

Papier und Kunststoff aus dem Garten



SELINA DIEHL – LIANE LUJIC – LEON SISTEK – MANUEL VOGEL

Holz und Erdöl gehören zu den bedeutendsten Rohstoffen unserer Zeit. Der weltweit stark zunehmende Bedarf an Holz- und Erdölprodukten (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, WWF) lässt sich allerdings nicht ohne ökologische Beeinträchtigungen stellen. Die Rodung des Regenwaldes sowie die Erschließung neuer konventioneller und unkonventioneller Erdölquellen stellt die Umwelt vor große Herausforderungen. Wir Menschen sind jedoch von Holz- und Erdölprodukten, aber auch von einer intakten Umwelt abhängig. Eine ökologische Alternative wird benötigt, um Alltagsgegenstände, welche auf Holz und Erdöl basieren, umweltschonend herzustellen. Drei (inzwischen ehemalige) Schüler/innen des Gymnasiums Spaichingen (S. DIEHL, L. LUJIC & L. SISTEK), haben als Forschungsprojekt an ihrer Schule sowie dem Schülerforschungszentrum Südwürttemberg (SFZ Tuttlingen) eine umweltfreundliche Möglichkeit entwickelt, um Cellulose aus Wiesengras zu isolieren. Im weiteren Verlauf dient die Cellulose als Grundlage für Papier sowie Kunststofffolien, -granulat und -würfel.

Im Folgenden werden die gewählten Verfahren, die auch als Unterrichtsgang mit Versuchen unter Einsatz eines Abzugs durchgeführt werden können, und deren Ergebnisse beschrieben. Dabei können Schüler/innen auch für die Themen nachhaltiger Entwicklung und Verbraucherbildung mit Bezug zu den KMK Standards sensibilisiert werden.

1 Motivation für das Projekt

Ein wichtiges Produkt auf Holzbasis ist Papier. Ein jährliches Produktionsvolumen von mehr als 400 Millionen Tonnen Papier weltweit (Verband Deutscher Papierfabriken) trägt substantiell zu einem jährlichen Waldflächenverlust in Höhe von 3,3 Millionen Hektar bei (Durchschnitt 2010 bis 2015, Food and Agriculture Organization of the United Nations), eine Fläche größer als Belgien (TIESBOHNENKAMP, o.J.). Dabei werden die lokale Flora und Fauna genauso wie das globale Klima erheblich beeinflusst.

Der herkömmliche Herstellungsablauf von Papier ist sehr komplex, da das Holz über verschiedene Prozessschritte, wie beispielsweise Zerkleinern, Mischen, Kochen, Aufreinigen, Verfilzen, Glätten, Pressen und Veredeln, zu fertigem Papier verarbeitet wird. Diese Vorgänge benötigen viel Energie und Wasser und laufen teilweise unter Einsatz oder Freiwerden umweltschädigender Chemikalien ab.

Ein ebenfalls für unsere Gesellschaft wichtiger Rohstoff ist Erdöl, da ein Großteil unserer Alltagsprodukte auf dessen Basis hergestellt wird. Schon seit der Industrialisierung wird das „schwarze Gold“ immer stärker gefördert und vermehrt verwendet - ebenfalls mit den hinlänglich bekannten Problemen für die Umwelt. Durch die zunehmende Erschließung unkonventioneller Erdölquellen, wie unter anderem Fracking, wird die Umwelt zusätzlich belastet. Es wird geschätzt, dass das Maximum der möglichen täglichen Erdölgewinnung demnächst erreicht sein wird (Bundeszentrale für politische Bildung).

Viele der auf Erdöl basierenden Kunststoffe sind gegen Umwelteinflüsse äußerst widerstandsfähig, bauen sich in der Natur nur

sehr langsam ab und brauchen mehrere hundert bis tausend Jahre, bis sie vollständig zersetzt sind (Fraunhofer UMSICHT, o.J.). Darüber hinaus stehen einige eingesetzte Weichmacher, zum Beispiel Phthalate, im Verdacht, umweltgefährdend und hormonwirksam zu sein (Umweltbundesamt).

Daraus folgten für das hier beschriebene Projekt drei Anforderungsbereiche, die auch im Rahmen einer Unterrichtseinheit als Motivation zu Grunde gelegt werden können:

1. Einen alternativen, umweltfreundlicheren Herstellungsprozess für Papier zu entwickeln, bei dem auf Holz als Ressource verzichtet wird.
2. Einen Kunststoff auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen herzustellen, die möglichst nicht in Konkurrenz zu Nahrungsmitteln stehen.
3. Den Kunststoff so zu gestalten, dass er nicht umweltgefährdend und möglichst gut abbaubar ist.

