskutiert werden kann daher, ob die Gewichtseinsparung den häufig viel höheren Preis und das Risiko eines „Totalverlusts“ bei Beschädigung rechtfertigt.

#### *Autos aus Bio-Kunststoff*

Auch Motorsport ist Sport. Gerade im Motorsport wird sehr viel Entwicklungsarbeit betrieben, um Autos leichter und stabiler zu machen oder die Straßenhaftung zu verbessern. Dies schlägt sich natürlich auch auf Autos durch, die für das sportliche Fahren außerhalb des reinen Profisports konzipiert werden.



Abb. 1 Das Bio-Konzept Car gewinnt den Bio-Plastics Award 2012 [14]

Das Biokonzept Car (Abb. 1) ist ein Rennwagen, wie er auch von Rapper „Smudo“ gefahren wird. Ein solches Auto besteht aus vielen NFK-Bauteilen (Naturfaser-verstärkten Kunststoffen). In der Fachpresse und in den Fachverbänden wird das Konzept als erfolgreiche Pionierarbeit gelobt [13]. Die Heckklappe des Autos besteht zum Beispiel aus einem mit Flachfasern verstärkten Epoxidharz, auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Mit

der Zielsetzung, Gewicht zu reduzieren und den Verbrauch fossiler Rohstoffe zu minimieren, hat das Projekt Bioconcept-Car einen Preis für ein hervorragendes und wegweisendes Beispiel für innovative Kunststofftechnik gewonnen [14]. Es greift aber auch den oben bereits beschriebenen Trend auf, neben Kunststoffen zunehmend auch wieder Naturfasern und Naturstoffe in den Sportartikelbau einzubeziehen.

### Ausblick

Kunststoffe haben den Sport revolutioniert. Durch ihr häufig geringes Gewicht bei gleichzeitig großer Variierbarkeit ihrer Eigenschaften, haben sie immer wieder zu Sprüngen bei sportlichen Leistungen und Rekorden geführt. Auf der einen Seite ist dieser Trend ungebrochen, wie etwa die Entwicklung bei thermoplastischen Urethanen zeigt [4]. Andererseits gibt es einen gegenläufigen Trend, wieder mehr Naturstoffe und -fasern zu verwenden (Arbeitsblatt 1). Dies ist nicht nur einem Trend nach mehr „bio“ geschuldet. Viele herkömmliche Werk- und Naturstoffe weisen ebenfalls gute Eigenschaften für bestimmte Anwendungen auf, die mit denen moderner Kunststoffe durchaus konkurrieren können, teilweise sogar Vorteile haben. Besonders wertvoll aber werden sie, wenn man die Vorteile der verschiedenen Stoffe kombiniert, wie die hier vorgestellten Beispiele zeigen.

Daneben führt der Einbezug von natürlichen Rohstoffen zu einer Einsparung fossiler Ressourcen (Arbeitsblatt 2). Auch kann man Trends beobachten, entgegen früheren Prognosen, noch eine Weile lang an bewährten Technologien festzuhalten, weil sich nicht alle Hoffnungen in die neuen Werkstoffe erfüllt haben. Diese Trends erlauben eine Vielzahl von Möglichkeiten über Entwicklungen in der modernen Chemie am konkreten, alltagsnahen Beispiel oder im Allgemeinen zu diskutieren. Sie erlauben auch Bewertungsfragestellungen, die über das rein innerfachliche Bewerten hinausgehen und sowohl die individuelle Konsumebene als auch die wirtschaftliche Entwicklung einbeziehen [7].

### Literatur

- [1] V. Wiskamp, M. Holfeld, Kunststoffe steigern die Mobilität im Sport, Denk(T)räume Mobilität Band 5: Chemie und Sport, 2011, S. 28-35.
- [2] M. Stolz, T. Witteck, R. Marks, I. Eilks, ‚Doping‘ für den Chemieunterricht und eine Reflexion über geeignete Themen für einen gesellschaftlich relevanten Chemieunterricht. MNU 8/64 (2011), 472-479.
- [3] M. Holfeld, V. Wiskamp, Kunststoffe in Sportartikeln, RAAbits-Chemie, Ergänzungslieferung 4/2004, (2004)
- [4] L. Hollensen, Der Sportschuh. Ein bewegendes Stück Kunststoffchemie. PdN-ChiS 2/55, 29-32 (2006).
- [5] R. Hasebrock, Die Chemie im Turnschuh. Unveröffentlichte Staatsexamensarbeit Universität Bremen 2008.
- [6] R. Demuth, Chemie im Fußball, PdN-ChiS 2/55, S. 25-28 (2006)
- [7] N. Belova, R. Hasebrock, M. Holfeld, I. Eilks, Die Chemie im Sportschuh untersuchen und bewerten. PdN-ChiS **QUERVERWEIS IM HEFT BITTE ERGÄNZEN**.
- [8] FWU: Naturfaserverstärkte Kunststoffe, 4602610, (2009)
- [9] <http://www.newslab.cz/de/tenisove-rakety/>
- [10] <http://www.testberichte.de/fahrradteile/2821/fahrradrahmen/artikel/die-materialfrage.html>
- [11] L. Asselborn, u.a., Chemie heute, Sek. II, Hannover: Schroedel, S. 359-380 (2009).
- [12] V. Wiskamp, Einführung in die makromolekulare Chemie, Frankfurt: Harri Deutsch (1999)

[13] <http://www.fourmotors.com/?id=189>

[14] <http://mediathek.fnr.de/grafiken/pressefotos/chemisch-technisch/nachhaltige-bio-werkstoffe-fur-das-auto-der-zukunft.html>

[15] <http://www.technikatlas.de/~tb4/fraktionier.htm>

*Dr. Martin Holfeld, Bundespräsident-Theodor-Heuss-Schule Ziegenhainer Straße 8, 34576  
Homberg/Efze, E-Mail: m-holfeld@gmx.de, Prof. Dr. Ingo Eilks, Universität Bremen, FB 2,  
Leobener Str. NW2, 28334 Bremen, E-Mail: ingo.eilks@uni-bremen.de*

## Arbeitsblatt 1

Naturfasern:

1) Bei den naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK) werden Naturfasern in eine Kunststoffmatrix eingebunden.

Recherchieren Sie im Internet über die Fasern: Flachs, Jute, Baumwolle, Seide und Wolle.



Abb. 2: Flachsfasern



Abb. 3: Feld mit Baumwolle



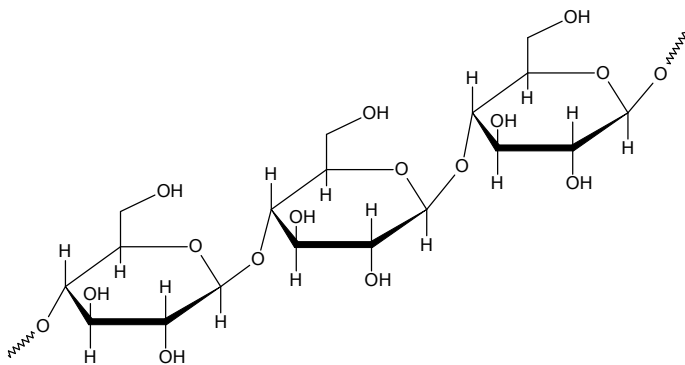
Abb. 4: Kokons der Seidenspinnerraupe

Kunstseide besteht aus Celluloseeinheiten, deshalb ist Kunstseide vom chemischen Aufbau eher mit Flachs als mit Seide verwandt. Welche der beiden Fasern (Seide oder Kunstseide) besitzt eine ähnliche chemische Struktur wie der Kunststoff Nylon?

