

IJSO 2025 – Papperlapapp!

Begleitheft für Betreuende

Zusammengestellt von

Melanie Hänel
PD Dr. Heide Peters

IPN — Leibniz-Institut für die Pädagogik der
Naturwissenschaften und Mathematik

Hinweis

Die Zusammenstellung im Begleitheft versteht sich nicht als eigenständiger Autorenbeitrag.

Um Ihnen den Einstieg in die Themen der einzelnen Versuche zu erleichtern, wurde hier ein Zusammenschnitt von Rechercheergebnissen erstellt. Dabei beginnen die Kapitel zu den einzelnen Versuchen jeweils mit Informationen, die für die Durchführung der Experimente hilfreich sind. Zu jedem Versuch gibt es außerdem weiterführende Informationen für betreuende Lehrkräfte. Am Schluss stehen noch einige Ideen für weitere Fragestellungen.

Einige Textanteile sind, geringfügig umformuliert, aus verschiedenen im Verzeichnis angegebenen Quellen übernommen worden.

Die Begleitmaterialien werden Ihnen zum persönlichen Gebrauch im Rahmen der Wettbewerbsbetreuung in der Internationalen JuniorScienceOlympiade zur Verfügung gestellt.

Hinweis: Alle im Text angegebenen Links wurden am 21.10.2024 auf ihre Aktualität geprüft.

Inhalte

Teil A	Förderkonzepte und Tipps zur Wettbewerbsarbeit	04
A1	Allgemeine Hinweise für Wettbewerbsbetreuende	04
A1.1	MINT-Schülerwettbewerbe – den Einstieg leicht gemacht	05
A1.2	Wettbewerbsarbeit in der IJSO	07
Teil B	Durchführung der Experimente und theoretische Grundlagen	09
B1	Einführung und Materialliste	09
B1.1	Lernziele	09
B1.2	Materialliste	10
B2	Beschaffung und praktische Hinweise	11
B2.1	Experimente 1.1 & 1.2 – Papier ist nicht gleich Papier! Hinweise zum Material und Experimentieren	11
B2.2	Experimente 2.1, 2.2 & 2.3 – Frisch gestärkt Hinweise zum Material und Experimentieren	12
B2.3	Experiment 3 – Die Welle macht's Hinweise zum Material und Vorgehen Tipps zum Bau der Brücken Tipps zu den Belastungstests	14
B3	Theoretische Grundlagen	16
B3.1	Experimente 1.1 & 1.2 – Papier ist nicht gleich Papier! Papier- eine zweitausend Jahre alte Erfindung Die Papierherstellung Exkurs: Hygienepapiere in Rohrleitungen Recyclingpapier – ökologisch deutlich vorteilhaft	16
B3.2	Experimente 2.1, 2.2 & 2.3 – Frisch gestärkt Stärke Iod-Stärke-Nachweis Lugolsche Lösung versus Betaisodona®-Lösung Geldscheine und Prüfung auf Echtheit Cellulose Cellulose und Stärke im Vergleich Cellulose und Stärke in Pflanzen	21
B3.3	Experiment 3 – Die Welle macht's Wellpappe Über die Wellenform Exkurs: Bögen in der Architektur	24
Teil C	Forscherfragen und Projektarbeit	27
Teil D	Quellennachweis	30
D1	Literatur	30
D2	Linksammlung	30
D3	Bildnachweise	32

A1 Allgemeine Hinweise für Wettbewerbsbetreuende

Eine Wettbewerbsteilnahme ist eine Chance für alle: Für die Teilnehmenden, neue Felder zu entdecken und mit den Herausforderungen und Erfolgen zu wachsen; für die Betreuenden, ihre Schülerinnen und Schüler in diesem Prozess begleiten zu dürfen und Anregungen für den naturwissenschaftlichen Unterricht zu bekommen. Und diese Chance sollte jedem offenstehen. Auch wenn für einige das Ergebnis sein sollte, nicht erneut am Wettbewerb teilnehmen zu wollen, würde eine solche Entscheidung auf einer konkreten Erfahrung fußen und hätte damit ihren eigenen Wert, wenn es darum geht, sich zu orientieren und die eigenen Stärken und Vorlieben zu entdecken.

Aus diesem Grund plädieren wir immer dafür, eine Wettbewerbsteilnahme in der IJSO mit der ganzen Klasse oder einem Kurs durchzuführen und für ein nachhaltiges Förderkonzept möglichst früh mit der Wettbewerbsarbeit zu beginnen. Forschung heute wird in Teams geleistet. Deshalb zählt in der IJSO nicht nur Einzelleistung, sondern es gibt auch Gelegenheit zur Teamarbeit.

Das betrifft auch die Betreuungsarbeit. Suchen Sie sich Kolleginnen und Kollegen aus Biologie, Chemie oder Physik und regen eine gemeinsame Wettbewerbsarbeit an. Sorgen Sie dafür, dass der Wettbewerb einen festen Ort an Ihrer Schule und im Curriculum findet. Dann werden automatisch die Kolleginnen und Kollegen, die in diesem Jahrgang unterrichten, in die Pflicht genommen und die Lasten verteilen sich auf mehrere Schultern. Sind Sie stärker an einer systematischen Implementierung der Wettbewerbsarbeit in Unterricht und Schule interessiert, informieren Sie sich doch auf unserer Website zur Initiative „NaWigator in der IJSO“.

Als Aufgabenwettbewerb sind die Antwortformate, auch aus Gründen der Bewertung, eher geschlossen. Dennoch ist ein zentrales Element in der IJSO forschendes Lernen, verbunden mit dem Anliegen mit unseren Aufgaben dazu zu inspirieren, eigene Fragen zu stellen, weiter zu recherchieren und ggf. in eigenen Projekten zu vertiefen. Genau deshalb ermutigen wir in der Aufgabe „Noch Fragen offen?“ die Schülerinnen und Schüler aus ihrer eigenen Arbeit an den Wettbewerbsaufgaben heraus weitere „Forschungsfragen“ zu entwickeln. Der Weg in der IJSO erfordert ein hohes Maß an selbstständigem Arbeiten, soll aber auch ermuntern, sich den Rat von Expertinnen und Experten zu holen, wenn man an eine Grenze stößt. Unser Angebot versteht sich damit auch als Türöffner auf dem Weg zur Vernetzung mit anderen Förder- und Lernangeboten im MINT-Bereich.

Das vorliegende Begleitheft soll Sie in Ihrer Wettbewerbsarbeit unterstützen. (i) Betreuen Sie erstmals in einem Schülerwettbewerb finden Sie in *Teil A* eine Reihe praktischer Tipps zum Einstieg, insbesondere auch zu Förderstrategien und zur Einbindung der Wettbewerbsarbeit in den Unterricht. (ii) Wettbewerbserfahrene können diesen Teil überspringen und finden in *Teil B* zunächst zu jedem Experiment Hinweise zur Beschaffung von Materialien und zur Durchführung. Dann folgen Abschnitte mit Hintergrundwissen und Anregungen zur Vertiefung für diejenigen, deren Wissensdurst noch nicht gestillt ist. In *Teil C* gibt es Anregungen zu Forscherfragen und Projektarbeiten.

A1.1 MINT-Schülerwettbewerbe – den Einstieg leichtgemacht

Das Angebot an Schülerwettbewerben in den Naturwissenschaften ist bunt und vielfältig, eine didaktische Nische für Nachwuchsförderung und berufliche Orientierung. Wie aber entscheide ich mich als Lehrkraft für den geeigneten Wettbewerb?

Bevor Sie die Büchse der Pandora öffnen, widmen Sie sich der Frage, was Sie mit einer Wettbewerbsteilnahme erreichen wollen: Für Abwechslung im Unterricht sorgen? Für Naturwissenschaften interessieren und begeistern? Schülerinnen und Schüler mit Potenzial fördern? Reizt das sportliche Kräftermessen oder geht es um fachliche Expertise und forschendes Lernen? Soll der Klassenverband durch Teamarbeit gestärkt werden? Je präziser Sie Ihr Förderkonzept fassen können, umso leichter wird Ihnen später die Auswahl fallen.

Wie entscheide ich mich für einen Wettbewerb?

Sichten Sie das Portal des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Stichwort „Jugendwettbewerbe“ und recherchieren Sie unter „Begabtenförderung“ oder „Schülerwettbewerbe“ auf den Bildungsservern der Länder. Suchen Sie im Begabungslotsen-Portal oder beim Deutschen Bildungsserver. Die Arbeitsgemeinschaft bundesweiter Schülerwettbewerbe hat Qualitätsstandards entwickelt, zu deren Einhaltung sich ihre Mitglieds Wettbewerbe verpflichten. Die KMK hat „Qualitätskriterien für Schülerwettbewerbe“ beschlossen und führt eine Liste von Wettbewerben, die sie als empfehlenswert einstuft. Prüfen Sie die Passung Ihres Förderkonzepts mit dem Profil des Wettbewerbs. Checken Sie, ob das Wettbewerbsangebot die Qualitätskriterien erfüllt. Welche Leistungen verlangt der Wettbewerb den Jugendlichen, aber auch Ihnen ab? Stehen Wettbewerbsfristen in Konflikt mit wichtigen schulischen Terminen? Schätzen Sie Betreuungsaufwand und benötigte Ressourcen realistisch ab. Entscheiden Sie sich für den Wettbewerb, der Sie persönlich begeistert. Dann ist die Chance groß, dass der Funke auf die Beteiligten überspringen wird.

Wie werbe ich für eine Teilnahme?

Die Initiative liegt bei Ihnen, nur plakatieren reicht nicht. Stellen Sie den Wettbewerb im Unterricht vor. Oder noch besser: Lassen Sie Wettbewerbsteilnehmende von ihren Erfahrungen berichten. Teilen Sie in einem Elternbrief mit, dass Sie das Kind mit einem Zusatzangebot fördern möchten. Berichten Sie beim Elternabend. Führen Sie auf der Homepage der Schule eine Rubrik mit allgemeinen Informationen zu Wettbewerbsangeboten ein. Informieren Sie regelmäßig über aktuelle Teilnahmen und Wettbewerbs-erfolge.

Beginnen Sie früh mit der Wettbewerbsarbeit. Bahnen Sie Wettbewerbsteilnahmen an, indem Sie Wettbewerbsaufgaben aus den Vorjahren in Ihr Unterrichtsangebot aufnehmen. Grundschulkinder, die an die weiterführende Schule wechseln, sind begeisterungsfähig. Nutzen Sie diesen Elan im Sinne einer nachhaltigen Förderung. Stimmen Sie die Kinder und Jugendlichen vor Beginn auf erfüllbare Erwartungen ein. Vermitteln Sie, dass Durchhalten und Einreichen einer Ausarbeitung zählen und für sich genommen schon ein großartiger Erfolg sind.

Wie unterstütze ich?

Beschränken Sie sich auf Hilfe zur Selbsthilfe. Für eine positive Attribuierung ihrer Erfolge sollten Teilnehmende sich als autonom und selbstwirksam erleben. Einige Wettbewerbe bieten Materialien für Wettbewerbsbetreuende oder auch eigens Fortbildungen an.

Wettbewerbe verlangen häufig ein Engagement über Wochen, manchmal Monate. Unterstützen Sie Ihre Teilnehmenden, indem Sie den Zeitraum mit Etappenzielen strukturieren. Bekunden Sie Interesse am Fortgang der Arbeit und fordern Sie ein, dass Ergebnisse unmittelbar notiert und „zu Papier gebracht“ werden.

Wettbewerbsarbeit im Unterricht?

Entlasten Sie sich und die Teilnehmenden, indem Sie Wettbewerbsteilnahmen zum festen Bestandteil von Unterricht und schulischem Leben machen. Lassen Sie Experimente im Fachunterricht durchführen, geben Sie Recherche und Dokumentation portioniert als Hausaufgabe. Öffnen Sie im Nachmittagsangebot Räume für Wettbewerbsarbeit in Kleingruppen. Definieren Sie Teile des Wettbewerbs als verbindliche Unterrichtsleistung, die in die Note eingeht. Wer mehr will, kann mehr tun. Wettbewerbs-erfolge können mit einem Zeugniseintrag gewürdigt werden. Vernetzen Sie sich im Kollegium und bauen Sie ein nachhaltiges Wettbewerbskonzept über alle Klassenstufen auf.

Tipps für den Anfang

Beginnen Sie mit einer kleinen Schülergruppe. Hängen Sie die Erwartungen nicht zu hoch. Alle müssen sich erst mit den Abläufen vertraut machen. Binden Sie erfahrene Schülerinnen und Schüler und ehemalige Teilnehmende in die Betreuung ein. Evaluieren Sie die Arbeit und stecken Sie neue Ziele – und geben Sie jedem Wettbewerb, bevor Sie ihn abschreiben, mindestens eine zweite Chance!

Wie wähle ich einen geeigneten Wettbewerb aus?

1. Klären Sie zunächst eigene Ziele/Förderkonzepte, die Sie mit einer Wettbewerbsteilnahme verfolgen.
2. Verschaffen Sie sich einen Überblick über Wettbewerbsangebote und prüfen Sie die Qualität.
3. Sortieren Sie einmalige Wettbewerbsangebote aus. Sie eignen sich in der Regel nicht für den Aufbau eines nachhaltigen Förderkonzepts.
4. Treffen Sie eine Vorauswahl und fragen Sie im Kollegenkreis nach, wo es bereits Erfahrungen mit den ausgewählten Wettbewerben gibt.
5. Informieren Sie sich auf der Webseite des Organisators, wie die Passung zwischen dem Wettbewerbsprofil und Ihren Förderzielen ist. Wenden Sie sich mit Fragen ggf. direkt an die Wettbewerbsorganisatoren.
6. Verschaffen Sie sich einen Überblick, was von den Teilnehmenden und von Ihnen an Leistungen erwartet wird, und treffen Sie anschließend Ihre Wahl.

Quelle [nach H. Peters & B. Sieve (2013): Fordern und Fördern mit Wettbewerben. NiU Chemie, 136, 24, S. 8.]