2 Celluloseisolierung

Cellulose ist ein so genanntes Polysaccharid. Es besteht aus einzelnen Glucosebausteinen, die durch β -1,4-glykosidische Bindungen zu einer langen Kette verknüpft sind. Zwischen den Ketten wirken Wasserstoffbrückenbindungen als zwischenmolekulare Wechselwirkungen (Abb. 1).

Unter Säureeinfluss kann die glykosidische Bindung gespalten und jeweils ein Wassermolekül zwischen den Glucosebausteinen eingebunden werden. Abhängig von der Versuchslaufzeit kann somit eine Cellulosekette als Zellwandstabilisator in kürzere Bestandteile zerlegt und diese freigesetzt werden. Zudem verringern sich unter Einfluss einer Säure die zwischenmolekularen Wechselwirkungen. Somit sind die einzelnen Celluloseketten voneinander lösbar und in kürzere Bestandteile zerlegbar.

Im Anschluss an den Zersetzungsprozess, in welchem die Cellulose aus dem Wiesengras gelöst wurde, werden mithilfe von destilliertem Wasser, die sich noch in der Lösung befindenden Säurereste ausgewaschen. Dadurch können sich die Wasser-

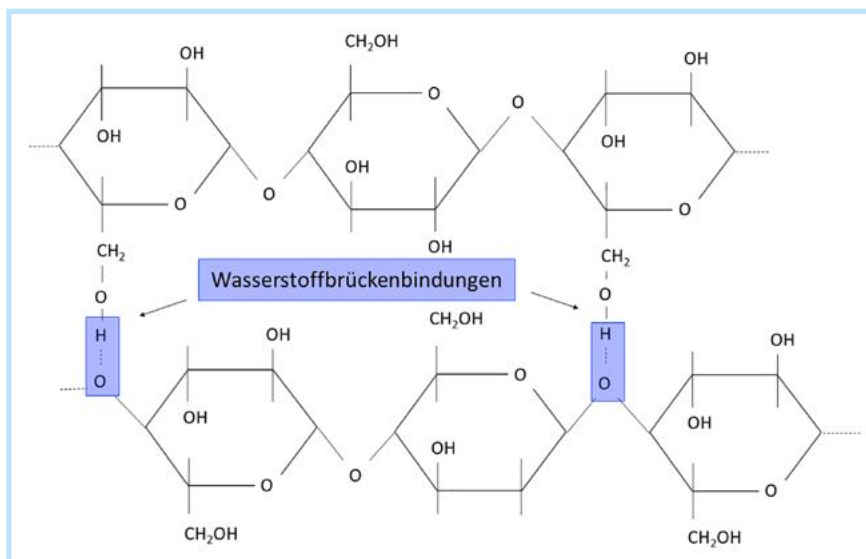


Abb. 1. Struktur der Cellulose

Qualitätsüberprüfung I: Cellulose

Um zu bestätigen, dass als erhaltenes Produkt Cellulose aus Gras isoliert wurde, kann ein Cellulosenachweis durchgeführt werden.

Versuch 2: Cellulosenachweis

Der Cellulosenachweis zeigt sich durch eine violette bis blaue Färbung des Stoffes als positiv und bestätigt, dass es sich bei unserem Endprodukt um Cellulose handelt (Abb. 3, der Nachweis wurde hier mit bereits gebleichter Cellulose durchgeführt). Somit kann die Rohcellulose nun weiterverarbeitet werden.

stoffbrücken wieder ausbilden, sodass sich die gewonnenen Fasern zur Papierbildung stabilisieren.

In unserem Verfahren nutzen wir zum Aufschluss Ameisensäure und geben Wasserstoffperoxid hinzu, um die Zerstörung der Zellwände zu beschleunigen.

Für alle im Folgenden beschriebenen Versuche stehen die zugehörigen Versuchsanleitungen mit Bildern in der Online-Ergänzung zur Verfügung.

Versuch 1: Isolierung der Cellulose aus Wiesengras

Das Ziel dieses Versuches ist es, die Cellulosefasern aus dem Ausgangsstoff (getrocknetes Wiesengras) zu isolieren. Als Ergebnis bleiben helle, ockerfarbene Fasern zurück, die sich anschließend vielseitig weiterverwenden lassen (Abb. 2).