## Arbeitsblatt 1 (Lösung)

### Naturfasern:

**Die Flachsfaser (Leinenfaser)** wird aus der Flachspflanze gewonnen. Es handelt sich um Cellulosefasern, die durch Pektine verbunden sind. Bei der Produktion wird nach der Ernte der Pektin- und Mineralanteil mit Natronlauge in weiteren Produktionsschritten fast vollständig entfernt. Der Hauptbestandteil, die Cellulose, hat die Strukturformel:



**Abb. 5:** Strukturformelausschnitt der Cellulose

**Baumwolle** besteht ebenfalls aus Cellulose. Sie wird von der Baumwollpflanze, einer sehr alten Kulturpflanze, gewonnen.

Strukturformel, s.o.

**Seide** wird aus den Kokons der Seidenspinnerraupe gewonnen. Die Faser besteht aus Proteinketten. Seide kommt ursprünglich aus China und wurde in großem Maße über die Seidenstraße eingeführt.

**Wolle**, meist ist Schafwolle gemeint, besteht ebenfalls aus Faserproteinen. Im Unterschied zu Seide ist der Cysteinanteil von Wolle aber deutlich höher.

**Kunstseide** besteht aus Celluloseeinheiten, deshalb ist Kunstseide vom chemischen Aufbau eher mit Flachs als mit Seide verwandt.

**Seide** ist ein Polypeptid. Die Aminosäuren sind über Peptidbindungen miteinander verknüpft. Auch im Nylon sind die Einheiten (Diamin und Disäure) über Peptidbindungen miteinander verbunden. Seide und Nylon sind strukturell ähnlich aufgebaut, auch wenn Seide ein Naturprodukt ist und Nylon ein Kunststoff.

## Arbeitsblatt 2

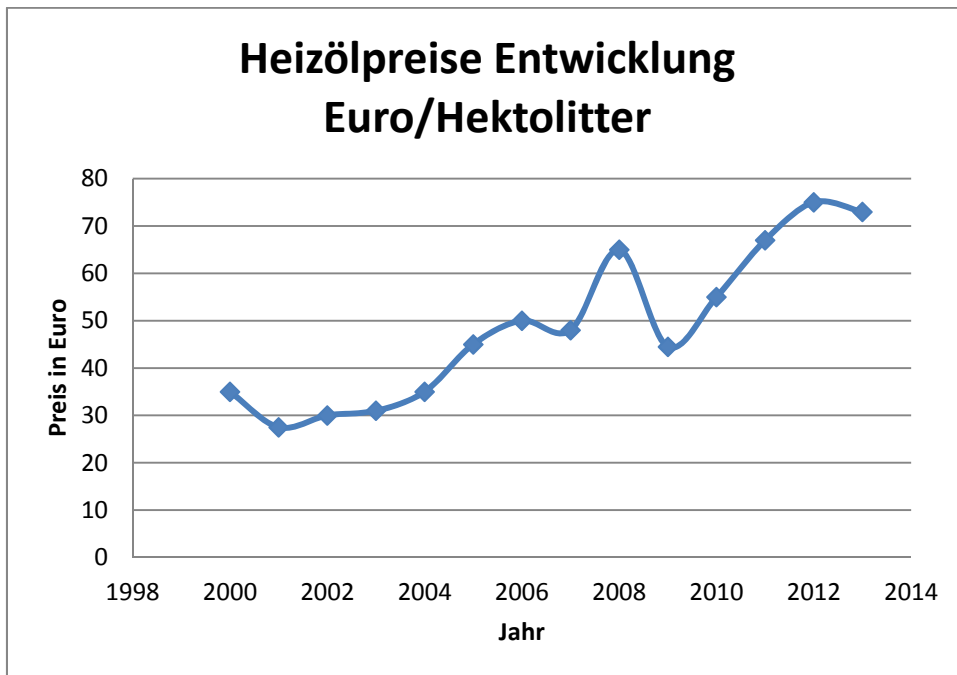


Abb. 6: Verlauf der Heizölpreise von 2010 bis 2011

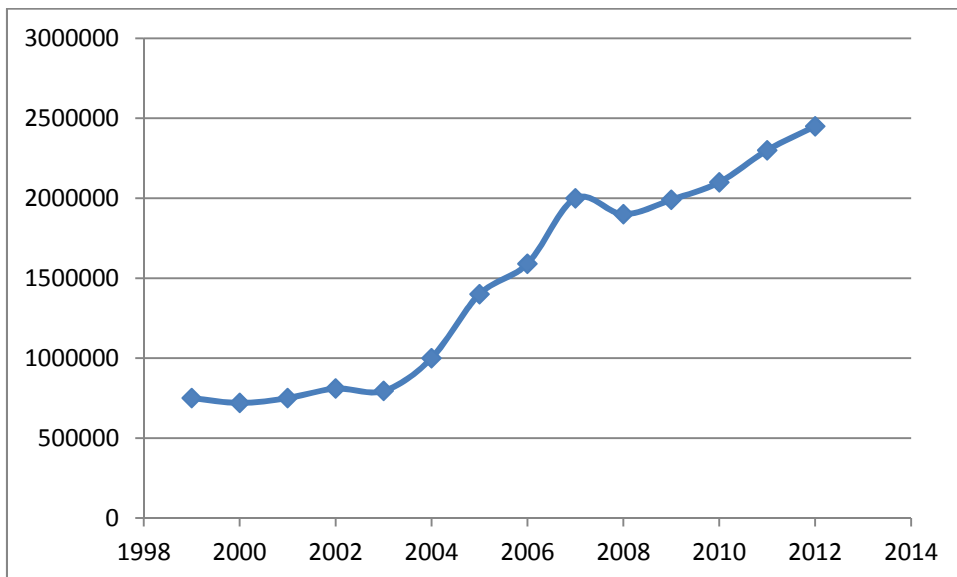


Abb.7: Nachwachsende Rohstoffe in Deutschland (1999 – 2012)

1. Vergleichen Sie die beiden Abbildungen und interpretieren Sie den rasanten Anstieg des Anbaus von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland seit 2004.