Qualitätskriterien Schülerwettbewerbe

Gute Schülerwettbewerbe

- fördern die persönliche Entwicklung der Schülerinnen und Schüler
- unterstützen besondere Begabungen
- motivieren Schülerinnen und Schüler, aber auch Lehrkräfte zu zusätzlichem Engagement
- beinhalten Unterstützungssysteme für die Teilnehmenden
- weisen ein pädagogisch und wissenschaftlich begründetes Konzept aus, das von Experten begleitet wird
- haben eine Jury, die in der Beurteilung transparent ist
- geben Anregungen über den Wettbewerb hinaus
- fördern Schülerinnen und Schüler nachhaltig, indem sie langfristig motivieren
- liefern auch den Schulen und den Lehrkräften Impulse für die Unterrichtsgestaltung durch die Einbindung des Wettbewerbs bzw. der Wettbewerbsinhalte in den Unterricht
- fördern vor allem gesellschaftlich bedeutsame Leistungen
- sorgen für öffentliche Anerkennung
- unterstützen und motivieren die Teilnehmenden in ihrer Wettbewerbsleistung mit angemessenen Auszeichnungen oder Preisen
- beachten die Grundregeln des Datenschutzes

Quelle: [nach Arbeitsgemeinschaft bundesweiter Schüler- wettbewerbe www.bundeswettbewerbe.de/fileadmin/user_upload/agbsw-guteSchuelerwettbewerbe.pdf [Stand: 27.1.2017] und Greiffenstein, J. v. (2007) Wettbe- werbe in Konkurrenz. Klett-Themendienst 38(5/2007), S. 7]

Peters, H. (2017) MINT-Schülerwettbewerbe – den Einstieg leichtgemacht. MINT Zirkel, Juni 2017, 11, Klett MINT GmbH.

A1.2 Wettbewerbsarbeit in der IJSO

Teilnahmebedingungen und Registrierung

Am Auswahlwettbewerb zur IJSO 2025 teilnehmen kann, wer eine allgemein- oder berufsbildende deutsche Schule besucht und nach dem 31. Dezember 2009 geboren ist (Geburtsjahr 2010 oder jünger). Wer im Rahmen einer Arbeitsgemeinschaft oder im Klassen- bzw. Jahrgangsverband an der IJSO teilnimmt und vor dem 1. Januar 2010 geboren ist, kann maximal an den ersten drei Wettbewerbsrunden, nicht jedoch am Bundesfinale teilnehmen.

Die Aufgaben der ersten Runde sind von den Teilnehmenden eigenverantwortlich ohne fremde Hilfe zu lösen. Die Experimente dürfen nur in Gegenwart eines Erwachsenen durchgeführt werden. Dabei ist auf die Einhaltung gängiger Sicherheitsmaßnahmen und das Tragen angemessener Schutzkleidung zu achten.

Gemeinschaftslösungen von Teilnehmenden sind in der ersten Runde zulässig. Die Gruppenstärke darf maximal drei Personen umfassen. Die Namen der am Team beteiligten Schülerinnen und Schüler müssen auf der Ausarbeitung für die Lehrkraft kenntlich gemacht werden. Alle Teilnehmenden einer Gruppe erhalten dieselbe Punktzahl, werden hingegen nicht im Portal miteinander verknüpft. Jeder Teilnehmende, also auch jedes Gruppenmitglied, muss sich einzeln im Portal registrieren und zur IJSO anmelden. Dafür benötigt jeder Teilnehmende eine eigene gültige E-Mail-Adresse. Registrierung und Anmeldung können nur mit Zustimmung der Erziehungsberechtigten gemeinsam mit den Teilnehmenden vorgenommen werden. Hierfür bedarf es der E-Mail-Adresse eines Erziehungsberechtigten.

Hinweise zur Betreuung und Musterlösung

Mit Ihrer Anmeldung zur IJSO als betreuende Lehrkraft sollten Sie im Portal Zugang zum Begleitheft für Betreuende sowie zur Musterlösung zur Aufgabenrunde erhalten. Falls nicht, wenden Sie sich direkt an die Bundesgeschäftsstelle der IJSO. Die Musterlösung mit Erwartungshorizont wird bereits zum Wettbewerbsstart freigeschaltet, damit Sie schon während der Schülerbetreuungsphase abschätzen können, in welcher Tiefe wir eine Beantwortung der Frage erwarten, und Sie Ihre Teilnehmenden ansprechen können, falls sie beispielsweise die Zielrichtung einer Fragestellung missverstanden haben sollten.

Die Aufgaben der ersten Runde sind so angelegt, dass sie in einem Zeitraum von drei Wochen vollständig bearbeitet werden können. Das gibt Ihnen die Möglichkeit, im Zeitfenster von November bis Mitte Januar entsprechend der Abläufe in Ihrem Schuljahr mit Ihren Teilnehmenden flexibel einen verbindlichen Start- und Abgabetermin festzulegen. Planen Sie dabei ausreichend Zeit für die Bewertung der Ausarbeitungen und die Übermittlung der Bewertungsergebnisse ein.

Die Ausarbeitungen sind bis zum 15. Januar 2025 bei Ihnen als betreuende Lehrkraft einzureichen.

Bewertung und Übermittlung der Ergebnisse

Die Musterlösung mit Erwartungshorizont und Bewertungsschlüssel unterstützt Sie bei der Bewertung der eingereichten Ausarbeitungen Ihrer Schülerinnen und Schüler. Die Bewertungseingabe im Portal nehmen Sie bitte bis zum 31. Januar 2025 vor.

Bevor Sie mit der Eintragung Ihrer Bewertungsergebnisse beginnen, prüfen Sie bitte, ob alle Ihre Teilnehmenden korrekt Ihrem Profil zugeordnet sind. Sollten Sie Fehler in der Zuordnung entdecken, setzen Sie sich bitte umgehend über eine Nachricht an sekretariat@ijso.info mit uns in Verbindung. Zum Abschluss der Wettbewerbsrunde werden alle Wettbewerbsteilnehmenden im Februar informiert und können im Portal einsehen, ob sie in die zweite Runde aufgestiegen sind.

Alle Wettbewerbsbetreuenden werden regelmäßig mit Rundmails über Termine und weitere Abläufe der Wettbewerbsrunden sowie die Erfolge ihrer Wettbewerbsteilnehmenden informiert. Wichtige Informationen und Wettbewerbsmaterialien auch früherer Wettbewerbsjahre finden sie unter www.ijso.info.

Wie viel Unterstützung darf ich geben?

Anders als bei Schul- oder Hausarbeiten sind die Aufgaben so konzipiert, dass Inhalte und Konzepte berührt werden, die bisher nicht im Unterricht behandelt wurden und eigenständige Recherche verlangen. Auch erwarten wir nicht, dass Teilnehmende alle Aufgaben vollständig werden lösen können.

Wir werden immer wieder von Betreuenden gefragt, wie viel Unterstützung sie in der Aufgabenrunde geben dürfen. Aus unserer Sicht dürfen Sie gern Teilnehmende auf Literatur oder andere Quellen hinweisen, die ihnen den Zugang für eine eigenständige Recherche zu bestimmten Themenbereichen oder Konzepten erleichtern, vor allem auch, wenn sie den Schülerinnen und Schülern aus dem Schulunterricht noch nicht bekannt sind. Allerdings sollten Sie davon Abstand nehmen, Teilnehmende gezielt darauf hinzuweisen, wenn Teile ihrer Ausarbeitungen fehlerhaft sind, oder ihnen Lösungsansätze selbst vorzuschlagen.

Auf unserer Internetseite finden Sie unter *Material > Aktuelle Aufgaben* das Begleitheft für (vor allem jüngere) Teilnehmer:innen, welches wir als zusätzliche methodische Hilfestellung zu den Bereichen 'Fachtexte lesen', 'Skizze oder Zeichnung', 'Experimentieren', 'Messung und Messfehler' sowie 'Koordinatensystem' konzipiert haben.

Betreuen Sie Wettbewerbsneulinge oder Kinder in der Altersgruppe bis 12 Jahre, ist unter Umständen zu überlegen, ob man die Bearbeitung auf eine altersangemessene Auswahl von Teilaufgaben begrenzt. Auch diese lohnt es sich, einzureichen; denn einerseits ist ein Aufsteigen in die zweite Runde von den Punkten her durchaus möglich und andererseits werden die jüngsten Teilnehmenden in unserem Junior-Ranking noch einmal gesondert bewertet. Dadurch haben sie die Chance, an den Junior-Forschertagen teilzunehmen oder einen Sachpreis zu gewinnen.

Wir freuen uns, wenn Sie uns berichten, welche Erfahrungen Sie mit der Betreuung Ihrer Schülerinnen und Schüler in der IJSO gesammelt haben. Für Fragen stehen wir gern zur Verfügung.

Viel Spaß und Erfolg wünscht

Ihr IJSO-Team am IPN Kiel

B1 Einführung und Materialliste

B1.1 Lernziele

Die Aufgaben zur ersten Runde sollen anregen, sich intensiv und umfassend mit dem Thema Papier und Pappe auseinanderzusetzen. In der ersten Aufgabe beschäftigen wir uns zunächst mit der Vielfalt des Werkstoffes Papier, denn „Papier ist nicht gleich Papier!“. In den Teilerperimenten 1.1. und 1.2 untersuchen wir verschiedene Eigenschaften von ausgewählten Papier-Arten: 80 g-Papier, Küchenrolle, Papiertaschentücher und Toilettenpapier. Natürlich kennen alle Teilnehmenden diese und noch viele andere Papier-Arten aus dem Alltag. Wir zielen hier im Rahmen des Basiskonzepts Struktur-Eigenschaftsbeziehungen auf die Erkenntnis, dass ausgehend vom gleichen Hauptbestandteil – den Cellulosefasern – die Eigenschaften der Papier-Arten durch (industrielle) Aufbereitung bewusst angepasst werden können. Als Beispiel kommen die Nassfestmittel ins Spiel, die die Produkteigenschaften im Sinne der Produktanwendung maßgeblich verändern. Andere Stoffe, die bei der Papierherstellung zum Einsatz kommen, sind Stärke sowie Leime/Harze: In den Teilerperimenten 2.1, 2.2 und 2.3 untersuchen wir die Beschreibbarkeit dreier Papiere, wir führen den Iod-Stärke-Nachweis durch und übertragen unsere Erkenntnisse schließlich auf einfache Geldscheinprüfstifte. Zur Erklärung werfen wir einen Blick auf die Molekülstrukturen von Cellulose und Amylose (als Bestandteil von Stärke, didaktische Reduktion), deren unterschiedliche Funktion in Pflanzen wir im biologischen Teilbereich dieser Aufgabe ergründen. Vom Papier kommen wir in Aufgabe 3 nun zur Wellpappe. Wir legen den Fokus auf die Statik (Mechanik) und interessieren uns für die besonders stabile Form der Wellen, die wir zunächst vereinfachen auf Zacken. Im Experiment führen wir Belastungstests von gefalteten Brücken durch. Wir analysieren die Kräfteverteilung und betrachten diese näher im Kontext von Bögen in der Architektur.

Mit der bereits gewohnten Formulierung von weiteren Forscherfragen wird dazu angeregt, die gewonnenen Erkenntnisse weiterzudenken und vielleicht in die eigene Lebenswelt zu transferieren.

Über die hier formulierten Lernziele hinaus sollen die Aufgaben dafür sensibilisieren, die Relevanz von Papier – das auch mit der Digitalisierung nicht aus all unseren Lebensbereichen wegzudenken ist – zu erkennen und ihren Einfluss innerhalb chemischer, physikalischer und biologischer Kontexte in unserem Alltag zu erfahren.

Konkret erwerben die Schülerinnen und Schüler folgende Fähigkeiten und Kenntnisse:

- Sie lernen naturwissenschaftliche Arbeitsweisen kennen und trainieren sie.
 - Dabei lernen sie, wie sie
 - einen Versuch planen, aufbauen und sorgfältig durchführen.
 - (quantitative) Messungen exakt durchführen.
 - genau beobachten und die Ergebnisse kurz, präzise und übersichtlich – insbesondere auch mit Fotos dokumentiert – darstellen.
 - Messdaten korrekt und übersichtlich notieren.
 - Beobachtungen und Messdaten objektiv auswerten, angemessen erklären und kritisch beurteilen.
 - Beobachtungen/Ergebnisse und Schlussfolgerungen unterscheiden.
 - systematische Fehler erkennen und die Genauigkeit/Zuverlässigkeit eines Messverfahrens abschätzen.
- Sie lernen, dass verschiedene Papier-Arten aus Cellulosefasern aufgebaut sind, denen je nach Verwendungszweck weitere Stoffe hinzugefügt werden und deren Struktur/Form angepasst wird.
- Sie lernen, dass die Verwendung von Materialien auf deren Eigenschaften basiert, die wiederum durch die Art und Wechselwirkungen zwischen den Teilchen begründet werden (Struktur-Eigenschafts-Konzept).
- Sie lernen, dass der Iod-Stärke-Nachweis als Stoffnachweis von Stärke durchgeführt werden kann.
- Sie beschreiben die unterschiedliche Funktion von Cellulose und Stärke in Pflanzen.
- Sie lernen, dass Wellenformen einen statischen Vorteil gegenüber geraden Formen aufweisen.
- Sie begründen die Stabilität gewellter Formen und Konstruktionen durch die Kräfteverteilung.

B1.2 Materialliste

Die Experimente sind so ausgelegt, dass die meisten Materialien in einem Haushalt verfügbar, in einem Supermarkt zu beschaffen sind oder an Schulen in den Sammlungen der Fachschaft Naturwissenschaften vorhanden sein sollten:

Für die Experimente werden benötigt:

Experiment 1: 2 Bögen Papier (normales 80 g-Papier, DIN A4), 2 Blätter Küchenrolle, 2 Papiertaschentücher, 4 Blätter Toilettenpapier, Taschenlampe, Leitungswasser, 4 Gläser, 4 Löffel, Zeitmesser

Experiment 2: 1 Bogen weißes Frischfaserpapier, 1 Bogen Recyclingpapier, 1 Blatt Küchenrolle, Tintenfüller, Wattestäbchen, Betaisodona®-Lösung oder Lugolsche Lösung, 1 Fünf- oder Zehn-Euro-Echtgeldschein, 1 Spielgeldschein oder selbst gemalter Geldschein, Geldscheinprüfstift

Experiment 3: 18 Bögen Papier (normales 80 g-Papier, DIN A4), Schere, Bleistift, großes Lineal, Flüssigkleber für Papier, 2 gleichhohe Objekte als Brückenpfeiler (z. B. Bücher, Tische, Kisten...), unterschiedlich schwere Objekte (z. B. Bücher, Kartoffeln...), Waage

B2 Beschaffung und praktische Hinweise

B2.1 Experimente 1.1 & 1.2 – Papier ist nicht gleich Papier!

In den Experimenten 1.1 und 1.2 werden verschiedene Papier-Arten auf ihre Eigenschaften untersucht. Es wird ein Bezug hergestellt zur industriellen Herstellung und dem Verwendungszweck der Papier-Arten.

Hinweise zum Material und Experimentieren

Es wurden verschiedene handelsübliche Produkte für 80 g-Papier, Küchenrolle, Papiertaschentücher sowie Toilettenpapier getestet, die alle die hier zu untersuchenden Eigenschaften gleichermaßen oder zumindest sehr ähnlich aufweisen. Es können entweder Frischfaser- oder Recyclingprodukte genommen werden. Um Papier zu sparen, können beim 80 g-Papier auch Fehldrucke/Schmierpapiere genutzt werden.