Abb. 2. Aus Wiesengras isolierte Cellulose

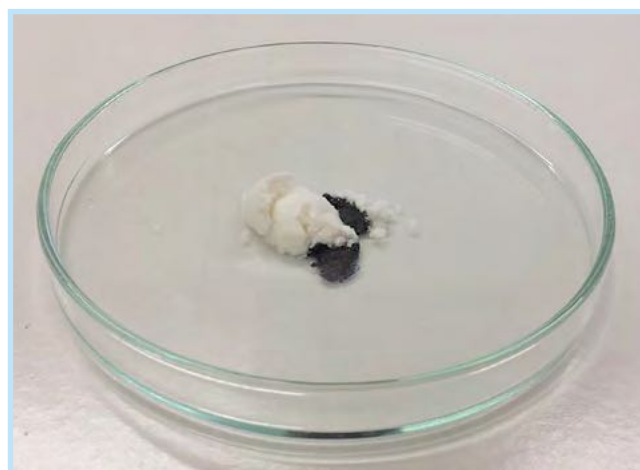


Abb. 3. Blaue Färbung der Cellulose

3 Bleichen der Cellulose

Wird die gewonnene Cellulose nicht gebleicht, können noch Reststoffe, unter anderem Lignin, an den Fasern haften. Lignin ist ein Hauptbestandteil aller verholzenden Pflanzenarten. So ist in Bäumen ein sehr großer Anteil Lignin vorzufinden. Es lagert sich in die Zellwände ein, sorgt für Verholzung (Lignifizierung) und gibt den Bäumen ihr bräunliches Aussehen sowie Stabilität. Wird Holz zu Papier weiterverarbeitet und das Lignin nicht nahezu vollständig entfernt, so ist das Papier nicht rein weiß, wird mit der Zeit braun und verliert seine Stabilität (vgl. BLUME, 2002) Daher ist ein Bleichen der Rohcellulose sinnvoll und notwendig.

Versuch 3: Cellulose bleichen

In diesem Versuch wird die Cellulose gebleicht und von Reststoffen getrennt. Als Nebeneffekt lässt sich erkennen, dass sich die Fasern voneinander gelöst haben und einzeln vorliegen. Je nach Faserlänge und Versuchsdauer findet der Bleichvorgang

mehr oder weniger stark statt. So liegt als Endprodukt ein leicht bräunlicher bis weißer Stoff vor (Abb. 4).

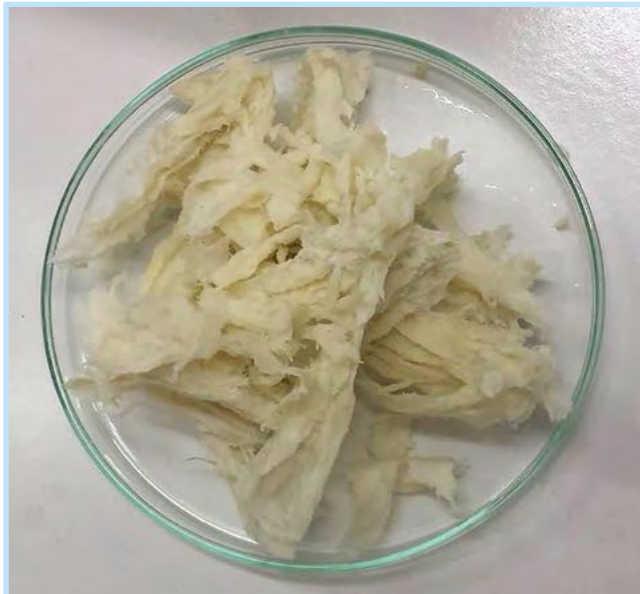


Abb. 4. Gebleichte Cellulosefasern

Qualitätsüberprüfung II: Lignin

Um sicherzustellen, dass nach dem Bleichvorgang kein Lignin in der Cellulose mehr vorhanden ist, erfolgt anschließend eine Überprüfung. Als Nachweisreagenz bietet sich hierfür Phloroglucin an.

Versuch 4: Lignin-Nachweis

Bei positivem Lignin-Nachweis entsteht eine rot-violette Färbung des untersuchten Stoffes. Das gewünschte, ligninfreie Ergebnis liegt vor, wenn keine Farbänderung entsteht.