2. Recherchieren Sie im Internet den Anteil an Öl für die Kunststoffherstellung.

## Arbeitsblatt 2 (Lösung)

*Der Rohstoff für herkömmliche Kunststoffe ist Erdöl. Mit einem steigenden Erdölpreis nimmt die Entwicklung von NFK zu. Die Naturfasern können einfach in der Landwirtschaft angebaut werden.*

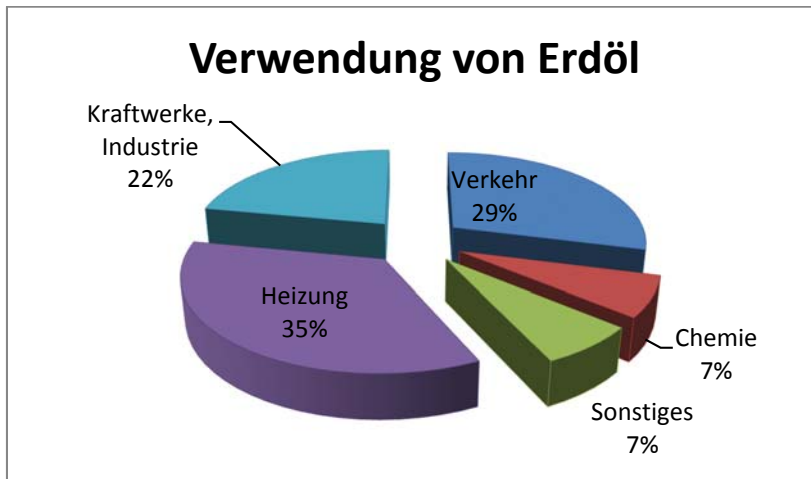


Abb. 8: Verwendung von Erdöl [15]

*Der Anteil des gefördertten Erdöls, der für Kunststoffe verwendet wird, ist immer noch relativ gering, aber mit einem steigenden Erdölpreis werden auch für den Kunststoffbereich Ersatzstoffe gesucht.*

## Versuche:

### Versuch 1

#### Herstellung von Kohlenstofffasern aus Polyacrylnitrilfasern

Anisotrope Kohlenstofffasern, die aus ineinander greifenden und in Faserrichtung orientierten Graphitschichten bestehen, können aus Polyacrylnitrilfasern synthetisiert werden. Diese werden zunächst oberhalb 200 °C an der Luft (Trockenschrank) vorbehandelt. Dabei wird die Oberfläche der PAN-Faser unter Bildung von Hydroxyl-, Carbonyl- und Carbonsäuregruppen oxidiert und die Faser dadurch in ihrer Form stabilisiert. Außerdem setzen Cyclisierungen (Additionen benachbarter Nitrilgruppen), Dehydrierungen und Eliminierungen von Ammoniak, Blausäure und Wasser ein.

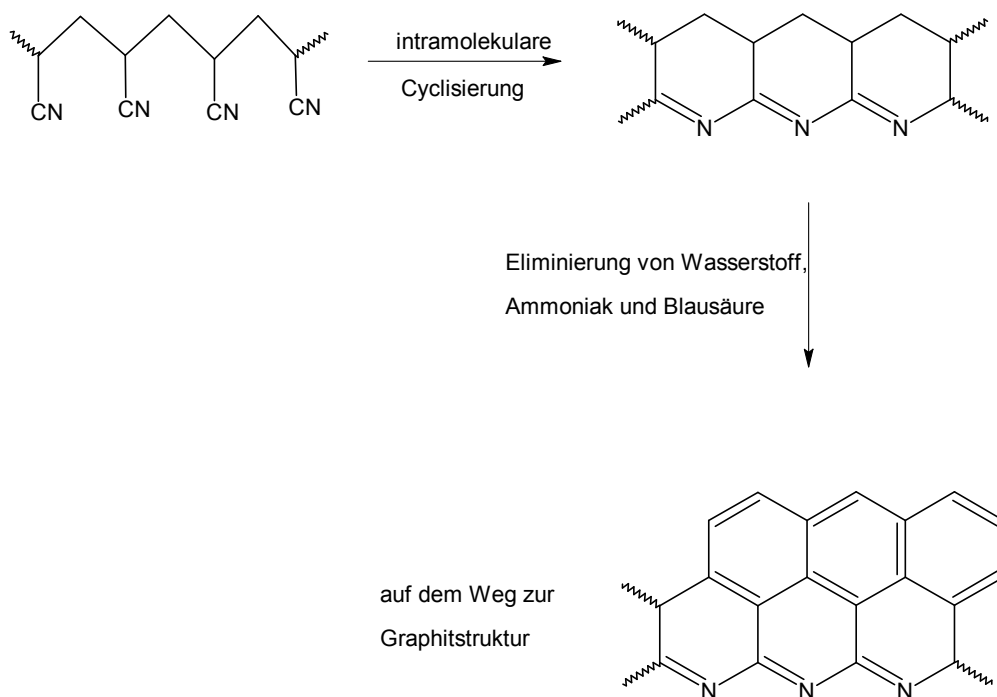


Abb. 9: Strukturformeln zur Carbonfaserherstellung

#### Geräte:

Stativ mit Klammer und Muffe, Plastikinjektionspritze (20 ml) mit großer Kanüle (2,1 x 30 mm), Becherglas (400 ml, hohe Form), Pinzette

#### Chemikalien:

10%ige Lösung von Polyacrylnitril in Dimethylacetamid

H: 360D-332-312, P: 201-302+352-308+313



*Sicherheitshinweis:*

Ein Hautkontakt mit der Polyacrylnitril-Lösung ist unbedingt zu vermeiden. Deshalb Schutzhandschuhe tragen!

*Durchführung:*

Eine Spritze wird senkrecht in ein Stativ eingespannt, so dass die Kanüle nach unten auf ein mit 300 ml Wasser gefülltes Becherglas zeigt. Der Spritzenkolben wird herausgezogen und die Spritze wird mit der Polyacrylnitril-Lösung gefüllt.

Der Kolben wird wieder auf die Spritze gesetzt und vorsichtig gedrückt, dass die Lösung langsam in das Wasser läuft. Die entstandenen Fasern werden mit der Pinzette aufgenommen und an der Luft getrocknet. Anschließend werden sie über Nacht bei 250° C in den Trockenschrank gegeben.

Die resultierenden Fasern sind schwarz und flammfest.



Abb.10: Fällung von Polyacrylnitril als Faden

*Entsorgung:*

Die Lösung von Polyacrylnitril in Dimethylacetamid wird in den organischen Lösungsmittelabfällen entsorgt.

## Versuch 2:

### Herstellung von Faserverbundmaterialien

#### *Geräte:*

Papp- oder Plastikbecher, Holzspatel

#### *Chemikalien:*

Fasergewebeproben (Carbonfasern, Glasfasern oder Aramidfasermatten), Epoxid-Laminiersystem (Epoxid EP 210 und Härter EPH 414; Bezugsquelle: Firma Bacuplast Faserverbundtechnik GmbH, Dreherstr. 4, Industriegebiet Groshülsberg, D-42899 Remscheid-Lüttringhausen), alternativ Bayer Versuchspaket 12 Lekutherm E 320<sup>®</sup> und Kalthärter T 3<sup>®</sup>

#### *Sicherheitshinweis:*

Einen Hautkontakt mit dem Harz und Härter ist unbedingt zu vermeiden. Deshalb Schutzhandschuhe tragen!