Jeder kennt die Papier-Arten aus Experiment 1.1 aus dem Alltag und hat sie täglich in Händen. Doch nun kommt es darauf an, die Papiere bewusst und ganz genau zu untersuchen. Bei der Oberflächenstruktur befühlt man einerseits, wie glatt oder rau, gleich- oder ungleichmäßig, weich oder hart die Papiere sind. Andererseits ist von Interesse, ob und wie die Papiere perforiert sind. Beim Untersuchen der Transparenz ist zu berücksichtigen, ob die jeweilige Papier-Art mehrschichtig ist: Bei der Küchenrolle, beim Papiertaschentuch und bei mehrlagigem Toilettenpapier sollte immer nur eine einzelne Lage durchleuchtet werden. Im nächsten Schritt erfolgt das Zerreißen der Papiere in Längs- und Querrichtung wieder mit den Papieren in ihrer mehrschichtigen Form.



*Abbildung B2.1: Zerreißprobe
(von links nach rechts: 80 g-Papier, Küchenrolle, Papiertaschentuch, Toilettenpapier)*

Die Gläser in Experiment 1.2 sollten von ihrer Größe so gewählt werden, dass die zusammengeknüllten Papiere vollständig mit Wasser bedeckt sind und dass man gut darin umrühren kann. 0,3 L- und 0,4 L-Gläser eignen sich sehr gut. Es lässt sich ganz einfach mit kaltem Leitungswasser arbeiten; eine bestimmte Temperatur ist für die Versuchsergebnisse nicht relevant.

Die Zeitangaben in diesem Telexperiment können als Richtwerte verstanden werden. Wichtig ist, dass in regelmäßigen Abständen gerührt wird und die Papiere nach circa einer Stunde im Wasser untersucht werden (für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse). Bei deutlich längerer Zeit im Wasser ändert sich an der Beschaffenheit der Küchenrolle und des Papiertaschentuchs nichts. Das Zersetzen vom 80 g-Papier und Toilettenpapier würde sich indes verstärken. Interessehalber wäre es insofern denkbar, das Experiment nach dem Untersuchen der Papiere und dem Notieren der Beobachtungen weiterlaufen zu lassen – die mehr und mehr breiige Konsistenz des Toilettenpapiers nach vielen Stunden oder sogar Tagen ist interessant zu beobachten.



*Abbildungen B2.2-B2.5: Papiere nach 60 min in Wasser
(von links nach rechts: 80 g-Papier, Küchenrolle, Papiertaschentuch, Toilettenpapier)*

Die Entsorgung der ausgewrungenen Papiere im Restmüll ist zu beachten. Das aufgelöste Toilettenpapier kann natürlich alternativ über die Toilette entsorgt werden.

B2.2 Experimente 2.1, 2.2 & 2.3 – Frisch gestärkt

Für die Experimente 2.1, 2.2 und 2.3 kommt der Hintergrund der Papier-Zusatzstoffe Stärke sowie Leime/Harze ins Spiel. Es wird die Beschreibbarkeit dreier Papier-Arten untersucht (Hintergrund der Leimung). Außerdem wird der Iod-Stärke-Nachweis mit den Papieren durchgeführt. Schließlich werden Echt- und Falschgeldscheine mit Geldscheinprüfstiften getestet.

Hinweise zum Material und Experimentieren

Auch hier können als Frischfaser- und Recyclingpapier Fehldrucke/Schmierpapiere mit einer leeren Rückseite genutzt werden. Es sollte ein richtiger Tintenfüller und kein Tintenroller genutzt werden.



Abbildung B2.6: Betaisodona®-Lösung als Testlösung

Als Testlösung kann Betaisodona®-Lösung oder Lugolsche Lösung genommen werden. Betaisodona® findet sich in vielen Hausapotheken zur antiseptischen Wundbehandlung, allerdings häufig in Form von Salben. Für unser Experiment kommt nur die Lösung, nicht die Salbe in Frage. Sollte Betaisodona®-Lösung extra gekauft worden sein, kann gerne darauf hingewiesen werden, dass die Lösung nach dem Experimentieren in die elterliche Hausapotheke gegeben werden kann. Betaisodona®-Lösung, eine Povidon-Iod-Tinktur, ist als Arzneimittel nicht als Gefahrstoff deklariert. Die Packungsbeilage ist zu beachten.

Lugolsche Lösung, eine Iod-Kaliumiodid-Lösung, ist die gängige Testlösung in Schulen für den Iod-Stärke-Nachweis und sowohl in der Biologie- als auch in der Chemie-Sammlung standardmäßig zu finden. Der Iodgehalt sollte unter 5 % liegen. Da Lugolsche Lösung mit GHS08 „Gesundheitsgefahr“ eingestuft ist, sollten die Schülerinnen und Schüler – wie im Aufgabenblatt angegeben – nur mit Schutzbrille und unter Beaufsichtigung einer naturwissenschaftlichen Fachlehrkraft mit diesem Stoff arbeiten. Formal ist der Stoff in Schulen mit „S4K“ vermerkt: Schülerinnen und Schüler bis zur vierten Klasse dürfen nicht damit experimentieren. Das Etikett in Abbildung B2.7 zeigt, dass der Stoff problematisch bei wiederholter oder längerer Exposition sein kann, was in unserem Experiment 2.2 natürlich nicht vorgesehen ist.

Entscheidend ist wie bei allen iodhaltigen Lösungen die Konzentration. Im Sinne einer Ersatzstoffprüfung könnte man auf Lugolsche Lösung verzichten und auf einen kennzeichnungsfreien Ersatzstoff zurückgreifen, nämlich eine Iodlösung der Konzentration $c = 0,025 \text{ mol/L}$.^{1,2}

IPN Kiel, 24145 Kiel Iodkaliumiodid-Lösung Lugolsche Lösung (CarlRoth) H373 Kann die Organe schädigen bei längerer oder wiederholter Exposition. P280 P314 Staub / Rauch / Gas / Nebel / Dampf / Aerosol nicht einatmen. Bei Unwohlsein ärztlichen Rat einholen/ärztliche Hilfe hinzuziehen.	(c) D-GISS EINECS gimol ACHTUNG		IPN Kiel, 24145 Kiel Iod-Lösung $c = 0,025 \text{ mol/L}$ - Kein gefährlicher Stoff nach GHS gem. Referenzdatenbank GESTIS. - In der GESTIS-Datenbank liegen keine P-Sätze vor.	(c) D-GISS 231-442-4 7553-56-2 gimol $I_2 + aq$
---	--	--	--	--

Abbildung B2.7: Lugolsche Lösung und Iodlösung ($c = 0,025 \text{ mol/L}$) nach D-GISS im Vergleich

[1] vgl. Ruppertsberg, K.; Rautenstrach, H.; Proske, W. (2022): Kohlenhydratnachweise im Chemieunterricht – welche werden im Unterricht gelehrt, welche sollten gelehrt werden? Kohlenhydrat-Nachweise im experimentellen Chemieunterricht unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten. Supplement zum Hauptartikel „Welcher Zucker ist in der Probe?“. Nachrichten aus der Chemie. Band 70/ Nr. 2., Wiley-Verlag, hier S. 13-15.

[2] Bei der Konzeption der Aufgabe haben wir uns dafür entschieden, Lugolsche Lösung als vorgeschlagene Testlösung dennoch beizubehalten, da es sich dabei aktuell noch um das ‘Standard’-Reagenz in den Schulen für die Iod-Stärke-Probe handelt. Wir schätzen die Gefährdung beim Experimentieren mit Schutzbrille, unter Fach-Aufsicht und in der Kürze als sehr gering ein. Zudem sehen wir es von Vorteil für die Teilnehmenden, dass sie die Lösung und den Nachweis im späteren Unterricht so besser wiedererkennen.

Hinweis: Liegt bei einzelnen Schülerinnen und Schülern eine Iod-Überempfindlichkeit vor, sollten diese je nach individueller Abwägung ggf. Abstand von dem Experiment nehmen.

Um die Vergleichbarkeit beim Geldscheinprüfen im Experiment zu gewährleisten, haben wir uns auf einen Fünf- oder Zehn-Euro-Echtgeldschein festgelegt. Prinzipiell lassen sich aber alle Euro-Banknoten testen. Spielgeldscheine gibt es in vielen Spiele-Klassikern: beispielsweise Monopoly, Spiel des Lebens, Hotel u. v. m. Vielleicht haben die Schülerinnen und Schüler auch Freude daran, sich mit der komplexen Gestaltung unserer Banknoten zu befassen und sie entweder nachzumalen oder kreative eigene Geldscheine auf Papier zu gestalten. Damit nicht extra ein Geldscheinprüfstift angeschafft werden muss, kann man freundlich an einer Kasse nachfragen, ob man mit dem Stift des Geschäftes kurz vor Ort testen darf. Dafür eignen sich beispielsweise Bäckereien oder kleinere Geschäfte. Da Geldscheinprüfstifte nicht das 'non plus ultra' unter den Prüfmitteln sind, kommen sie in größeren Geschäften oftmals nicht zum Einsatz. Alternativ lassen sich Geldscheinprüfstifte im Schreibwarenhandel oder online für etwa 3-6 Euro erwerben.

Man testet, indem man im weißen Bereich der Banknote einen kleinen Strich markiert. Ist dieser Strich zunächst gelblich-orange und verblasst dann langsam, ist der Geldschein (wahrscheinlich) echt. Verfärbt sich der Strich dunkelblau, grau oder schwarz, handelt es sich (wahrscheinlich) um Falschgeld. Das Prinzip beruht darauf, dass echte Banknoten gängiger Währungen wie z. B. Euro oder Dollar auf ungestärktem Spezialpapier aus Baumwollfasern und/oder Kunststofffasern gedruckt werden. Falschgeld wird von den Prüfstiften erkannt, wenn es auf gestärktem Papier gedruckt wurde. Falsch negative Tests sind also möglich, wenn für das Falschgeld ungestärktes Papier verwendet wurde. Der Test könnte indes falsch positiv ausfallen, wenn die echte Banknote im Umlauf mit Stärke in Kontakt gekommen war.



Abbildung B2.8: Teststriche eines Geldscheinprüfstiftes auf Echtgeld (unten) und Falschgeld (oben)

B2.3 Experiment 3 – Die Welle macht's

Im dritten Experiment wird die Tragfähigkeit selbstgefalteter, geklebter Papierbrücken untersucht und die Ergebnisse übertragen auf Wellen-/Bogenformen in der Statik.

Hinweise zum Material und Vorgehen

Da in diesem Experiment am meisten Papier benötigt wird, bietet es sich unbedingt an, Fehldrucke/Schmierpapiere zu nutzen. Wichtig ist für die Stabilität der Brücken allerdings, dass es glatte, unbeschädigte Blätter sind. Das Einsparen von Papier ist eine Thematik, die viele Schülerinnen und Schüler heute sowieso schon gut beachten, an die man sie aber auch gerne in einem naturwissenschaftlichen Wettbewerb zum Papier erinnern darf.

Es sollte Flüssigkleber zum Einsatz kommen, der für Papier geeignet ist. Klebestifte bzw. Sticks eignen sich nicht! Wir haben es ausprobiert...

Für die Brückenpfeiler und Objekte zum Beschweren kann man die Schülerinnen und Schüler gerne kreativ werden lassen, was sich aus ihrem Alltag zum Experimentieren eignet. Eventuell stellen sie dabei fest, dass die Objekte ihrer Wahl nicht so praxistauglich wie angenommen sind, um es dann mit anderen Objekten auszuprobieren und ihr Vorgehen zu optimieren. Diskutieren Sie gerne mit ihnen über ihr geplantes Experiment, aber lassen Sie sie ihre Erfahrungen machen. Nach dem jeweiligen Einstürzen der Brücke, wird die Masse der Belastungsobjekte mithilfe einer Waage bestimmt.



Abbildung B2.9: Belastung einer Papierbrücke mit Kartoffeln

Unsererseits können wir sagen: Wörterbücher oder auch Hartplastik-Boxen sind sehr gute Brückenpfeiler. Besonders einfach ist es alternativ, zwei Tische so weit auseinander zu stellen, dass man die Brücke direkt auf die zwei Tischkanten auflegt. Dabei ist zu bedenken, dass die Fallhöhe der Objekte dann relativ hoch ist. Wir finden, dass sich zum Beschweren Bücher aufgrund ihrer gleichmäßigen, flächigen Form und ihrer variablen Masse (je nach Dicke der Lektüre) sehr gut eignen. Man kann aber auch ungleichmäßig geformte Objekte mit variabler Masse nehmen, beispielsweise Kartoffeln, Karotten o. ä., wenn man sie nicht direkt auf die Brücke, sondern in eine flächig aufliegende Kiste legt. Ein ähnliches Vorgehen empfiehlt sich wahrscheinlich auch bei Bauklötzen, da die Belastung ansonsten zu punktuell ist. Verzichten Ihre Schülerinnen und Schüler beim Beschweren auf eine flächig aufliegende 'Unterlage' und kommen dennoch gut beim Experimentieren zurecht, wäre der Aspekt der punktuellen Belastung sicherlich als Messungenauigkeit aufzugreifen. Belastet man auf einer flächig aufliegenden Kiste oder Plattform, knickt die Brücke im Verlauf oftmals genau an der Stelle der Ränder bzw. Kanten ein, was auch als Messungenauigkeit einfließen könnte.

Tipps zum Bau der Brücken

Der Zeitaufwand für das Herstellen der neun Papierbrücken ist nicht zu unterschätzen. Zumal auch davon ausgegangen werden kann, dass das ein oder andere Exemplar nicht richtig gelingt und ggf. neu hergestellt werden muss. Auf jeden Fall muss ausreichend Trocknungszeit für die Klebeverbindungen eingerechnet werden. Es ist denkbar, im Kurs-/Klassenverband experimentierende Schülerinnen und Schüler die Brücken zuhause vorbereiten zu lassen, um die Zeit im Kurs/Unterricht nur für die Belastungstests zu nutzen.

Der Bau der Brücken erfordert etwas Fingerspitzengefühl – nur mit gleichmäßig gefalteten und gut verklebten Brücken lässt sich richtig experimentieren. Die Skizze in der Experimentieranleitung soll die Faltung und Verklebung veranschaulichen.

Die Schülerinnen und Schüler stellen für ihr Experiment jeweils drei Brücken mit drei, fünf und zehn Zacken her. Ob sie dafür Linien auf dem Papierbogen vorzeichnen, von einer abgemessenen Zacke die anderen analog knicken oder den Bogen gleichmäßig in Falten legen und dann knicken, ist nicht entscheidend. Wir haben absichtlich Abstand genommen von komplizierten Faltanleitungen oder Kopiervorlagen. Zu beachten sind die äußeren Kleberänder von 0,5 cm, die beim Falten mit einkalkuliert werden müssen und die nach außen hin abgeklappt werden.