4 Qualitätsstufen – Entwicklung eines ersten Endprodukts

Unsere Anfänge beschränkten sich auf das Pürieren und ein anschließendes Trocknen der gewonnenen, nicht gebleichten Fasern in einem Büchnertrichter. Auf dem groben Produkt konnte zwar geschrieben werden, es handelte sich allerdings nicht um einsetzbares Papier (Abb. 5)

Im nächsten Schritt haben wir die feuchten Fasern in eine Box mit Wasser gegeben und langsam trocknen lassen. Unter dem Mikroskop erkannten wir bereits eine Struktur, die der von gekauftem Papier ähnelte. Durch das in unseren ersten Ansätzen noch enthaltene Lignin und das fehlende Walzen, wie es in der Papierproduktion üblich ist, war unser Papier sehr wellig und brüchig (Abb. 6).

Erst die lange Kochdauer bei der Cellulose-Isolierung und das anschließende Bleichen ergaben hochwertigere Ergebnisse an den Fasern. Diese haben wir püriert, in einer Box gleichmäßig verteilt und dann langsam trocknen lassen. Nach dem Trocknen kann das Papier herausgenommen, nochmals leicht befeuchtet

und mit der anderen Seite nach unten erneut getrocknet werden. Dies ersetzt in einfachem Maßstab das Walzen und man erhält ein qualitativ hochwertigeres Papier (Abb. 7).



Abb. 5. Erste Papierformen im Büchnertrichter



Abb. 6. Brüchiges und welliges Papier



Abb. 7. Verwendbares, hochwertiges Papier

5 Acetylieren der Cellulose

Celluloseacetat ist einer der ältesten bekannten Biokunststoffe. Im Gegensatz zu gängigen Kunststoffen ist die Grundsubstanz der nachwachsende Rohstoff Cellulose, welcher mit Essigsäure verestert wurde. Daher kann Celluloseacetat durch

Säurespaltung auch wieder in Cellulose und Essigsäure zerlegt, also recycelt werden.

Versuch 5: Acetylierung der Cellulose

Bei der Umsetzung der Celluloseketten zu Celluloseacetat werden die freien Hydroxygruppen der Glucoseeinheiten mithilfe von Essigsäure verestert. Am Ende des Vorgangs liegt das Celluloseacetat als weißlicher, kompakter und fasriger Feststoff vor.

6 Einsatz eines Weichmachers

Celluloseacetat ist ohne Zusatz eines Weichmachers spröde, sehr schlecht verformbar und kaum elastisch. Unsere ersten Produkte brachen bereits unter geringer Druckeinwirkung. Weichmacher sind Stoffe, welche Polymere, die normalerweise spröde und brüchig sind, in ihrer Verformbarkeit verändern. Für gewöhnlich werden diese im Vergleich zu ihrer Reinform elastischer, dehnbarer und weicher. Die Funktionsweisen von Weichmachern werden noch heute intensiv diskutiert. Jedoch herrscht Einigkeit darüber, dass sich durch die Einlagerung der Weichmachermoleküle in die Polymerketten die Wechselwirkungen zwischen diesen signifikant verringern und der Kunststoff somit flexiblere Eigenschaften annimmt. In unserem Fall konnte dieser Prozess ebenso beobachtet werden.

Heute werden die meisten Kunststoffe unter dem Einsatz umweltbedenklicher Weichmacher (beispielsweise Phthalate) hergestellt. Daher haben wir eine Möglichkeit gesucht, einen flexiblen Kunststoff auf Grasbasis zu entwickeln, welcher frei von jeglichen umweltschädlichen Weichmachern ist und trotzdem ähnliche Qualitätsmerkmale aufweisen kann. Zielbringend war der Weichmacher Triethylcitrat, welcher neben seiner Funktion als Weichmacher auch in der Lebensmittelindustrie als Zusatzstoff eingesetzt wird. Als E1505 wird es etwa in der Produktion von Eiklarpulver oder Aromen verwendet und gilt als gesundheitlich unbedenklich.

Versuch 6: Einarbeiten des Weichmachers

Als Endprodukt des Versuches entstehen stabile, elastische Folien und Quader. Der Erfolg der Einlagerung des Weichmachers wird durch die Flexibilität der Endprodukte bestätigt.