#### *Hinweis:*

Die Mischung aus Epoxid und Härter muss unmittelbar nach ihrer Herstellung verwendet werden.

#### *Durchführung:*

In einem Papp- oder Plastikbecher werden 10 ml Härter EPH 414 und 25 ml Harz EP 210 mit einem Holzspatel gründlich gemischt. Ein Fasergewebestück (10 cm<sup>2</sup>) wird auf Papier gelegt und mit der Harzmischung bestrichen. Mehrere Fasergewebestücke können miteinander verklebt werden.

#### *Versuchsalternative unter Verwendung des Bayer-Versuchspaket 12:*

In einem Papp- oder Plastikbecher werden 40 g Lekutherm 320<sup>®</sup> und 8 g Kalthärter T<sup>®</sup> 3 mit einem Holzspatel gründlich gemischt. Ein Fasergewebestück (10 cm<sup>2</sup>) wird auf Papier gelegt und mit der Harzmischung bestrichen. Es können mehrere Fasergewebestücke miteinander verklebt werden. Die Trocknungszeit beträgt ca. einen Tag.

# Die Chemie im Sportschuh untersuchen und bewerten

*Nadja Belova, Rebecca Hasebrock, Martin Holfeld & Ingo Eilks*

*MS für PDN-ChiS*

*Bereits 2006 wurde die Chemie im Sportschuh als motivierender Kontext für den Chemieunterricht von Hollensen vorgeschlagen. In Ergänzung diskutiert dieser Artikel, dass man sich der Chemie im Sportschuh bereits in der SI auf differenzierendem Weg annähern kann. Konkret wird auch eine Aufgabe vorgestellt, wie man hieran auch Fragen von Kommunikation und Bewertung strukturiert thematisieren kann.*

## 1 Einleitung

Moderner Sport ist High-Tech. Die meisten der heutigen Leistungen im Sport wären ohne innovative Sportgeräte und –bekleidung nicht möglich. Dabei geht es aber nicht nur um Hochleistungswerkstoffe für den Spitzensport. Auch im Breitensport und der Freizeitbekleidung werden zunehmend moderne Werkstoffe aus der Chemie verwendet, ohne dass man dies oftmals zur Kenntnis nimmt. So ist die Entscheidung für einen Fahrrad mit Carbonfaserrahmen eine bewusste Kaufentscheidung für ein besonders leichtes und verwindungssteifes Rad. Bei Sportbekleidung für Alltag oder Freizeit werden Entscheidungen hingegen häufig eher auf der Basis von Design, Markenimage oder Preis getroffen. Doch selbst trendige und günstige Sportbekleidung ist heute oftmals High-Tech. Das trifft in besonderem Maße auch auf Sport- und Freizeitschuhe zu.

Im Heft „Chemie und Sport“ der PDN 2006 stellt Hollensen [1] bereits die besondere Bedeutung moderner Kunststoffe für Sportschuhe heraus. Er beschreibt eine Reihe neuerer technischer Entwicklungen in der Sportschuhproduktion und schlägt den Sportschuh in der Online-Ergänzung als Kontext für die Behandlung der Kunststoffe in der Sekundarstufe II vor (auch [2]). Hier wird auch eine Reihe von Versuchen angeregt, die man mit und um den Kontext des Sportschuhs machen kann.

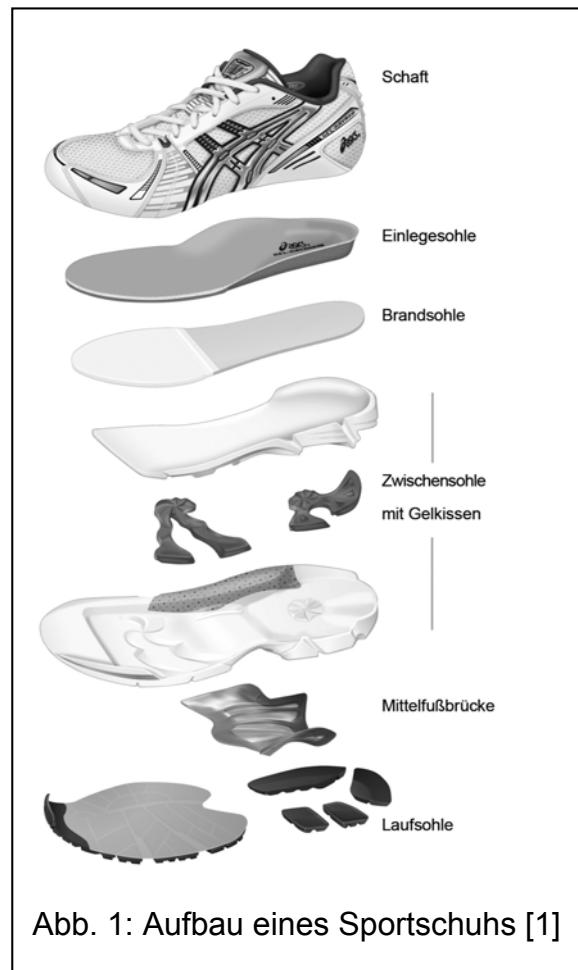
Dieser Beitrag greift die Ideen von Hollensen auf. Vorgestellt wird eine Sammlung von konkreten Versuchen rund um den Sportschuh (zu finden in der Online-Ergänzung). Eine Diskussion dieser Versuche zeigt, dass eine Behandlung des Sportschuhs bereits in der Sekundarstufe möglich ist. Dies kann etwa im Projekt oder in der Form einer Lernfirma geschehen, aber auch ein gutes Thema für den Wahlpflichtunterricht sein. Zudem wird eine differenzierende Lern- oder Lernzielüberprüfungsaufgabe in Anlehnung an Belova et al. [3] vorgeschlagen, in der man im Zu-

sammenhang von Werk- oder Kunststoffen das ganze Kompetenzspektrum ansprechen oder überprüfen kann.

## 2 Die Chemie im Turnschuh – ein Überblick

Ein Sportschuh ist ungeheuren Belastungen ausgesetzt ist. Wenn etwa ein Freizeittläufer 30 Kilometer pro Woche zurücklegt und seinen Laufschuh ein halbes Jahr trägt, so prallt jeder Schuh mehr etwa 250000 Mal auf den Boden, wobei die Wucht des Aufpralls jeweils rund 200 Kilogramm beträgt. Dabei wird verlangt, dass der Aufprall sowohl im Winter als auch im Sommer abgefedert wird, die Sohle nicht versteift und der Fuß über den gesamten Belastungszeitraum stabilisiert bzw. die natürliche Bewegung des Fußes unterstützt wird. Berücksichtigt man, dass jedes kleine Rutschen sowie jede Form von Instabilität des Fußes oder des Schuhs den Sportler zu Ausgleichsbewegungen zwingen, die neben dem unnötigen Verbrauch von Energie auch das Verletzungsrisiko erhöhen, so wird die Wichtigkeit der in Sportschuhen verarbeiteten Materialien ersichtlich.