Wirklich wichtig ist, dass die Deckpapiere gleichmäßig und gut aufgeklebt werden. Der Flüssigkleber darf großzügig aufgetragen werden. Sorgen Sie ggf. für eine Klebeunterlage wie alte Zeitungen oder Kartonagen. Wie in der Anleitung und Skizze angegeben ist, wird zunächst das Deckpapier auf der Seite der Zackenspitzen mit den Kleberändern aufgeklebt. Es ist auf eine gleichmäßige Form und Anordnung der Zacken zu achten. Die Konstruktion gewinnt durch die äußeren Kleberänder in sich an Stabilität, sodass im nächsten Schritt das andere Deckpapier gleichmäßig aufgeklebt werden kann und die Papierbrücke dann trocknen kann.

Tipps zu den Belastungstests

Im Sinne der Förderung der Erkenntnisgewinnung haben wir uns dazu entschieden, das Experiment nicht kleinschrittig vorzugeben, sondern den Schülerinnen und Schülern in ihrer experimentellen Praxis viel Freiheit zu lassen. Wir selbst haben das Experiment auf diverse Arten und Weisen getestet und fanden es ideal, dass trotz unterschiedlicher Umsetzungen die Versuchsergebnisse immer den gleichen Trend widerspiegeln.

Bei den Belastungstests wird deutlich, dass die Brücken ein durchaus unterschiedliches Einsturzverhalten zeigen (vgl. Abbildungen B2.10-B2.15). Wie die Brücken belastet werden, hat auch einen Einfluss darauf, wie sie einstürzen. Weisen Sie Ihre Schülerinnen und Schüler darauf hin, beim Belasten genau zu beobachten. In den Aufgaben soll nicht nur ein Bezug zu den konkreten eigenen Versuchsbeobachtungen hergestellt werden, sondern das eigene Vorgehen soll im Rahmen einer Fehleranalyse kritisch reflektiert werden.

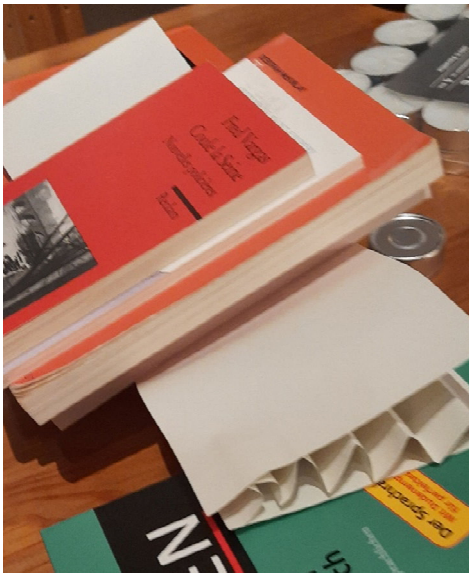


Abbildung B2.10: seitliches Abknicken vorm Einsturz



Abbildung B2.11: Zusammendrücken oder Ausbeulen der Zacken

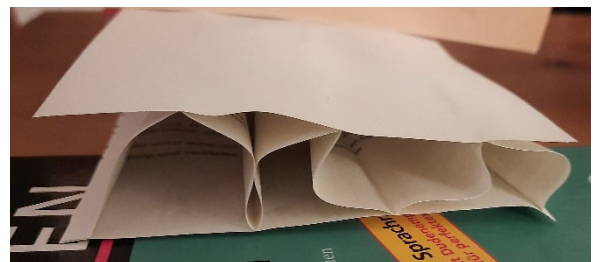


Abbildung B2.12: ungleichmäßiges Abknicken vorm Einsturz

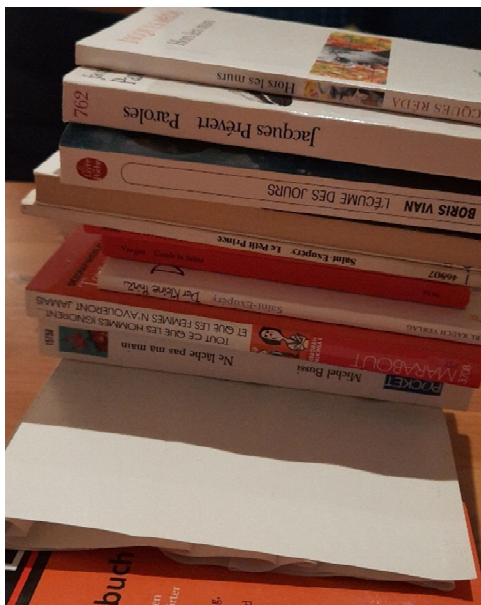


Abbildung B2.13: seitlich 'wegdriftende', geplättete Zacken vorm Einsturz



Abbildung B2.14: mittiges Einbrechen



Abbildung B2.15: Einbrechen seitlich am Belastungsobjekt

B3 Theoretische Grundlagen

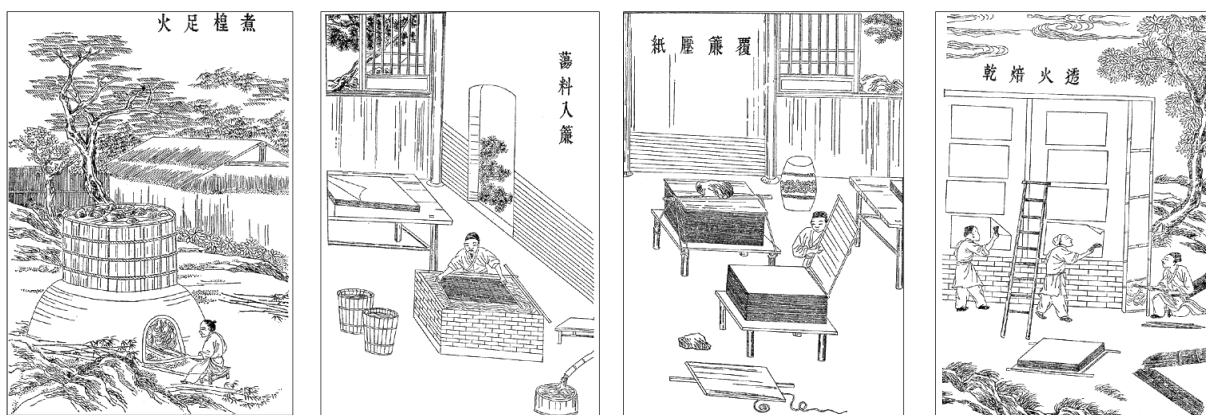
B3.1 Experimente 1.1 & 1.2 – Papier ist nicht gleich Papier!

In der Aufgabenrunde der IJSO 2025 dreht sich alles um das Thema Papier. Zunächst soll in diesem Kapitel allgemeines Hintergrundwissen zur Papierherstellung gegeben werden.

Papier – eine zweitausend Jahre alte Erfindung

Die Geschichte des Papiers ist deutlich jünger als die Geschichte des Schreibens. Als früheste Schriftmedien dienten über Jahrtausende insbesondere Stein, Ton, Metall, Holz, Blätter, Wachs, Tierhaut (Leder und Pergament), Leinen sowie Papyrus. Der erstmals im antiken Ägypten gefertigte Papyrus besteht aus kreuzweise gepressten Faserstreifen und unterscheidet sich somit maßgeblich vom Papier im heutigen Sinne.

Die Papierherstellung wurde nach derzeitigem Wissensstand im ersten Jahrhundert n. Chr. in China erfunden. Das faserige Rohmaterial wurde in Wasser gekocht, geschöpft, gepresst, getrocknet und geglättet. Um eine gleichmäßigere und weniger saugfähige Papieroberfläche zu erhalten, wurde bereits wenig später die Leimung erfunden. Der Prozess wurde in den folgenden Jahrhunderten weiter verbessert und angepasst, denn es gab eine große Nachfrage nach Papier.



Abbildungen B3.1-B3.4: Papierherstellung auf einem chinesischen Holzschnitt
(von links nach rechts: Kochen der Fasern, Schöpfen des Papiers, Auspressen, Trocknen an der Sonne)

Unter dem chinesischen Kaiser Gaozong wurde im siebten Jahrhundert das erste Papiergeld ausgegeben; eine Neuerung, die sich in der Folge auch in anderen asiatischen Ländern einstellte.

Über viele Jahrhunderte gelangten die Kenntnisse von Asien über die arabische Welt und das spanisch-islamische Al-Andalus im Mittelalter nach Europa. Die Entwicklung steht im engen Zusammenhang mit der Verbreitung von Wissen, umso mehr angetrieben durch die Erfindung des Buchdrucks durch Johannes Gutenberg im Jahre 1450. Das Prinzip des Papierschöpfens ist innerhalb von zweitausend Jahren gleich geblieben. Allerdings wurde die Qualität des Papiers durch Prozessoptimierungen stark verbessert. Je nach den örtlichen Gegebenheiten wurde unterschiedliches Rohmaterial eingesetzt (z. B. Bast, Flachs, Hanf, Lumpen). Maschinen lösten die Handarbeit mehr und mehr ab und im 19. Jahrhundert setzte die industrielle Massenproduktion von Papierbahnen ein.

Die Papierherstellung

Wie der Titel der Aufgabe 1 sagt, ist Papier nicht gleich Papier. Man muss sich vor Augen führen, wie viele Arten von Papier es heute gibt. Jedes Spezialpapier hat eigene spezielle Eigenschaften. Und doch haben alle Papier-Arten gemein, dass sie größtenteils aus Cellulosefasern bestehen. Nur durch chemische Zusatzstoffe und gezielte Aufbereitung des jeweiligen Papiers können die gewünschten Eigenschaften erreicht werden. Die moderne Papierherstellung ist ein komplexes Verfahren. An dieser Stelle soll ein grober chemischer und technischer Gesamtüberblick gegeben werden (vgl. Abbildung B3.5).

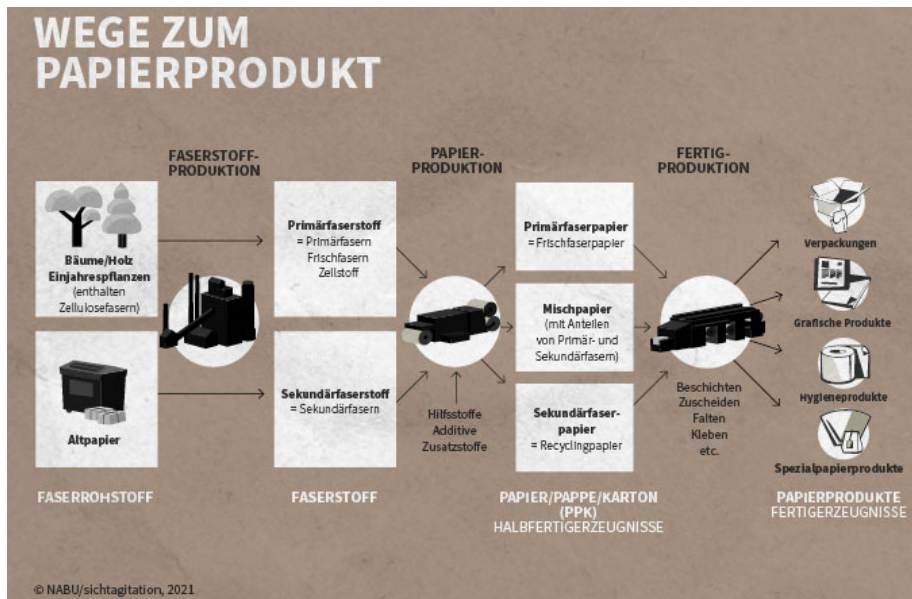


Abbildung B3.5: Veranschaulichung des Weges vom Faserrohstoff zum Papierprodukt

1) Faserrohstoffe

Prinzipiell lässt sich Papier aus allen cellulosehaltigen Rohstoffen herstellen. Neben Holz spielen einjährige Pflanzen (z. B. Graspapier in Deutschland und Afrika, Papier aus Tomatenpflanzen in den Niederlanden, Papier aus Ananaspflanzen in Costa Rica) und Baumwolle, also Hadern bzw. Lumpen heutzutage nur eine untergeordnete Rolle. Papier lässt sich auch aus schlecht verdautem Tierdung herstellen. Zu unterscheiden sind ebendiese **Primärfaser-Rohstoffe** und auf der anderen Seite **Sekundärfaser-Rohstoffe** aus dem Papierrecycling. Altpapier nimmt in Deutschland seit vielen Jahren einen steigenden Anteil an der Papierproduktion ein (1990: ca. 49 %, 2022: ca. 79 %).

Der wichtige und im Sinne der Nachhaltigkeit kritisch zu bewirtschaftende Rohstoff Holz hat vier Absatzmärkte: die Papier-, Möbel- und Bauindustrie sowie den Brennholz-/Pelletmarkt. Von Vorteil ist, dass Holz als nachwachsender Rohstoff eine hohe Verfügbarkeit hat. Problematischerweise ist der internationale Holzmarkt trotz teilweise vorgenommener Zertifizierungen sehr intransparent. Die industrielle Forstwirtschaft steht weltweit nicht nur mit der Abholzung von Primärwäldern, sondern auch mit Bodenerosion, Trockenheit und Schädlingsbefall aufgrund von Monokulturen im Zusammenhang. Der Papierindustriestandort Deutschland – europaweit führend und weltweit auf dem vierten Platz hinter China, den USA und Japan – ist jedoch zwingend auf Importe angewiesen: Nur circa ein Viertel der hiesigen Papierproduktion kann über deutschen Faserstoff gedeckt werden. Deutschland importiert einen großen Anteil aus Brasilien.

Für 100 kg Papier werden etwa 250 kg Holz benötigt. Nicht jede Holzart ist gleichermaßen als Faserrohstoff geeignet. Für die verschiedenen Hölzer sind unterschiedliche Faserlängen typisch, die wiederum einen wesentlichen Einfluss auf die Papierqualität haben. Längere Fasern, typisch für Nadelhölzer, verfilzen besser und ergeben ein festeres Papierprodukt. Kurzfasrige Laubhölzer werden entweder mit Nadelholz gemischt oder für bestimmte Papier-Arten eingesetzt.

2) Faserstoffe

Holz enthält etwa 20 % Lignin (Harz), welches die Ursache für das Vergilben von Papier ist.

Papier-Arten, die unkritisch sind, was das Vergilben betrifft (z. B. Zeitungspapier, Werbebeilagen), können ihren Ligninanteil beibehalten. Sie werden also nur auf der Basis von gehäckseltem Holz, dem sogenannten **Holzstoff**, hergestellt.

Für alle anderen Papier-Arten muss das Lignin aus dem Holz herausgelöst werden, was chemisch vor allem durch Aufschluss und Kochen im sauren Sulfit- oder im alkalischen Sulfat-Verfahren geschieht. Diese Verfahren sind sehr energie-, chemikalien- sowie wasserintensiv und sind der Grund dafür, dass die Papierindustrie weltweit auf dem fünften Platz der industriellen Energieverbraucher liegt. Nach der Aufbereitung liegen die Fasern als sogenannter **Zellstoff** vor.