7 Wirkungsgrad

Heutzutage sind Ideen und deren Umsetzung eng mit ihrem Kosten-Nutzen-Verhältnis verknüpft. In unserem Fall steht die Menge von zugeführtem Rohstoff (Gras oder Holz) der daraus produzierten Rohcellulose gegenüber. Je besser das Verhältnis zwischen dem Nutzen (beispielsweise den Einnahmen, der Umweltfreundlichkeit und dem gesellschaftlichen Ansehen) und den Kosten (u. a. im finanziellen, materiellen und zeitlichen Sinne) ist, desto mehr positive

Resonanz wird einem Projekt entgegengebracht. Ist der Wirkungsgrad eines neuen Produkts schlechter als der von bereits vermarkteten Produkten, reduziert sich die Wahrscheinlichkeit seiner Umsetzung.

Durch die Auswertung unserer Versuchsergebnisse resultiert, dass bei der Herstellung von Papier auf Grasbasis etwa 5,8 kg Wiesengras zur Gewinnung von einem Kilogramm Rohcellulose benötigt werden. Bei der konventionellen Herstellung stehen demgegenüber lediglich 2,2 kg Holz für die Produktion derselben Menge Rohcellulose (Oro Verde, Die Tropenwaldstiftung). Legt man nun die Annahmen zu Grunde, dass eine Wiese dreimal im Jahr gemäht wird und jedes Mal durchschnittlich 2 kg organische Masse pro Quadratmeter anfallen (bifa Umweltinstitut), dann ergeben sich in etwa 10,345 Tonnen Rohcellulose pro Hektar und Jahr, die in der Papier oder Kunststoffproduktion eingesetzt werden könnten. Im Vergleich beträgt bei der weit verbreiteten Baumart Fichte der Holzzuwachs je Hektar und Jahr 15,3 m³ (Schutzgemeinschaft Deutscher Wald). Mit einer durchschnittlichen Dichte von 470 kg/m³ (Oro Verde, Die Tropenwaldstiftung) ergeben sich 7,191 Tonnen Fichtenholz, woraus sich 3,269 Tonnen Rohcellulose gewinnen lassen. Daraus lässt sich schließen, dass die Papierproduktion aus Gras eine etwa dreimal höhere Effizienz im Vergleich zur Rohstoffgewinnung auf Holzbasis erreicht, wodurch die Papierproduktion auf Grasbasis eine sinnvolle Alternative darstellen kann. Die Verwendung von Wiesengras in der Papierherstellung reduziert den Ressourcenverbrauch und schützt gleichzeitig die Umwelt. Energie- und wasserintensive Prozessschritte fallen zu einem großen Teil weg, Waldflächen werden durch den Einsatz von Wiesengras geschont, und bei der Kunststoffherstellung kann die Abhängigkeit von Erdöl sowie der Einsatz von umweltschädlichen Chemikalien reduziert werden.

8 Eine Alternative? Ja.

Dass innovative, umweltfreundliche Ideen mehr gebraucht werden als je zuvor, ist schon lange kein Geheimnis mehr. Leider ist der Fortschritt in diesen Bereichen noch immer viel zu langsam. Die bereits existierenden Alternativen in jedem umweltbetreffenden Bereich werden nur sehr langsam akzeptiert und umgesetzt. So ist beispielsweise auch die Umstellung auf umweltfreundlichere Antriebsmöglichkeiten für Fahrzeuge oder erneuerbare Energien ein lang andauernder Prozess. Wir haben es geschafft, hochwertiges Papier und einen Biokunststoff auf Grasbasis in umweltfreundlicheren Herstellungsprozessen zu entwickeln, welche den Anforderungen im realen Einsatz gerecht werden können (Abb. 8).



Abb. 8. Unsere Prozessschritte

Wir, SELINA DIEHL, LIANE LUJIC und LEON SISTEK, wollten mit unserem Projekt ein Zeichen für den Umweltschutz setzen. Auch wenn es mehr ein Tropfen auf den heißen Stein ist als eine Revolution der Nachhaltigkeit, so wurde dieses Zeichen mehrfach honoriert. Wir wurden nicht nur auf zwei internationalen Messen und einer internationalen Konferenz für Nachwuchswissenschaftler jeweils mit einer Goldmedaille ausgezeichnet, sondern erhielten auch bei Jugend forscht mit dem dritten Platz und dem Sonderpreis Umwelttechnik beim Landeswettbewerb eine sehr positive Resonanz. Die große Verfügbarkeit sowie die einfache Gewinnung und Verarbeitung macht unserer Ansicht nach Gras zu einer sinnvollen Alternative zu Holz und Erdöl: Mit Gras in die Zukunft!