Neben Aussehen, Markenimage und Preise sind beim Sportschuh also auch Funktion, Bequemlichkeit und Passung zum angestrebten Einsatz wichtig. Diese Eigenschaften werden nicht nur vom Schnitt und Design bestimmt, sondern auch von den verwendeten Materialien. So kann man entlang des Sport- und Freizeitschuhs viel über das Struktur-Wirkungs-Denken lernen. Es kann hinterfragt werden, warum bestimmte Materialien für die jeweiligen Komponenten eines Schuhs ausgewählt werden. Die makroskopische Eigenschaften der einzelnen Materialien können dann untersucht und – abhängig vom Jahrgang - auf der submikroskopischen Ebene, also der Ebene der Atome und Bindungen, erklärt werden. Vernachlässigt werden sollte dabei aber nicht die Mesoebene. Die Mesoebene ist die Ebene von stofflichen Strukturen, die nur mittelbar auf der Ebene der Atome und Bindungen erklärbar ist [4], aber gerade bei Werkstoffen bedeutende Eigenschaften erst ermöglicht. Betrachtet man Dämmstoffe in der Sohle oder at-



mungsaktive Gewebe, so sind es nicht nur die Eigenschaften der molekularen Struktur, die die gewünschte Wirkung erzielen. Polyurethan wird zum Beispiel in Sportgeräten von sehr weich bis sehr hart, von sehr leicht bis sehr kompakt eingesetzt. Es ist die Verarbeitung zu Strukturen und Mesostrukturen. Hierbei geht es um die Frage etwa wie Makromoleküle vernetzt, welche anderen Stoffe eingeschlossen oder wie sie als Verbundwerkstoffe genutzt werden. So ist es bei Sportschuhen nicht der Stoff allein, der die Funktion ausmacht, sondern auch die Verarbeitung etwa in Wabenstrukturen, als Schäume oder Gels. Dies sind wichtige Inhalte beim Lernen über Werkstoffe, die hier an einem motivierenden Beispiel aus der unmittelbaren Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler einmal thematisiert werden können.

Wie jeder andere Schuh besteht ein Sportschuh grundsätzlich aus vier Komponenten: Einem Schaft, der den Fuß umschließt, einer von unten angesetzten Brandsohle, einer Zwischensohle und der Laufsohle (Abb. 1).

Der Schaft besteht meistens aus Kunstleder und Mesh. Kunstleder besteht in der Regel aus einem mit Polyurethan oder Polyvinylchlorid beschichteten Nylongewebe. Mesh ist ein loses Nylon- oder PolyesterVLies, das leicht, gut verformbar ist und luftdurchlässig ist (bedeckt von einem netzartigen Gewebe und nach innen durch ein weiteres Gewebe geschützt). Kunstleder benutzt man dort, wo Stabilität und Schutz wichtig sind, etwa bei Querbewegungen und gegen Schläge von Außen. Mesh wird dort eingesetzt, wo Flexibilität gefordert ist um unvorteilhafte Reibungspunkte sowie Faltenbildung zu vermeiden. Zudem werden die Zunge und der Fersenbereich oftmals mit einem weichen Polyurethanschaum gepolstert. Im Bereich des Oberschuhs kommt es außerdem zur Verwendung von thermoplastischen Polyurethanen. Echtes Leder findet man bei Sportschuhen heute nur noch selten, etwa als Applikationen oder im Hochpreissegment. Ein Vorteil von Leder wäre, dass es dem Schaft Festigkeit verleiht und den Fuß vor äußeren mechanischen Einflüssen sehr gut schützt.

Die Brandsohle stellt das Verbindungsglied zwischen dem Schaft und der Sohle dar. Sie wird an die Unterseite des Schaftes angenäht oder angeklebt. Da der Materialwechsel zwischen Schaft und Sohle in einem Bereich mit starker mechanischer Beanspruchung stattfindet, muss die Brandsohle aus sehr festem und strapazierfähigem Material sein. Hierzu verwendet man häufig ein robustes PolyesterVLies oder Texon, ein VLies auf Cellulosebasis. Auf der Seite des Fußes wird die Brandsohle oft noch mit weiteren Materialien, wie zum Beispiel einem dünnen Polyurethanschaum beklebt.

Die Zwischensohle ist entscheidend für die Dämpfung und Unterstützung der Einwärtsdrehung des Fußes. Hierzu werden hauptsächlich geschäumtes Polyethylvinylacetat (EVA) und Polyurethan (PU) eingesetzt. EVA-Schaum ist preisgünstiger und leichter. PU-Schaum hat aber die günstigeren mechanischen Eigenschaften. Die

Fähigkeit nach der Stauchung in seine ursprüngliche Form zurückzukehren, hält deutlich länger vor als beim EVA-Schaum. Aus diesem Grund wird vor allem schweren Sportlern zu einer Zwischensohle aus PU-Schaum geraten. Neue dämpfende Strukturelemente auf der Basis leichter thermoplastischer Urethane (TPU) kombinieren heute die geringe Dichte von EVA mit den günstigen mechanischen Eigenschaften der PUs. Auch zur Versteifung eingesetzte Strukturelemente (Torsion Bars), die das zu starke Verwringen der weichen Laufsohle verhindern, werden häufig aus TPU hergestellt. Zur besseren Dämpfung werden in der Zwischensohle außerdem Gel- oder Gaskissen eingesetzt, etwa aus Silikon oder viskosem Polyurethan.

Die Laufsohle schafft die richtige Bodenhaftung verschaffen. Dazu wird traditionell meist Gummi aus einer Mischung aus Natur- und Synthetikgummi verwendet. Während den Laufsohlen im Outdoorbereich, ähnlich wie bei Autoreifen, Ruß zugesetzt wird, um den Abrieb zu verbessern, ist dies bei Hallenschuhen nicht möglich, um unerwünschte schwarze Laufspuren auf Hallenböden zu vermeiden. Daher besitzen Hallenschuhe meist eine helle rußfreie Laufsohle. Da für die Laufsohle von Sportschuhen auch eine hohe Flexibilität über einen weiten Temperaturbereich entscheidend ist, wird auch hier immer häufiger auf TPU zurückgegriffen. Ein weiterer Vorteil der Verwendung von TPU in Laufsohlen ist, dass die dämpfenden Strukturelemente der Zwischensohle sowie die Torsion Bars, als Verbindungsglied zwischen vorderer und hinterer Laufsohle, ebenfalls aus TPU bestehen und sich die einzelnen Komponenten so sehr gut miteinander verbinden lassen. Einziger Nachteil der TPU Sohlen bisher ist die besonders bei Nässe geringere Bodenhaftung gegenüber Gummi. Zu einer genaueren Diskussion der Kunststoffe im Sportschuh siehe [1].