Altpapierstoff wird gewonnen, indem Altpapier in Wasser aufgelöst wird und ggf. durch De-Inking gewaschen wird. Im Vergleich zur Herstellung von Zellstoff wird etwa 70 % Energie gespart.

3) ggf. Bleiche

Im Sulfite- oder Sulfatverfahren wird das Lignin nicht vollständig aus den Fasern herausgelöst. Für ganz weiße Papierprodukte muss der Zellstoff zusätzlich gebleicht werden. Dafür werden Bleichmittel wie Sauerstoff, Ozon, Peroxide oder Chlordioxid eingesetzt. Chlor kommt aus Umweltaspekten kaum noch in Frage.

4) Zusatzstoffe (je nach Papier-Art und Verwendungszweck):

- **Füllstoffe:** Papier sind bis zu 30 % Füllstoffe zugesetzt, um die ungleichmäßige Verfilzung der Fasern auszugleichen und das Papier somit glatter, schwerer und weniger lichtdurchlässig zu machen. Dazu gehören u. a. Kaolin, Calciumcarbonat (Kalk), Titandioxid, Bariumsulfat, Talkum, Stärke oder Silicate. Diese Stoffe sind in der Regel kostengünstiger als Zellstoff. Hygienepapiere enthalten keine Füllstoffe, denn hier liegt der Fokus auf der besonders hohen Saugfähigkeit.
- **Farbstoffe:** Das Papier wird mit synthetischen Farbstoffen oder Mineralpigmenten getönt. Besonders weißes Papier wird mit optischen Aufhellern behandelt. Ziel ist es, den Gelbstich zu überlagern. Dies gelingt durch die Fluoreszenz der Stoffe, die UV-Licht aufnehmen und blaues Licht abstrahlen.
- **Leimungsmittel:** Es können entweder Leimungsmittel den Fasern während der Papierherstellung (Masseleimung) oder nachträglich als Beschichtung der Papieroberfläche (Oberflächenleimung) hinzugefügt werden. Diese Stoffe regulieren die Beschreibbarkeit des Papiers, indem sie die Fähigkeit der Fasern, Wasser zu binden, modifizieren. Es handelt sich bei diesen Stoffen um tensidartige Verbindungen mit einem hydrophilen Molekülteil, der an die OH-Gruppen der Cellulosefasern bindet, und einem hydrophoben Molekülteil, der die veränderte Faseroberfläche bildet und Wasser nun abstößt. Zum Einsatz kommen als Leime spezielle Polymere oder verseifte Baumharze. Stärke dient als Trägersubstanz bei der Masse- oder Oberflächenleimung und erhöht selbst die Festigkeit des Papiers.

Zu bedenken ist das Maß der Leimung: Die Tinte soll auf Schreibpapier einerseits nicht wie bei einem Schwamm in die Fasern einziehen und unleserlich ausfransen. Andererseits soll sie so schnell und reguliert aufgenommen werden, dass sie beim Schreiben nicht mit dem Handrücken verwischt.

- **Nassfestmittel:** Leimungsmittel regulieren zwar die Saugfähigkeit und somit Beschreibbarkeit von Papier, machen es aber nicht gänzlich wasserfest. Zudem werden bestimmte Papier-Arten nicht geleimt, da es ihrem Verwendungszweck entgegensteht. Hygienepapiere wie Papierhandtücher, Papiertaschentücher, Papierservietten und Küchenrolle sind extra dafür bestimmt, Wasser aufzunehmen und dabei ihre Form zu behalten. Auch Filter- sowie Banknotenpapier darf sich im Kontakt mit Wasser keinesfalls auflösen.

Sobald Wassermoleküle zwischen die Cellulosefasern unbehandelten Papiers gelangen, bilden sich Wasserstoffbrücken zwischen den OH-Gruppen der Cellulose und den Wassermolekülen. Mit dem Ergebnis, dass der Faserverbund aufgehoben wird und sich das Papier in Fetzen zersetzt. Um das zu verhindern, werden den Fasern dieser Spezialpapiere sogenannte Nassfestmittel hinzugesetzt. Es sind Polymere mit endständigen funktionellen Gruppen, die mit den OH-Gruppen mehrerer Cellulosefasern reagieren und kovalente Bindungen ausbilden. Die Fasern werden also zusätzlich vernetzt und sehr fest zusammengehalten.

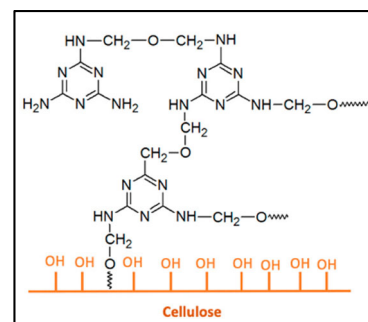


Abbildung B3.6: Ein melamin-basiertes Polymer (Nassfestmittel) kovalent an Cellulose gebunden; Molekülausschnitt

Um nassfeste Papiere zu recyceln, müssen die Bindungen zwischen den Nassfestmitteln und der Cellulose wieder aufgebrochen werden. Dabei werden die Cellulosefasern jedoch so stark geschädigt, dass die nassfesten Papiere kaum recycelt werden können.

- **Retentionsmittel:** Diese Stoffe, z. B. Aluminiumsulfat oder Polymere, werden dem Papier hinzugegeben, um die Zusatzstoffe besser an die Fasersuspension zu binden. Nicht nur aus Kostengründen, sondern auch aus ökologischen Gründen soll ein möglichst geringer Anteil an Zusatzstoffen mit dem Wasser ausgespült und beim Entwässern ins Abwasser übergehen.
- **Biozide:** Papier, welches unempfindlich gegenüber Insekten z. B. Bücherläusen oder Papierfischchen sein soll, enthält gezielt biozide Stoffe.
- Weitere Zusatzstoffe: Flockungsmittel, Fixierstoffe, Entschäumungsmittel etc.

5) Papiermaschine

Aus der Fasersuspension mit den zugesetzten Additiven, die zu 99 % aus Wasser besteht, gilt es, über mehrere Teilbereiche innerhalb der Papiermaschine sukzessive das Wasser zu entfernen und das Papier in eine gleichmäßige, glatte Form zu bringen (vgl. Abbildung B3.7). Dafür sind zahlreiche Rollen und Walzen notwendig. Ein interessanter und in den fertigen Papierprodukten tatsächlich beobachtbarer Fakt ist, dass sich die Fasern in der faserigen Suspension in der Papiermaschine entlang der Laufrichtung der Bahn ausrichten. Sollte keine Massen-, sondern eine Oberflächenleimung vorgenommen werden, ist dieser Schritt im Prozess noch zwischengeschaltet. Die Papierbahnen werden im letzten Teil der Maschine aufgerollt und zur Herstellung der Papierprodukte ggf. in andere Fabriken weitertransportiert.

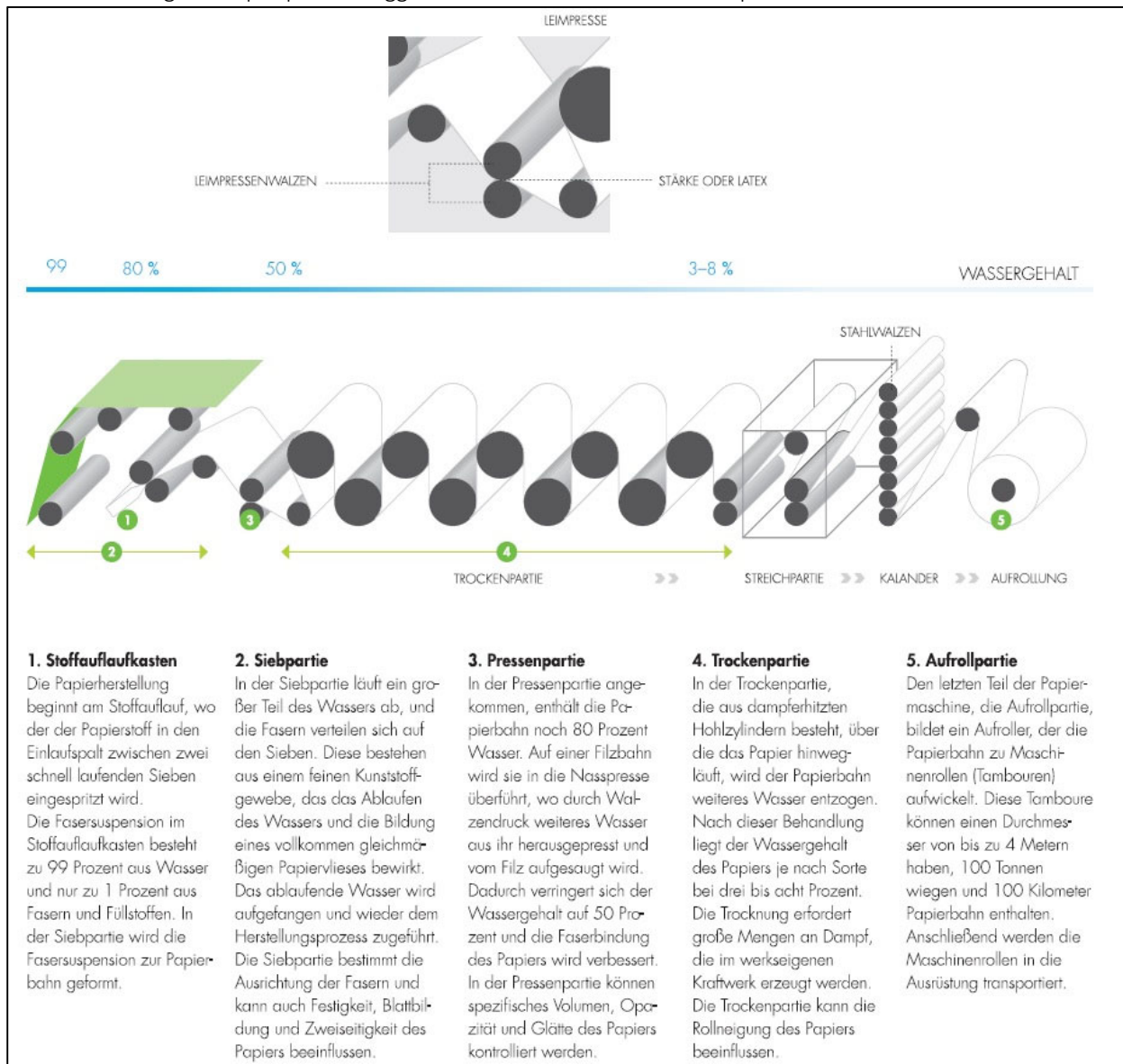


Abbildung B3.7: Querschnitt einer Papiermaschine



Abbildung B3.8: Papierbahn in einer Papiermaschine



Abbildung B3.9: fertige Papierrolle

Exkurs: Hygienepapiere in Rohrleitungen

Es gibt nur eine Papier-Art, die speziell für das Herunterspülen in der Toilette konzipiert ist: das Toilettenpapier. Der Faserverbund löst sich innerhalb kurzer Zeit im Kontakt mit Wasser auf, sodass eine faserige Masse im Abwasser über die Kanalisation in die Kläranlagen gelangt.

Nassfeste Hygienepapiere wie Papiertaschentücher oder Küchenrolle sind ein ernst zu nehmendes Problem für die Rohrleitungssysteme der Kommunen. Die Nassfestmittel verhindern das Auflösen der Papiere in Wasser (s. o.). Ähnlich ist es mit diversen Produkten, die als feuchtes Toilettenpapier in den Handel kommen. Dieses Papier besteht aus Textilfasern und enthält nicht selten zusätzliche Kunststofffasern, die wiederum das Recycling der Fasern erschweren. Problematisch ist, dass es in Deutschland keine Vorschrift gibt, wie schnell sich ein Faserprodukt in Wasser auflösen muss, um als wasserlöslich und somit spülbar in der Toilette zu gelten.

Hygienepapiere mit unzureichender Wasserlöslichkeit können Rohre und auch Pumpen verstopfen. Die Reparatur ist vielerorts kostenintensiv. Steigende Kosten werden in diesem Bereich umgelegt auf die Abwassergebühren.

Eine Entsorgung dieser Papiere über den Restmüll würde der Problematik einfach entgegenwirken.

Recyclingpapier – ökologisch deutlich vorteilhaft

Im Jahr 2022 wurde die *Aktualisierte Ökobilanz von Grafik- und Hygienepapier* im Auftrag des Umweltbundesamtes herausgegeben. Die Ergebnisse der wissenschaftlich angelegten, unabhängigen Studie sprechen eine klare Sprache: „Durchschnittlich spart die Produktion von Recyclingpapier 78 Prozent Wasser, 68 Prozent Energie und 15 Prozent CO₂-Emissionen.“ Das Hauptinteresse ist somit, einen maximalen Anteil an Sekundärfasern im Papierkreislauf zu gewährleisten und gleichzeitig dem Abholzen von Wäldern entgegenzuwirken. Zentrale Aspekte in der Argumentation beziehen sich auf die Kohlenstoffspeicherung in Wäldern, die Biodiversität und die Abkehr vom Landnutzungswandel. Altpapier wird entweder aus Deutschland selbst oder aus dem europäischen Ausland bezogen, weshalb man Recyclingpapier auch als ‘Papier der kurzen Wege’ bezeichnen kann.

Das Papierrecycling in Deutschland hat sich in den vergangenen Jahren sehr gut entwickelt und ist Vorbild für andere Länder. Die hiesige Altpapierquote von 79 % lässt sich nicht viel weiter steigern, denn es wird immer ein gewisser Anteil an Frischfasern benötigt. Die Sekundärfasern können nämlich nur etwa 5-7-mal recycelt werden; sie werden mit jedem Zyklus kürzer und büßen an Qualität ein. Entwicklungspotenziale gibt es dennoch, z. B. die Erhöhung des Recyclinganteils bei Hygienepapieren (aktuell noch unter 45 %), vor allem weil es sich dabei ausschließlich um Papiere handelt, die nicht recycelt werden können und mit ihrer Nutzung dem Papierkreislauf verloren gehen.

Ein zu beachtendes Risiko im Altpapierkreislauf ist die Anreicherung unerwünschter Stoffe, beispielsweise mineralölbasierte Druckfarbenrückstände oder Phthalate. Papiere und Kartonagen für den Lebensmittelkontakt rücken hier besonders in den Fokus und unterliegen bestimmten Obergrenzen an Stoffkonzentrationen.