Literatur

bifa Umweltinstitut. https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/HUK-Dateien/3_2016/Studie_zur_Eigenkompostierung_HUK_3_2016.pdf (05.03.2019)

BLUME, R. (2002) Experiment zur Vergilbung von Papier, <http://www.chemieunterricht.de/dc2/papier/vergilben.htm>. (04.03.2019)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Internationaler-Energiemarkt/energiedaten-int-energiemarkt-50.html> (15.01.2019)

Bundeszentrale für politische Bildung. <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/globalisierung/52761/peak-oil> (21.01.2019)

Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>. (20.01.2019)

Fraunhofer UMSICHT. (o.J.). <http://www.initiative-mikroplastik.de/index.php/themen/zersetzungskinetik> (16.01.2019)

Oro Verde. Die Tropenwaldstiftung. https://www.regenwaldschuetzen.org/fileadmin/user_upload/pdf/Projekt/Weil-wir/Papier/weil-wir-es-wert-sind-wie-viel-in-baeumen.pdf (01.11.2019)

Schutzgemeinschaft Deutscher Wald. <https://www.sdw.de/waldwissen/wald-in-deutschland/holzvorrat/index.html> (01.11.2019)

TIESBOHNENKAMP, W. (o.J.). <https://www.laenderdaten.de/geographie/flaeche.aspx> (16.01.2019)

Umweltbundesamt. „Phthalate – Die nützlichen Weichmacher mit den unerwünschten Eigenschaften“.

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3540.pdf> (21.01.2019)

WWF. <http://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/papierverbrauch/zahlen-und-fakten/> (04.03.2019)

SELINA DIEHL war während ihrer Schulzeit in verschiedenen Forschungsprojekten aktiv, mit denen sie an zahlreichen nationalen und internationalen Wettbewerben erfolgreich teilnahm. Zusätzlich engagierte sie sich als Mentorin in der schulinternen Arbeitsgemeinschaft „Forschen und Erfinden“. Sie erhielt ihr Abitur 2017 am Gymnasium Spaichingen und startete im Anschluss an einen „weltwärts“ Freiwilligendienst ihr Studium in Media Management.

LIANE LUJIC war während ihrer Schulzeit ebenfalls Mentorin in der Arbeitsgemeinschaft „Forschen und Erfinden“ am Gymnasium Spaichingen. Durch diese kam sie selbst zum Forschen und nahm mit ihrer Projektgruppe an zahlreichen nationalen und internationalen Wettbewerben erfolgreich teil. Nachdem sie ihr Abitur 2018 abschloss absolvierte sie ein FSJ an einer Grundschule und startete 2019 ihr Lehramtsstudium.

LEON SISTEK engagierte sich vor seinem Abitur 2017 als Mentor in der Arbeitsgemeinschaft „Forschen und Erfinden“ am Gymnasium Spaichingen. Er war während seiner Schulzeit über fünf Jahre hinweg an verschiedenen Forschungsprojekten beteiligt und nahm mit diesen an nationalen und internationalen Wettbewerben erfolgreich teil. Nach seinem Abitur 2017 startete er sein Studium in Wirtschaftsingenieurwesen.

MANUEL VOGEL, manuel.vogel@sfz-bw.de, betreute das Team der drei Schüler/innen. Kontaktadresse: SFZ Tuttlingen, Weimarstr. 63, 78532 Tuttlingen Er ist im Leitungsteam des SFZ Tuttlingen und betreut Projekte in den Bereichen Chemie und Technik.

Besonderer Dank gilt EVA SCHNEIDER und HENDRIK SCHWARZ, die als Lehrkräfte am Gymnasium Spaichingen die Schüler/innen in deren Forschungsprojekten im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft „Forschen und Erfinden“ begleitet und unterstützt haben.

Hinweis

Die in diesem Beitrag beschriebenen Experimentieranleitungen wurden sorgfältig erarbeitet. Dennoch können weder die Autor/innen noch die Herausgeber/innen für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen eine Haftung übernehmen; auch Druckfehler können nicht immer ausgeschlossen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass beim Experimentieren grundsätzlich ein Kittel und eine Schutzbrille zu tragen sind, auch wenn dies in Versuchsvorschriften nicht immer explizit erwähnt wird. Außerdem ist zu beachten, dass vor Versuchsdurchführungen in der Schule eine Gefährdungsbeurteilung unter Beachtung der örtlichen Gegebenheiten durchzuführen ist. ■