### **3 Die Chemie im Turnschuh untersuchen**

Das Baumdiagramm in Abb. 2 gibt eine Übersicht über mögliche Experimente zur Chemie im Turnschuh. Die Anordnung erlaubt eine Übersicht hinsichtlich der verschiedenen Komponenten des Sportschuhs und verschiedener Versuchsebenen (einfache Materialtests, Eigenschaften untersuchen, Kunststoffherstellung). Viele dieser Experimente lassen sich bereits in der Sekundarstufe I durchführen. Eine Tabelle in der Online-Ergänzung gibt genauere Angaben zu den einzelnen Versuchen.

Das einfache Auftrennen alter Sportschuhe erlaubt einen praktischen Zugang zum Thema. Zunächst werden lose Bestandteile, wie Schnürsenkel oder Einlegesohle, entfernt. Danach kann man die Schuhe mit einem Teppichmesser in seine Bestandteile zerlegen. So lernen die Schülerinnen und Schüler den Aufbau eines Turnschuhs kennen und entdecken die zahlreichen Materialien, aus denen der Schuh besteht. Zur Untersuchung der unterschiedlichen Materialien eignen sich einfache Materialtests. Hierbei können Verformbarkeit und Zugfestigkeit verglichen oder die Nadelpro-

be durchgeführt werden. Des Weiteren kann die unterschiedliche Dichte untersucht werden.

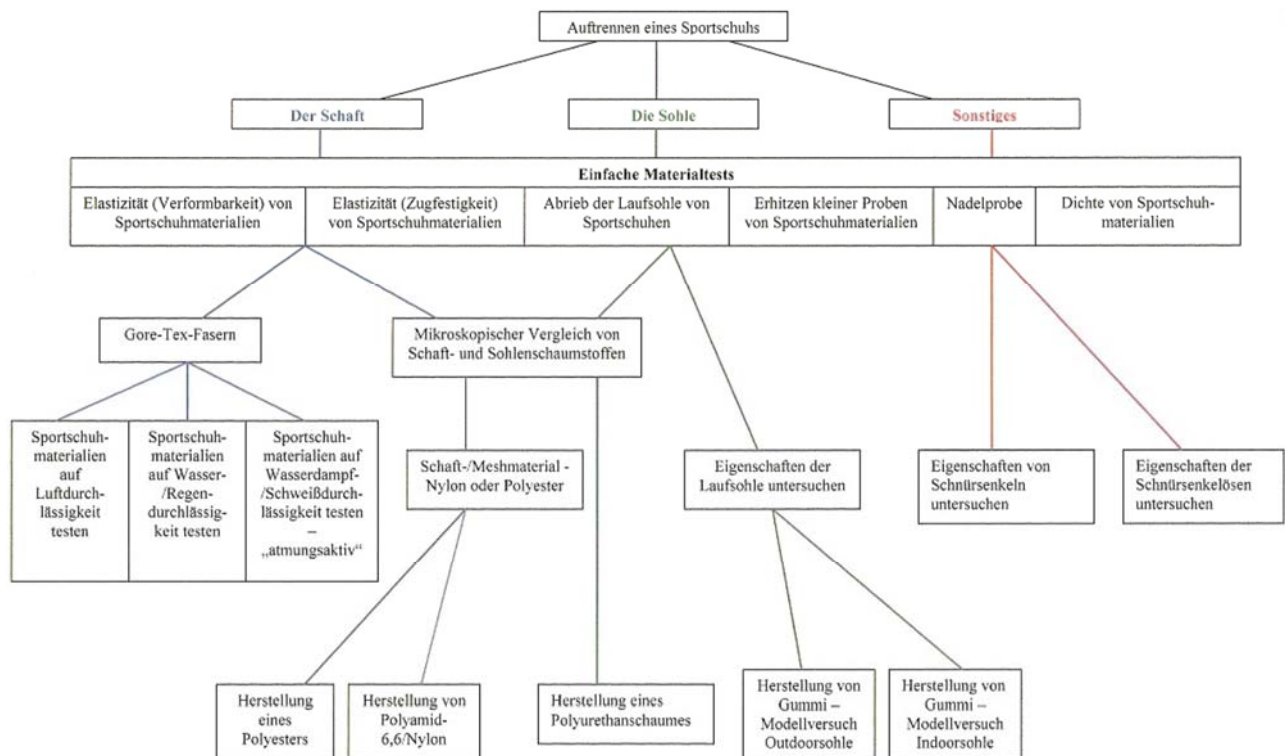


Abb. 2: Übersicht über mögliche experimentelle Untersuchungen

Der Abrieb bzw. die Bodenhaftung der Laufsohle können mit der Einlegesohle, Brandsohle und Zwischensohle) verglichen werden. Hier kann man die Sohlen mit Druck auf einer ebenen Fläche hin und her schieben und die notwendige Kraftaufwendung vergleichen. Ebenso kann auf diese Art und Weise die unterschiedliche Griffigkeit von verschiedenen Sportschuhlaufsohlen (Indoor/Outdoor, verschiedene Sportarten) festgestellt und mit den Anforderungen der jeweiligen Sportart in Bezug gesetzt werden. Ebenso kann der Schaft untersucht werden. Hier findet sich neben Kunstleder und Mesh häufig auch Gore-Tex. Auch hier können Zug- und Stoßfestigkeit aber auch Wasser- und Wasserdampfdurchlässigkeit verglichen werden. Für die Gore-Tex-Materialien gibt es von den Herstellerfirmen Proben und Test-Kits. Zur weiteren Unterscheidung der Sohlen- und Schaftmaterialien können die dort verwendeten Materialien mikroskopisch verglichen werden. Hier wird die unterschiedliche Mesostruktur vieler Bauteile deutlich.

In guten Lerngruppen kann man dann weiter gehen. Hier können dann Nylon- oder Polyestervlies im Mesh nachgewiesen werden. Hierzu wird Mesh über der Brennerflamme erhitzt und die Zersetzungsprodukte werden mit einem angefeuchteten Stück Indikatorpapier getestet. Eine basische Reaktion deutet auf Nylon, eine saure Reaktion auf Polyester hin. Wenn man mag können Nylon und Polyester dann auch ein-

mal hergestellt werden. Gleiches gilt für das an vielen Stellen eingesetzte Polyurethan. Die Strukturen kann man auch am Ende der Sekundarstufe I einmal vorstellen, wenn erstmals die Kunststoffe behandelt wurden. Die Bildungsmechanismen braucht man hierfür nicht unbedingt.

## 5 Möglichkeiten im Unterricht

Die genannten Experimente bieten Möglichkeiten, die Thematik der Sportschuhe experimentell in den Chemieunterricht einzugliedern. Szenarien für einen Einsatz bieten dann sowohl ein kontext-orientierter Unterrichtsgang [1], ein Projekt oder eine Lernfirma [5]. Hier lassen sich die Inhalte dann beliebig kombinieren und je nach Leistungsstärke der Schülerinnen und Schüler unterschiedlich zusammenstellen.

Gerade das selbstständige und selbstgesteuerte Lernen in einem Projekt oder einer Lernfirma bietet den Lernenden vielfältige Möglichkeiten eigene Versuche zu recherchieren, zu planen und die gewonnenen Kenntnisse kreativ, etwa auf Postern darzustellen. Abb. 3 macht einen Vorschlag, wie dies gegliedert sein könnte. Die Vielfalt von Sportschuhen und die permanente technische Entwicklung erlauben dabei immer neue und noch nicht dokumentierte Beobachtungen und Ergebnisse.