Wichtig ist es trotzdem, Vorbehalte und Klischees über Recyclingpapier abzubauen (z. B. Papierstau in Kopierern durch Recyclingpapier, technische Abnutzung der Geräte etc.). Die Recyclingprozesse und so auch die Recyclingpapierprodukte haben sich qualitativ stark verbessert und diese Entwicklung wird weiter voranschreiten. Es gibt diverse Kampagnen und Förderungen für die Verwendung von Recyclingpapier, beispielsweise in öffentlichen Stellen (vgl. *Papieratlas*).



Abbildung B3.10: Papier-Altpapier-Kreislauf
bifa Umweltinstitut GmbH

B3.2 Experimente 2.1, 2.2 & 2.3 – Frisch gestärkt

Die Experimente knüpfen daran an, verschiedene Papiere zu untersuchen. Auf die Leimung und den Zusatz von Stärke für die Festigkeit wurde bereits im vorigen Kapitel näher eingegangen. In diesem theoretischen Kapitel liegt der Schwerpunkt auf dem Aufbau des Stärkemoleküls, dem Iod-Stärke-Nachweis und dem Kontext der Geldscheinprüfung. Außerdem wird das Cellulosemolekül beschrieben und die Funktion von Cellulose und Stärke in Pflanzen gegenübergestellt.

Stärke

Stärke gehört zu den Kohlenhydraten und ist ein Makromolekül, ein sogenanntes Polysaccharid. Es ist aus Tausenden von α -D-Glucose-Einheiten aufgebaut, die über glykosidische Bindungen miteinander verknüpft sind. Stärke besteht aus 20-30 % Amylose und 70-80 % Amylopektin. Es handelt sich dabei um zwei räumlich unterschiedlich aufgebaute Bestandteile, die zusammen die Stärke bzw. das sogenannte "Stärke Korn" bilden.

Bei **Amylose** sind die Glucose-Einheiten ausschließlich α -1,4-glykosidisch verknüpft (vgl. Abbildung 3.11, links). Sie bilden dadurch lineare Ketten mit helikaler (Schrauben-) Struktur. Eine Windung der Helix besteht jeweils aus sechs Glucose-Einheiten. Die helikale Struktur wird durch Wasserstoffbrücken zwischen benachbarten Hydroxylgruppen stabilisiert. Amylose ist schwach in Wasser löslich.

Bei **Amylopektin** sind die Glucose-Einheiten α -1,4-glykosidische und α -1,6-glykosidische verknüpft (vgl. Abbildung 3.11, rechts). Dadurch liegt eine vernetzte Molekülstruktur vor. Amylopektin ist aufgrund dieser Quervernetzungen nicht in Wasser löslich.

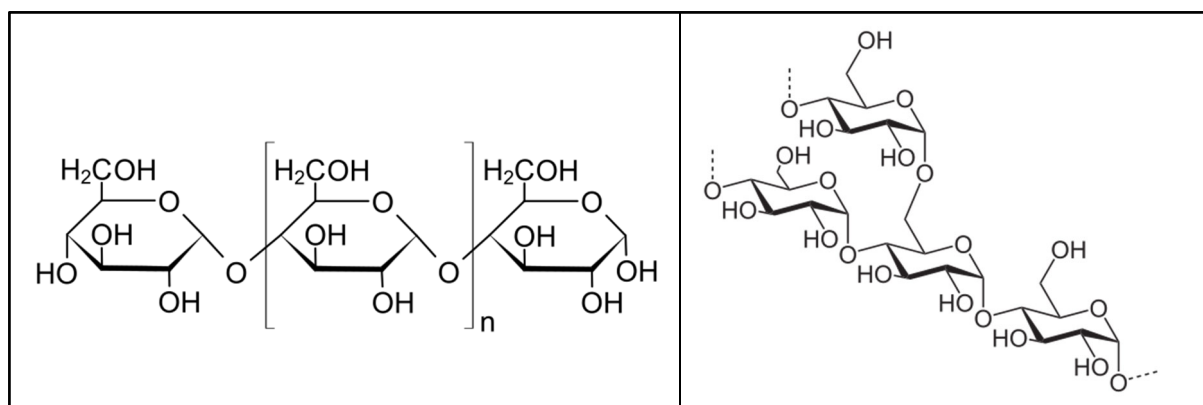


Abbildung B3.11: Amylose (links) und Amylopektin (rechts)

Iod-Stärke-Nachweis

Stärkehaltige Proben können mit einer Iod-Kaliumiodid-Lösung oder mit einer Iodlösung positiv getestet werden. Es handelt sich bei diesem qualitativen Stoffnachweis um den sogenannten Iod-Stärke-Nachweis oder die Iodprobe. Im Kontakt mit der Testlösung verfärbt sich die Probe charakteristisch: nämlich dunkelblau, schwarz, grau, violett bis hin zu rötlich. Die Färbung ist einerseits abhängig von der Zusammensetzung der Stärke, andererseits von der Konzentration der Testlösung. Beim Erhitzen entfärbt sich die Probe.

Für die Erklärung des Iod-Stärke-Nachweises sind die spiralförmigen bzw. helikalen Molekülteile von Bedeutung, deren Anteil bei verschiedenen Stärkekörnern variabel ist: In den Hohlraum der Helix lagern sich Polyiodidketten (I_3^- , I_5^- , I_7^- , I_9^-) bzw. nach neueren Erkenntnissen auch Polyiodketten ein. Es bildet sich ein Polyiodid-Stärke-Komplex bzw. ein Polyiod-Stärke-Komplex. Die delokalisierten Elektronen des Komplexes werden durch das Licht angeregt und absorbieren im langwelligeren Bereich, woraus die Färbungen resultieren. Bei der unverzweigten Amylose ist der optische Farbeindruck blau. Je verzweigter die Moleküle aufgebaut sind (Amylopektin), desto rötlicher ist der Farbeindruck. Aus beiden Anteilen in der Stärke ergibt sich also ein gemischter Farbeindruck, z. B. violett.

Quantitativ kann der Nachweis im Rahmen einer Titration (genauer: Iodometrie) eingesetzt werden und der genaue Gehalt an Stärke berechnet werden.

Lugolsche Lösung versus Betaisodona®-Lösung

Iod ist schlecht wasserlöslich, gut löslich ist es allerdings in einer wässrigen Kaliumiodidlösung. Eine solche Iod-Kaliumiodid-Lösung wird als Lugolsche Lösung bezeichnet; Iod liegt darin in Form von Polyiodidionen vor.

Betaisodona®-Lösung enthält 100 Milligramm Povidon-Iod pro 1 Milliliter Lösung. Povidon-Iod ist ein wasserlöslicher Komplex von Iod mit Polyvinylpyrrolidon (PVP). Verwendet wird eine solche Lösung als Antiseptikum. Die genannten 100 Milligramm Povidon-Iod enthalten 11 Milligramm Iod. In 100 Milliliter Lösung sind also 1,1 Gramm Iod enthalten.

Die oben beschriebene Lugolsche Lösung enthält Iod und Kaliumiodid im Verhältnis 1:2. Das heißt 100 Milliliter einer 5 prozentigen Lugolschen Lösung enthalten 5 Gramm Iod und 10 Gramm Kaliumiodid.

Die Lugolsche Lösung enthält somit um den Faktor 5 mehr verfügbares Iod als die Betaisodona®-Lösung, entsprechend intensiver ist die erzielte Färbung der Stärke. Trotz der geringeren Menge an frei verfügbarem Iod ist in unserem Fall der Stärkenachweis aber auch mit der Betaisodona®-Lösung oder sogar mit der in Kapitel B2.2 alternativ angegebenen 0,025 molaren Iodlösung gut durchführbar.

Geldscheine und Prüfung auf Echtheit

In den Währungen der Welt unterscheidet man heutzutage Papierbanknoten und Kunststoffbanknoten. Klassischerweise werden Geldscheine aus Papier hergestellt. Der Vorteil von Kunststoff gegenüber Papier ist seine Beständigkeit und dadurch längere Haltbarkeit. Jedoch sind Kunststoffbanknoten in ihrer Herstellung teurer. Sie werden insbesondere in tropischen und subtropischen Ländern eingesetzt, darüber hinaus z. B. in Australien, Kanada und in Rumänien.

Bei den Euroscheinen wird ein baumwollbasiertes, ungestärktes Sicherheitspapier genutzt, das neben den zahlreichen Sicherheitsmerkmalen der Scheine das Fälschen erschweren soll. Gemäß der Deutschen Bundesbank wurden im Jahr 2023 mehr als 55000 gefälschte Euroscheine registriert, vornehmlich 20- und 50-Euroscheine. Die Prüfung der Banknoten auf ihre Echtheit behält also eine enorme Relevanz.

Eine einfach zu merkende Regel im Umgang mit den Scheinen im Alltag heißt „fühlen, sehen, kippen“. Sie nimmt Bezug auf die Haptik (festes, griffiges Papier, fühlbare Schraffuren und Reliefs), die Optik (Farbgebung, Sichtfenster, Sicherheitsstreifen, Portrait-Wasserzeichen) und die je nach Blickwinkel unterschiedlich erscheinende Smaragdzahl.

Geldscheinprüfstifte kommen wegen ihrer einfachen Handhabung im Einzelhandel zum Einsatz. Chemische Prüfstifte, mit denen man einen kleinen Teststrich im hellen Bereich der Banknote aufmalt, basieren auf dem Iod-Stärke-Nachweis (vgl. S. 13 und 21). Elektronische Prüfstifte testen die Magnetismus- sowie UV-Sicherheitsmerkmale über dem Silberfaden und der Seriennummer des Scheines und geben ein akustisches Signal bei Echtheit ab. Geldscheinprüfer, bekannt unter dem Namen *Safescan*, die auch vielfach im Einzelhandel zu finden sind, testen die UV-Sicherheitsmerkmale der Banknoten vollautomatisch.

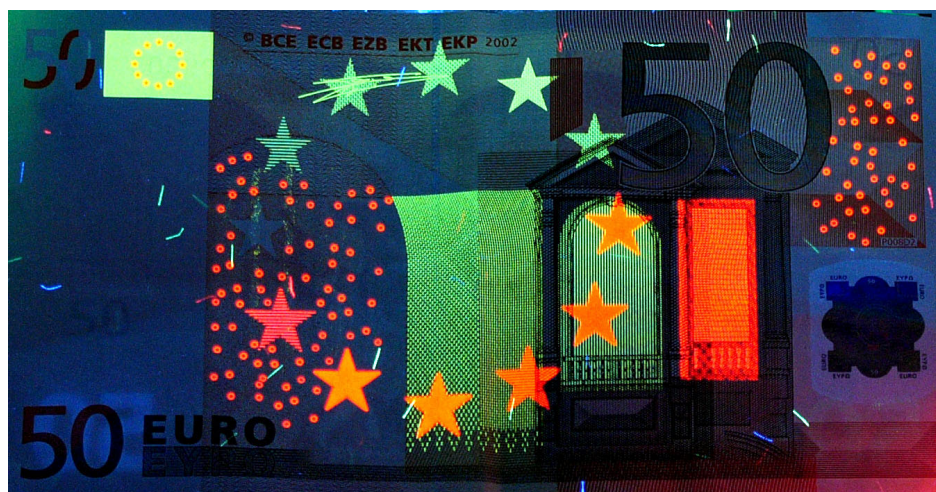


Abbildung B3.12: Fünfzig-Euro-Banknote unter UV-Licht

Cellulose

Auch Cellulose ist ein Polysaccharid. Als Baustein pflanzlicher Zellwände ist es die häufigste organische Verbindung. Cellulose ist aus β -D-Glucose-Einheiten aufgebaut, die über 1,4-glykosidische Bindungen miteinander verknüpft sind:

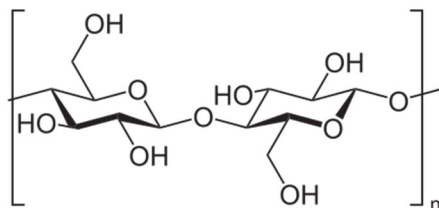


Abbildung B3.13: Ausschnitt eines Cellulosemoleküls

Anders als Stärke ist dieses Makromolekül unverzweigt. Die Molekülketten bestehen aus bis zu Zehntausenden Einheiten und bilden lange Stränge, die sich faserartig nebeneinander legen und über Wasserstoffbrücken intermolekular einen Verbund bilden.

Cellulose und Stärke im Vergleich

	Cellulose	Stärke
Molekül-Bausteine	β -D-Glucose-Einheiten	α -D-Glucose-Einheiten
Bindung zwischen den Molekül-Bausteinen	β -1,4-glykosidisch verknüpft	α -1,4-glykosidisch verknüpft (Amylose) α -1,4- und α -1,6-glykosidisch verknüpft (Amylopektin)
räumliche Struktur	unverzweigte, parallel-laufende Ketten; faserartig	Helix-Struktur (Amylose), verzweigte Ketten (Amylopektin); insgesamt knäuelartig
Wasserlöslichkeit	nicht wasserlöslich	schwach wasserlöslich
Verdaulichkeit	unverdaulich für den Menschen, verdaulich für einige Tiere (z. B. Kühe) durch endosymbiotische Mikroorganismen	verdaulich für den Menschen, verdaulich für viele Tiere
Funktion in Pflanzen	sehr formstabile Gerüstsubstanz der Pflanzen	Energiespeicher der Pflanzen

Cellulose und Stärke in Pflanzen

Im Vergleich wird deutlich, dass sowohl Cellulose als auch Stärke Polymere aus 1,4-verknüpften D-Glucose-Einheiten sind (Amylopektin auch 1,6-verknüpft). Die unterschiedliche α - und β -Konfiguration am anomeren Kohlenstoffatom führt allerdings dazu, dass beide Moleküle unterschiedlich aufgebaut sind und somit auch gänzlich verschiedene Funktionen erfüllen.

Cellulose ist eine Gerüstsubstanz und bildet den wesentlichen Bestandteil pflanzlicher Zellwände. Entscheidend dafür ist der intermolekulare Zusammenhalt der parallel zueinander angeordneten Cellulosestränge, die sich zu Faserbündeln zusammenlagern und so Mikrofibrillen und Fibrillen bilden. Cellulose wird in der Plasmamembran der pflanzlichen Zelle mithilfe des Enzyms Cellulose-Synthase synthetisiert. Die Fibrillen werden durch Mikrotubuli – röhrenförmige Strukturen aus Tubulin-Proteinuntereinheiten, die bei der Zellwandsynthese eine Art Rahmen bilden – räumlich angeordnet und vernetzen sich. Insgesamt sorgt die koordinierte Interaktion von Mikrotubuli und Cellulose für die stabile und flexible Struktur der pflanzlichen Zellwand.