Durch ein solch offenes Vorgehen bieten sich auch gute Möglichkeiten für innere Differenzierung. So können etwa Erklärungen über das Struktur-Wirkungs-Denken den leistungsstärkeren Schülerinnen und Schülern überlassen werden, die diese dann in die jeweiligen Gruppenarbeiten einbringen. Weniger leistungsstarke Schülerinnen und Schüler können sich mehr in die praktische Arbeit, das Recherchieren und dokumentieren einbringen.

Gruppe 1: Sportschuhproduktion/ verschiedene Sportschuharten	Gruppe 2: Materialtests	Gruppe 3: Der Schaft	Gruppe 4: Die Sohle
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produktionsformen, Produktionsbedingungen, Preiszusammensetzung</li> <li>- Vergleich zwischen Indoor- und Outdoor-Schuhen (Sohle und Schaft)</li> <li>- Vergleich zwischen den Schuhen für unterschiedliche Sportarten</li> <li>- eingesetzte Technologien und Materialien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufbau eines Sportschuhs</li> <li>- Die Eigenschaften der verschiedenen Materialien (Elastizität, Abrieb, etc.)</li> <li>- einfache Materialtests (z.B. Dichte, Nadelprobe etc.)</li> <li>- Struktur-Eigenschafts-Beziehungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Gore-Tex Membran</li> <li>- Unterschiede zwischen Schaft- und Sohlen-schaumstoff</li> <li>- Nylon oder Polyester (Identifikation und Synthese)</li> <li>- Struktur-Eigenschafts-Beziehungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die verschiedenen Sohlen</li> <li>- Synthese von Polyurethan als Material der Zwischensohle</li> <li>- Die Laufsohle (mechanische Eigenschaften, Modell-Versuche)</li> <li>- Struktur-Eigenschafts-Beziehungen</li> </ul>

Abb. 3: Mögliche Gruppeneinteilung für den Projektunterricht oder eine Lernfirma

#### 4 Die Chemie im Turnschuh bewerten

Ausgehend von der Chemie im Sportschuh (also den Materialien, der Untersuchung ihrer Eigenschaften und der Herstellung) können auch Aspekte über die reine Chemie hinaus behandelt werden. So kann den Schülerinnen und Schülern verdeutlicht werden, wie wichtig die Kenntnis von Materialien und ihren Eigenschaften, ihren Vor- und Nachteilen, für viele Berufe ist. Dies betrifft etwa den Sport- und Fitnesssektor, aber auch Berufe im Groß- und Einzelhandel, der entsprechende Produkte vertreibt. Es kann aber auch Kommunikations- und Bewertungskompetenz geschult werden, etwa indem man Werbung und eigenes Kaufverhalten reflektiert oder über Produktionsbedingungen von Sportbekleidung in manchen ostasiatischen Ländern diskutiert [1].

Ein Format fachliche Inhalte, experimentelle Untersuchungen und Kommunikations- und Bewertungskompetenz anzusprechen wurde kürzlich am Beispiel der Parabene von Belova et al. [3] vorgeschlagen. Hierbei werden in einem thematischen Zusammenhang nach immer dem gleichen Grundmuster verschiedene Aufgaben zu allen vier Kompetenzbereichen der Bildungs- und Lehrpläne und mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad zusammengestellt. Dieses Aufgabenformat (Abb. 3) lässt sich gut auch auf die Sportschuhe anwenden.

<b>Wissen und Anwenden</b>	
1) Text- und Begriffsverständnis	4) Fachwissen reproduzieren
2-3) Mathematische Berechnungen	5) Fachwissen, einfacher Transfer
	6) Fachwissen anwenden
<b>Planen und Untersuchen</b>	
7) Planung einer einfachen Untersuchung	8) Planung einer Untersuchung mit mehr Komplexität oder Offenheit
<b>Kommunizieren, Bewerten und Entscheiden</b>	
9) Einen Fachinhalt kommunizieren oder mit grafischer Illustration umgehen	
10) Einfache Aussagen verstehen und bewerten	11) Nicht eindeutig entscheidbare Aussagen verstehen und bewerten
12) Eine eigene Position finden und formulieren	

Abb. 3. Aufgaben für das ganze Kompetenzspektrum nach [3]

Voraussetzung für die Anwendung dieses Aufgabenformats ist, dass sich neben dem klaren Chemiebezug und geeigneten Experimenten auch Entscheidungssituationen mit persönlicher und gesellschaftlicher Relevanz finden lassen. Auch Sportschuhe können zu solchen Entscheidungssituationen führen. Diese betreffen etwa die Kaufentscheidung und die Reaktion auf Sportartikel-Werbung auf individueller Ebene. Sie betreffen aber auch generell unser Konsumverhalten gegenüber Produkten, die unter teilweise bedenklichen sozialen und ökologischen Standards etwa in Ost-Asien gefertigt werden. Das Arbeitsmaterial auf den folgenden Seiten mache einen Vorschlag für eine solche Aufgabe.

## 5 Ausblick

Sportschuhe gehören bei den meisten Jugendlichen zur Alltagskleidung. Chemisch gesehen sind sie High-Tec-Produkte, in denen verschiedene Werkstoffe verwendet werden, insbesondere Kunststoffe. Aus der Interessenforschung weiß man, dass solche Themen aus der unmittelbaren Lebensumwelt und mit Bezug zu ihrem Körper für viele Schülerinnen sehr motivierend sind. Daher sollte man überlegen, ob man nicht eine Behandlung von Werkstoffen oder Kunststoffen nicht schon in der Sekundarstufe I ausgehend von Sportartikeln erschließen kann. Die hier vorgestellten Versuche zeigen, dass dies auch schon möglich ist, wenn man die Synthesen und Bildungsmechanismen der Kunststoffe im Detail noch nicht behandeln kann. Die Aufgabe auf den folgenden Seiten zeigt dann auch auf, dass sich hieran verschiedene Perspektiven auf die Chemie und auch die Fokussierung auf unterschiedliche Kompetenzen gut verbinden lassen.

## Literatur

[1] Hollensen, L. (2006). Der Sportschuh. Ein bewegendes Stück Kunststoffchemie. *PdN-ChiS* 2/55, 29-32.

[2] Hollensen, L. & Wambach, H. (Hrsg.) (2007). *Materialien-Handbuch Kursunterricht Chemie*. Band 10/2 – Lernen im Kontext II. Köln: Aulis Verlag, 212-223.

[3] Belova, N., Marks, R., & Eilks, I. (2014). Aufgaben für das ganze Kompetenzspektrum: Beispiel Parabene. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie in der Schule*.

[4] Meijer, M. R., Bulte, A. M. W. & Pilot, A. (2007). Structure-property relations between macro and micro representations: relevant meso-levels in authentic tasks. Freudenthal Institute for Science and Mathematics Education. Utrecht: Universiteit Utrecht.