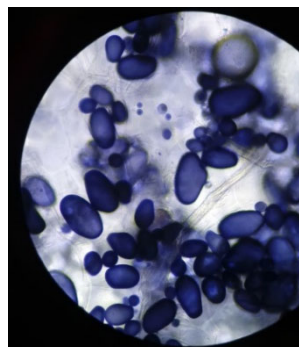


Abbildung B3.14: Stärkekekörner in einer Kartoffelzelle (mit Iodlösung blau angefärbt)

Stärke hingegen ist ein Energiespeicherstoff, den Pflanzen und Grünalgen nutzen, um Glucose in einer Art kompakter und inaktiver Reserveform (unlöslich und osmotisch nicht wirksam) zu speichern und in nährstoffarmen Zeiten abrufen. Überschüssige Glucose, die im Zuge der Fotosynthese in den Chloroplasten und anderen Plastiden gebildet wird, wird in Stärke umgewandelt und in Form von feinen bis groben Körnern in den Amyloplasten der Wurzeln, Rhizome, Samen, Zwiebeln und Knollen sowie im Holzkörper von Bäumen eingelagert. Die Pflanze kann die Energie aus der Stärke zurückgewinnen, indem sie sie enzymatisch durch Amylasen spaltet.

B3.3 Experiment 3 – Die Welle macht's

Wellpappe

Wellpappe wird als Karton- und Verpackungsmaterial eingesetzt. Der Begriff „Pappe“ geht auf den früheren Ausdruck „etwas pappen“, also etwas zusammenkleben, zurück. Das Patent auf doppelseitig verklebte Wellpappe meldete der Amerikaner Robert H. Thompson im Jahr 1882 an. Mit seiner Erfindung lieferte er eine Lösung für Verpackungen im global zunehmenden Warenverkehr.

Für Wellpappe wird mindestens eine, meistens zwei glatte mit einer gewellten Papierbahn verklebt:

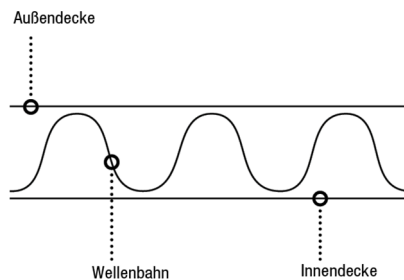


Abbildung B3.15: Aufbau einlagiger Wellpappe

Nicht nur aufgrund ihrer vielseitigen Einsetzbarkeit, der im Vergleich zur Vollpappe niedrigeren Materialkosten und der guten Bedruckbarkeit, sondern auch durch das Abführen von Feuchtigkeit über die Hohlräume ist Wellpappe ein überaus praktisches Material. Die Vorteile liegen in ihrer Leichtigkeit und gleichzeitig enormen Stabilität, Stoßdämpfung sowie Polsterung, die der Wellenform zu verdanken sind.

Man unterscheidet verschiedene Arten von Wellen. Sie werden charakterisiert durch die Wellenteilung t und die Wellenhöhe h :

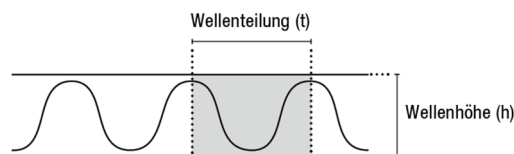


Abbildung B3.16: Wellenteilung und Wellenhöhe

Das Gesamtprodukt ist umso stabiler, je mehr Wellen und je mehr Lagen vorliegen. Wellpappe wird üblicherweise in bis zu drei Lagen produziert. Bei mehreren Lagen werden die Typen kombiniert, um die Eigenschaften des Gesamtprodukts noch zu optimieren. Es bestehen u. a. folgende Typisierungen:

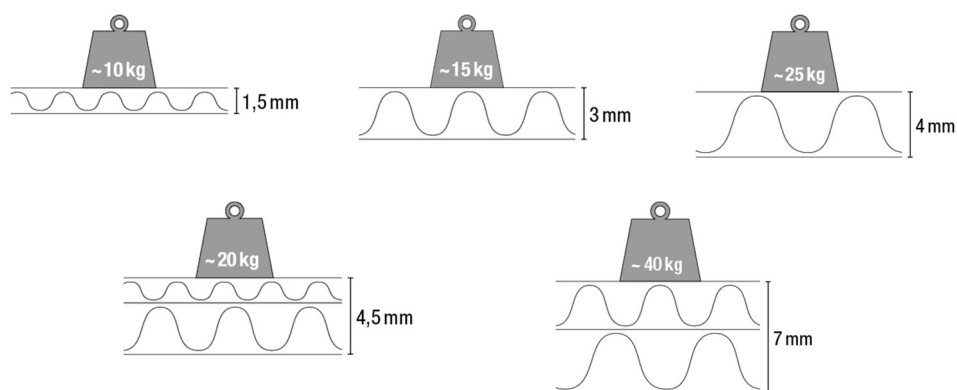


Abbildung B3.17: Beispiele verschiedener Wellpappentypen

MEDEWO GmbH

Durch die verschiedenen Wellenarten und Kombinationen entstehen diverse Wellpappenprodukte. Diese können sehr flexibel an die Bedürfnisse des zu verpackenden Inhalts angepasst werden. Es gibt inzwischen auch Möbel und andere Gegenstände aus Wellpappe. Den Herstellern zufolge sind sie in ihrer Stabilität vergleichbar mit Produkten aus Holz. Was klar hervorsticht, ist die Ökobilanz von Wellpappe: Sie wird zu bis zu 100 % aus Altpapier hergestellt und ist abgesehen von Leim und Imprägnierung vollständig recyclebar.

Über die Wellenform

Geknickte, gefaltete Papiere können die Stabilität von gewelltem Papier nicht erreichen. Das Experiment zur Belastung selbst gebastelter Papierbrücken mit verschiedenen Faltungen zeigt den Zusammenhang „Je mehr Zacken die Brücke auf gleicher Fläche aufweist, desto stabiler ist sie“ sehr zuverlässig, sodass diese Erkenntnis auf die Wellen übertragen werden kann.

Der direkte Vergleich zur Faltung zeigt, dass

- die Kräfte, die durch eine Belastung wirken, über die Wellen besser verteilt werden.
- die Klebefläche zwischen Welle und Deckpapier größer ist und die Verleimung somit besser haftet.

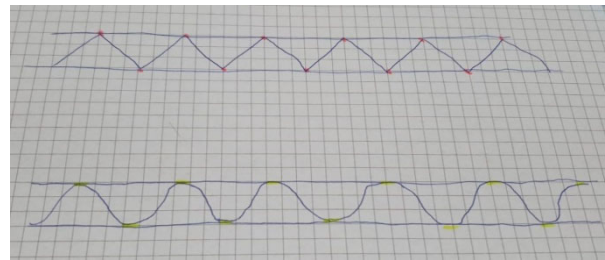


Abbildung B3.18: gefaltetes und gewelltes Papier im Vergleich (Skizze)

Modelle für das Prinzip der Kräfteverteilung in runden Formen finden sich in der Natur: Schnittlauch ist beispielsweise deutlich stabiler als flache Grashalme. Und wären Eierschalen nicht rund, so könnten sie dem Gewicht der brütenden Henne nicht standhalten.

Die Biegesteifigkeit ist eine relevante Größe der technischen Mechanik zur Analyse des Widerstands eines Materials gegenüber einer einwirkenden Kraft. Aus dem sogenannten Biegemoment kann sich eine temporäre oder dauerhafte Krümmung bzw. Verformung des Materials ergeben oder es ist in der Lage, seine Form beizubehalten. Einfluss auf die Biegesteifigkeit von Wellpappe haben die Art und Anzahl der Wellen, die Fläche, die verwendeten Deckpapiere und die Verleimung. Die einwirkende Kraft wird auf das gegenüberliegende Deckpapier verteilt.

Die Kraft, die sich aus der Belastung ergibt, wirkt in der ganzen Welle, und zwar im rechten Winkel zum Radius. Dies kann gut anhand eines Bogens in der Statik veranschaulicht werden (vgl. Abbildung B3.19). In grün ist die resultierende Kraft dargestellt. Sie kann im Sinne der Kräftezerlegung in eine x- und y-Komponente zerlegt werden. Die waagerechte x-Komponente (hier rot) wird als Bogenschub bezeichnet. Die senkrechte y-Komponente (hier blau) ist die lotrechte Auflagerkraft. Der Bogenschub ist umso größer, je flacher der Bogen konstruiert ist. Die Oberfläche des Bogens wird gestaucht (Druck), die Unterseite wird gedehnt (Zug).

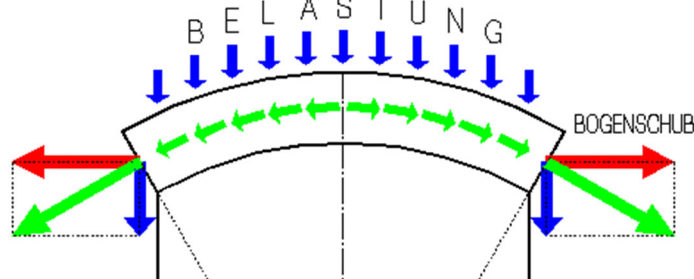


Abbildung B3.19: Kräfte in einem Bogen

www.Zimmerer-Treff.com

Exkurs: Bögen in der Architektur

Sowohl „Zacken“- als auch Rundformen finden sich in der Architektur. Natürlich ist die Statik von entscheidender Bedeutung, aber auch die Ästhetik zählt. So finden sich dreieckige Strukturen beispielsweise im Fachwerkbau. Die Kräfte werden hier über die gesamte Balkenkonstruktion verteilt.



Abbildung B3.20: Rundbögen mit Stahlzugband

www.Zimmerer-Treff.com

Beispiele für Rundformen sind in Brücken und Gebäuden zu finden: zweidimensional als Bögen oder dreidimensional in Kuppeln und Gewölben.

Der oben angesprochene Bogenschub wird in der Konstruktion an den Widerlagern speziell berücksichtigt, denn er drückt den Bogen nach außen. Angrenzende Stützkonstruktionen wie Mauern oder Pfeiler müssen massiv genug sein, um den Bogenschub seitlich aufnehmen zu können. Alternativ kommen Metallklammern oder Stahlzugbänder zum Einsatz.

Römische Bauten sind für viele Statiker und Architekten von besonderem Interesse, denn sie setzen bis heute Maßstäbe in der Baukunst. Ein weltweit bekanntes Beispiel ist der Pont du Gard in Südfrankreich. Diese Brücke aus dem 1. Jahrhundert n. Chr. ist Teil eines 50 km langen Aquäduktes nach Nîmes und besteht aus 52 Halbbögen auf drei Ebenen. Die auftretenden Kräfte – auch das immense Eigengewicht von 50.000 Tonnen ist nicht zu unterschätzen – werden auf die gesamte Bogenkonstruktion verteilt und senkrecht sowie waagrecht abgeleitet. Die Brücke verfügt über sehr stabile Verankerungen mit dem Boden und ist seitlich mit Stützpfählern befestigt.



Abbildung B3.21: Pont du Gard



Abbildung B3.22: Bogen aus der unteren Ebene des Pont du Gard, massives Fundament und Stützpfiler

Mit den Experimenten und den vertiefenden Fragen der IJSO-Wettbewerbsaufgaben wollen wir Neugierde wecken und forschendes Lernen unterstützen. Beim Experimentieren ergeben sich zwangsläufig Situationen, in denen etwas nicht „funktioniert“, oder das Ergebnis des Experiments von den Erwartungen abweicht. Und schon taucht die erste Frage auf: Woran liegt das? Was muss ich ggf. anders machen?

Auch stößt man immer wieder an Grenzen und stellt fest, dass man eine Frage nicht abschließend beantworten kann, weil Informationen fehlen. Und schon ist man mittendrin im Grübeln, Recherchieren und Planen weiterführender Experimente.

So ging es auch uns im Vorfeld mit der einfachen Frage, wie die Stabilität von Wellpappe untersucht werden könnte. Ist es möglich, eine gewellte Struktur nachzubauen, oder lässt sich der Sachverhalt auch anhand einer praktikableren gefalteten Struktur aufzeigen? Wie ließe sich eine entsprechende Papierbrücke konzipieren und bauen? Welche Klebstoffe kommen für das Verkleben der Papiere in Frage? Welche Belastungsobjekte eignen sich und was sind ihre jeweiligen Vor- und Nachteile? Wie viele Brücken müssen auf ihre Maximalbelastung untersucht werden, um aussagekräftige und gut auswertbare Versuchsergebnisse zu erhalten? Welche Fehlerquellen müssen berücksichtigt werden? Fragen über Fragen!

Weitergehende Versuche können aber auch Erkenntnisse vertiefen oder weitere Aspekte verdeutlichen. Vielleicht lassen sich mit den hier genannten Hinweisen Forscherfragen und neue Projekte entwickeln, die weit über die IJSO-Aufgaben hinausreichen.

Die Neugierde und das Hinterfragen, aber auch den eigenen Antrieb, nicht locker zu lassen und Dingen auf den Grund zu gehen, wollen wir mit den Wettbewerbsaufgaben stärken. Ähnlich wie wir beim Entwickeln der Aufgaben werden die Schülerinnen und Schülern bei der Bearbeitung der Aufgaben über zahlreiche Fragen stolpern. Weil wir diesen Prozess so wichtig finden, bitten wir die Schülerinnen und Schüler jedes Jahr in der letzten Aufgabe zwei Forschungsfragen zu formulieren. Ermutigen und inspirieren Sie Ihre Teilnehmenden, ihren eigenen Fragen nachzugehen. Unterstützen wollen wir damit aber auch Sie, wenn Sie Kinder und Jugendliche in Projekt(wettbewerb)en begleiten wollen und auf der Suche nach geeigneten Themen sind.

Zum Thema Papier ist nicht gleich Papier!

- Welche anderen Spezialpapiere gibt es und welche Eigenschaften haben sie?
- Wie verhalten sich die Papiere in anderen Flüssigkeiten (z. B. Seifenwasser)?
- Kann man feuchtes Toilettenpapier in der Toilette entsorgen?

Da die Schülerinnen und Schüler für die Aufgaben viel recherchieren, stoßen sie sehr wahrscheinlich auch auf Beispiele für anderen Spezialpapiere. Aus dem Alltag sind uns sehr viele unterschiedliche Papierprodukte bekannt, die wir ganz selbstverständlich nutzen und über deren Funktionalität sowie Hintergrund wir uns keinerlei Gedanken machen. Ein Beispiel: Filterpapier für Kaffee und Tee. Wie müssen diese Papiere konzipiert sein, damit sie ihren Zweck erfüllen. Und was bedeutet das eigentlich für ihre Entsorgung? Ist braunes Filterpapier anders (besser?) als weißes Filterpapier? Apropos Filterpapier: Warum eignet es sich für Papierchromatografie und welche „Kaffeephasen“ lassen sich nach dem Kaffeekochen erkennen?