[5] Witteck, T., & Eilks, I. (2005). Die Max Sauer GmbH – Eine Lernfirma zu Säuren und Basen. *NiU-Ch*, 16 (88/89), 51-56.

## TPU: EIN HIGH-TEC KUNSTSTOFF FÜR MODERNE SPORTSCHUHE

Früher waren Sportschuhe häufig aus Naturmaterialien, meist aus Leder. Die Schuhe boten guten Schutz und Halt für den Fuß. Allerdings waren sie oftmals schwer manchen Stellen des Fußes zu wenig flexibel.

Heute stellt man Sportschuhe überwiegend aus Kunststoffen her. Ganz unterschiedliche Kunststoffe verwendet man dabei. Da ist die Oberseite des Schuhs etwa aus Kunstleder. Kunstleder ist ein mit Polyurethan oder Polyvinylchlorid beschichteten Nylongewebe. An den beweglicheren Stellen findet sich Mesh. Mesh ist ein loses Nylon- oder Polyestervlies (bedeckt von einem netzartigen Gewebe und nach innen durch ein weiteres Gewebe geschützt), das leicht, gut verformbar ist und luftdurchlässig ist (Abb. 1).

Auch die Sohle macht man heute aus verschiedenen Kunststoffen. In den letzten Jahren besonders wichtig wurde dabei Thermoplastisches Urethan (TPU; Abb. 2). TPU findet man heute vorwiegend in der Zwischensohle. Hier findet die Dämpfung im Sportschuh statt. TPU ist sehr leicht, dämmt sehr gut und ist sehr haltbar. Es hat damit andere Kunststoffe verdrängt. Die man vorher eingesetzt hat. Auch die sogenannten Torsion Bars, die die weiche Laufsohle stabilisieren werden häufig aus TPU hergestellt. So trägt der High-Tec-Kunststoff dazu bei, dass Sportschuhe im leichter, aber dennoch immer stabiler werden.

Allerdings ist die Welt der Sportschuhe nicht ganz so heil, wie man sich das wünschen würde. Sportschuhe werden nur noch selten in Deutschland hergestellt. Meist kommen sie aus China oder anderen ost-asiatischen Ländern. Hier sind die Produktionsbedingungen nicht so gut geregelt. Teilweise arbeiten schon Jugendliche in den Fabriken und erhalten nur wenige Euro Lohn am Tag. Nur sehr wenig des Verkaufspreises in Deutschland kommt bei den Arbeitern an (Abb. 3). Auch die Vorschriften für die Reinhaltung der Umwelt werden nicht immer eingehalten, damit die Schuhe möglichst billig nach Deutschland exportiert werden können und hier manchmal schon für 20 Euro zu kaufen sind.



Abb. 1. Werbung für einen Sportschuh

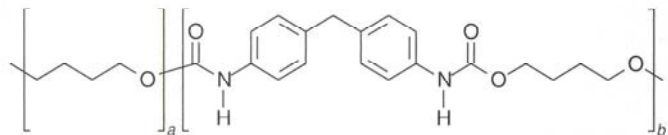


Abb. 2: Strukturformel für TPU

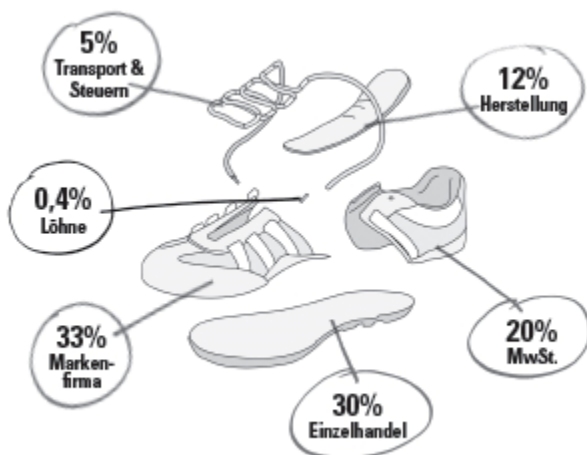


Abb. 3: Preiszusammensetzung beim Sportschuh

## Wissen und Anwenden

1. Wofür steht die Abkürzung TPU?
2. Man schätzt, dass vom Preis für einen Sportschuh aus Ostasien nur 0,4% als Lohn bei den Arbeitern verbleiben (Abb. 2). Wieviel wäre dies bei einem Schuhpreis von 79 €.
3. Ein Hobbyläufer läuft ca. 30 km in der Woche. Jeder Schritt ist etwa 1,5 m lang. Wie viele Schritte muss dann jeder Turnschuh in einem halben Jahr abfedern?
4. Nenne mindestens drei verschiedene Kunststoffe, die nicht im Text genannt werden, mit ihrem Namen und der entsprechenden Abkürzung.
5. Viele Kunststoffe tragen in ihrem Namen die Silbe „Poly“, etwa das Polyurethan im Sportschuh. Erläutere, was diese Vorsilbe bei den Kunststoffen bedeutet.
6. TPU ist ein thermoplastisches Elastomer. Erkläre Verhalten eines Elastomers und einem Thermoplasts auf der Teilchenebene.

## Planen und Untersuchen

7. Schnürsenkelösen sind entweder aus Kunststoff oder aus Metall? Beschreibe einen Versuch, mit dem man überprüfen kann, welches Material verwendet wurde.
8. Schlage einen Versuch vor, mit dem man unterscheiden kann, ob es sich bei einem Kunststoff um ein Elastomer oder ein thermoplastisches Elastomer handelt.

## Kommunizieren, Bewerten und Entscheiden

9. Abb. 1 zeigt eine Strukturformel für TPU. Erläutere, was die beiden kleinen Buchstaben a und b zu bedeuten haben.
10. Welche Aussagen bezüglich von Sportschuhen sind deiner Meinung nach richtig und sinnvoll? Begründe.
  - a. Ein Sportschuh aus Naturmaterialien ist immer besser als aus Kunststoff.
  - b. Beim Sportschuh kommt es mehr auf den Schnitt als auf die Materialien an.
  - c. Ohne moderne Kunststoffe in Sportschuh wären viele sportliche Leistungen schlechter.
  - d. Manche Kunststoffe sind Ester. Ester sind für den menschlichen Körper gefährlich.
11. Abb. 3 zeigt eine Werbung für einen Laufschuh. Was hältst Du von den folgenden Aussagen. Gib jeweils in einem Satz eine Begründung.
  - a. Die Werbung sollte angeben, welche Materialien in der Sohle verwendet wurden.
  - b. Es sollte erklärt werden, was Energiekapseln sind und wie diese wirken.
  - c. Die Nutzung von Begriffen wie *Energiekapseln* und *tecfit* macht die Werbung glaubwürdiger.
  - d. Die Werbung sollte auch angeben, wo der Schuh hergestellt wurde.
12. Sollte man Sportartikelhersteller zwingen, Angaben zu allen verwendeten Materialien zu machen, die im Sportschuh enthalten sind? Formuliere deine Position und begründe sie.