Klassischerweise wird das Verhalten der Papiere in Wasser untersucht, so wie es die Schülerinnen und Schüler im Experiment durchführen. Doch ist zu bedenken, dass Papierprodukte im Alltag und in der Kanalisation ebenfalls mit anderen Flüssigkeiten in Kontakt kommen. Beispielsweise spielen hier Öle und Seifenlaugen eine Rolle. Um ein Papierprodukt genau zu beschreiben und Auswirkungen auf seine Nutzung sowie Entsorgung abschätzen zu können, werden diverse Produkttests durchgeführt. Die Schülerinnen und Schüler können im Rahmen einer eigenen Forscherfrage als Produkttester agieren und dürfen hier gerne kreativ werden.

Das handelsübliche feuchte Toilettenpapier findet sich in vielen Haushalten und wird in den Medien kontrovers diskutiert. Darf es nun in die Toilette oder nicht? Die Meinungen von Nutzern, Produktvertretern, Installateuren, Abfallberatern und (unabhängigen) Wissenschaftlern geht hier auseinander. Doch wie kommt das? Wer vertritt welche Interessen und Werte? Und was bedeutet das für die persönliche Kaufentscheidung? Der Hintergrund des feuchten Toilettenpapiers eignet sich ideal für eigene Produkttestungen (z. B. Verhalten in Wasser über einen längeren Zeitraum, Zerreißprobe etc.), Recherchen und Diskussionen. Mit Schülerinnen und Schülern der Mittelstufe könnte man im Klassenverband eine Fishbowl-Diskussion anleiten und durchführen. Gefördert wird mit diesem Kontext insbesondere der Kompetenzbereich Bewertung.

Zum Thema Frisch gestärkt

- Wie verläuft der Iod-Stärke-Nachweis mit anderen Testobjekten (z. B. Brot, Kartoffeln, Obst)?
- Funktioniert der Iod-Stärke-Nachweis mit diesen anderen Testobjekten auch mit einem Geldscheinprüfstift?
- Wie kann ich Geldscheine noch auf ihre Echtheit prüfen?

Der Iod-Stärke-Nachweis ist ein Klassiker im naturwissenschaftlichen Unterricht. Sollten Ihre Schülerinnen und Schüler ihn aus dem Unterricht noch nicht kennen, lassen Sie sie gerne selbst überlegen, welche Proben sie testen könnten. Es ist unbedingt auf sicheres Experimentieren zu achten (je nach verwendeter Testlösung Rahmenbedingungen abwägen, vgl. Kapitel B2.2). Die Färbungen bei einem positiven Nachweis variieren bei verschiedenen Proben in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Stärke, wie im Theorieteil auf S. 21 näher beschrieben ist. Dies lässt sich gut mit den Schülerinnen und Schülern im Nachgang reflektieren.



*Abbildung C1: andere Testobjekte, versetzt mit Betaisodona®-Lösung
(von links nach rechts: Cracker, rohe Nudeln, rohe Kartoffel, Apfel, Banane)*

Falls die Schülerinnen und Schüler für das Experiment 2.3 extra einen Geldscheinprüfstift angeschafft haben, können sie mit diesem natürlich auch weitere Proben testen und einen Vergleich zur vorher verwendeten Testlösung herstellen. Andere Objekte als Geldscheine sollten mit ausgeliehenen Geldscheinprüfstiften im Einzelhandel jedoch nicht getestet werden, da dies nicht dem Verwendungszweck der Stifte entspricht und sie womöglich in Mitleidenschaft gezogen werden.

Der Kontext der Geldscheine wird einige Schülergruppen vielleicht besonders faszinieren und zu weiteren Forscherfragen anregen. Von Reisen sind eventuell andere Währungen bekannt. Es könnten verschiedene Euro-Banknoten und – wenn vorhanden – Banknoten fremder Währungen näher unter die Lupe genommen und ihre Sicherheitsmerkmale theoretisch verglichen werden. Sollte an Ihrer Schule eine UV-Lampe vorhanden sein, könnten die Schülerinnen und Schüler die UV-Sicherheitsmerkmale auch praktisch erforschen. Dabei müssen sie auf die Gefahren im Umgang mit einer UV-Lampe hingewiesen werden und ein direkter Blick in den Strahlengang sowie eine längere Exposition der Haut (hier Hände) ausgeschlossen werden.

Zum Thema Die Welle macht's

- Wem gelingt es, die Papierbrücke herzustellen, die der höchsten Belastung standhält? (kompetitiv mit anderen Schülerinnen und Schülern)
- Wie sind Verpackungskartons aus Wellpappe aufgebaut?
- Wie viel Belastung halten Kartons stand? (z. B. Brückenexperiment mit verschiedenen Kartonstücken durchführen)
- Wie konstruiert man einen Bogen in der Architektur (Brücke, Kirchengewölbe o. Ä.)

Das Experiment 3 ist eine Steilvorlage für einen darüber hinausführenden Brückenbauwettbewerb. Ziel ist es, die eigene Papierbrücke so zu optimieren, dass sie einer maximalen Belastung standhält. Dabei könnte einerseits vom hier vorgegebenen gefalteten Modell ausgegangen werden oder der Brückentypus ganz frei gelassen und möglicherweise auch andere Materialien zugelassen werden. Die Rahmenbedingungen müssen natürlich im Vorwege klar abgesprochen werden. Die Schülerinnen und Schüler beschäftigen sich also mit verschiedenen Brückenkonstruktionen und können sich von realen Beispielen inspirieren lassen. Vielleicht haben sie auch selbst einmal eine Brücke überquert, die sie beeindruckend fanden. Der kompetitive Stil dieser Forscherfrage ist besonders motivierend. Sie könnten die Eigenkonstruktionen der Schülerinnen und Schüler in der Schule ausstellen und würdigen, falls es dafür eine Möglichkeit gibt.

Wenn man einmal genau darauf achtet, fällt erst auf, wie viel Wellpappe heutzutage in unserem Alltag vorkommt. Es ist überaus spannend, die Pappe verschiedener Versandkartons und Verpackungen näher zu untersuchen. Da Papiermüll meistens trocken und kaum dreckig ist, lassen sich auch verschiedene Pappen aus dem Papiermüll heraussuchen. Im Supermarkt wird man ebenfalls gut fündig. Beim Auseinandersortieren der verschiedenen Wellpappenarten steht immer die Frage im Mittelpunkt, was genau damit verpackt wurde und warum diese Wellpappenart verwendet wurde. Hierfür ist eine grobe Charakterisierung der Wellpappe völlig ausreichend (1-wellig, 2-wellig, 3-wellig, grobe Unterscheidung der Wellenhöhe). Die genaue Typisierung von Wellpappen ist sehr ausführlich in der DIN-Norm 55468 geregelt. Es finden sich natürlich Übersichten im Internet.

Mit den gesammelten Wellpappen könnten noch weitere Belastungstests im Stil von Experiment 3 durchgeführt werden. Leider ist es kaum möglich, die Ergebnisse der eigenen Belastungstests mit den von der Wellpappenindustrie vorgegebenen Werten zu vergleichen. Die Testverfahren zur Qualitätskontrolle in der Industrie und die Variablen (Kantenstauchwiderstand, Durchstoßarbeit, Berstfestigkeit) sind für die Schülerinnen und Schüler zu komplex.

Die Konstruktion eines Bogens in der Architektur ist ein spannender Kontext, der über den üblichen naturwissenschaftlichen Unterricht in der Regel hinausgeht und eher in technischen Schulen vorkommt. Die Schülerinnen und Schüler könnten sich beispielsweise von ChatGPT eine Konstruktionsanleitung vorgeben lassen, da diese im Vergleich zur Fachliteratur leichter verständlich ist. Sie könnten alternativ Konstruktionsvideos im Internet anschauen. Es gibt spannende Dokumentationen zu bedeutenden Bauwerken, z. B. eine mehrteilige Arte-Dokumentation zum Wiederaufbau von Notre Dame, in der insbesondere das Gewölbe näher analysiert wird und sehr anschauliche 3D-Animationen eingeblendet werden. Vielleicht fühlen sie sich angeregt, alte Urlaubsfotos durchzuschauen und die Konstruktion der selbst besichtigten Bauwerke nachzuvollziehen.

Weiterführender Lektüre-Hinweis für Sie selbst und Schülerinnen und Schüler ab 16 Jahren: Der Roman „Die Säulen der Erde“ von Ken Follett. Der Leser taucht tief ein in die Kirchenarchitektur (und viel mehr).

Ein freundlicher Dank geht an die Papierfabrik Meldorf GmbH & Co. KG, insbesondere an Herrn Heinz Kührt, der uns eine sehr informative und interessante Werksbesichtigung ermöglicht hat.

Ein weiterer freundlicher Dank geht an das Wellpappenwerk Lünnewell GmbH und unseren Ansprechpartner Herrn Malte Langhoff für die umfangreichen Informationen zum Thema Wellpappe.

D1 Literatur

- Asselborn, W.; Jäckel, M. et al. [Hg.]. (2013): Chemie heute – Sekundarbereich I Gesamtband. Schroedel.
- Berger, U. (2009): Die Papier-Werkstatt – Spannende Experimente mit Papier und Pappe. Velber.
- Binnewies, M.; Finze, M. et al. (2016): Allgemeine und anorganische Chemie. Springer Spektrum.
- Brown, T. L.; LeMay, H. E.; Bursten, B. E.; Bruice, P. Y. (2013): Chemie für die gymnasiale Oberstufe. Pearson.
- Campbell, N. A.; Reece, J. B. et al. (2016): Campbell Biologie – Gymnasiale Oberstufe. Pearson.
- Francolini, I.; Galantini, L.; Rea, F.; Di Cosimo, C.; Di Cosimo, P. (2023): Polymeric Wet-Strength Agents in the Paper Industry: An Overview of Mechanisms and Current Challenges. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/11/9268>.
- Grehn, J.; Krause, J. (2020): Metzler Physik. Westermann.
- Jugla, C.; Guichard, J. (2020): Mein kleines Labor – Experiment Papier. Bohem Press AG.
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur des Landes Schleswig-Holstein (2022): Fachanforderungen Chemie.
- Ruppersberg, K.; Rautenstrach, H.; Proske, W. (2022): Kohlenhydratnachweise im Chemieunterricht – welche werden im Unterricht gelehrt, welche sollten gelehrt werden? Kohlenhydrat-Nachweise im experimentellen Chemieunterricht unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten. Supplement zum Hauptartikel „Welcher Zucker ist in der Probe?“. Nachrichten aus der Chemie. Band 70/ Nr. 2., Wiley-Verlag, hier S. 13-15.
- Saager, N.; Hamelmann, T.; Friedrich, M. (2022): Folge 23 „Ein unbeschriebenes Blatt“, in: Sag mal, du als Chemiker. Der Podcast. Staffel 1. Audible originals.
- Serges Medien (2000): Grundstock des Wissens.
- Wellenreuther, F.; Krüger, M.; Busch, M.; Detzel, A. (2022): Aktualisierte Ökobilanz von Grafik- und Hygienepapier. Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierte-oekobilanz-von-grafik-hygienepapier>.
- Zeeck, A.; Grond, S. et al. (2014): Chemie für Mediziner. Urban & Fischer.

D2 Linksammlung

Papier ist nicht gleich Papier!

- <https://www.wellpappe-wissen.de/wissen/papier/papierherstellung/geschichte-der-papierherstellung.html>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Papier>
- <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier#vom-papier-zum-altpapier>
- <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriestoffe/holz-zellstoff-papierindustrie/zellstoff-papierindustrie#anlagenbestand-in-deutschland>
- <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/ressourcenschonung/papier/30384.html>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Holzwirtschaft#Nachhaltige_Holznutzung
- https://de.wikipedia.org/wiki/Forest_Stewardship_Council
- <https://www.iwd.de/artikel/papierindustrie-klimaschutz-ist-wichtiges-thema-523846/>
- https://www.upmpaper.com/siteassets/files/sustainability/upm_making_paper_brochure_de_press.pdf
- <https://www.br.de/radio/bayern1/inhalt/experten-tipps/umweltkommissar/duerfen-feuchttuecher-in-die-toilette100.html>
- <https://www.rossmann.de/de/gesundheit/ratgeber/feuchtes-toilettenpapier>

Frisch gestärkt

<https://de.wikipedia.org/wiki/St%C3%A4rke>
<https://de.wikipedia.org/wiki/Amylose>
<https://de.wikipedia.org/wiki/Amylopektin>
<https://www.seilnacht.com/Lexikon/orgstaer.html>
<https://hp.vcoe.or.at/web/images/artikel/verband/chemietage/WS06.pdf>
<https://de.wikipedia.org/wiki/Iodprobe>
<https://de.wikipedia.org/wiki/Iod-Kaliumiodid-L%C3%B6sung>
<https://www.apotheken-umschau.de/medikamente/beipackzettel/betaisodona-loesung-448947.html>
<https://de.wikipedia.org/wiki/Povidon-Iod>
<https://www.pharmawiki.ch/wiki/index.php?wiki=Lugolsche%20L%C3%B6sung>
<https://de.wikipedia.org/wiki/Banknote>
<https://bankenverband.de/verbraucher/so-erkennen-sie-falschgeld/>
<https://de.wikipedia.org/wiki/Cellulose>

Die Welle macht's

<https://www.medewo.com/blog/at/produkte/wissenswertes-ueber-wellpappe-5-fragen-5-antworten/>
<https://blog.ratioform.de/wie-stark-kann-pappe-sein-ein-experiment/>
<https://www.planet-wissen.de/technik/werkstoffe/papier/pwiewellpappe100.html>
<https://palamo.com/blogs/materialkunde/biegesteife-packmittel-aus-wellpappe>
<https://www.wellpappe-wissen.de/wissen/wellpappe/bauprinzip/erfindung-der-wellpappe.html>
<https://www.wellpappe-wissen.de/wissen/qualitaetssicherung/gepruefte-qualitaet/qualitaetskontrolle.html>
<https://zimmerer-treff.com/storage/BSWALSzt/wrl-m/bogen/bogen.htm>
https://www.bernd-nebel.de/bruecken/index.html?/bruecken/6_technik/bogen/bogen.html
<https://www.forumtraiani.de/roemische-aquaedukte-technische-meisterleistung/>
<https://www.planet-wissen.de/kultur/architektur/bruecken/pwiepontdugard100.html>
<https://www.provence-info.de/sehenswuerdigkeiten/aquaedukt-pont-du-gard/>

D3 Bildnachweise

Bildnachweis zu Abbildungen B2.1-B2.15:

Fotos: M. Hänel, IPN

Bildnachweis zu Abbildungen B3.1-B3.22:

B3.1-B3.4  unter public domain

URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Papier#Erfindung_des_Papiers

B3.5 Abbildung mit freundlicher Genehmigung vom NABU (NABU/sichtagitation)

URL: <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/ressourcenschonung/papier/30384.html>

B3.6 Francolini, I.; Galantini, L.; Rea, F.; Di Cosimo, C.; Di Cosimo, P. (2023): Polymeric Wet-Strength Agents in the Paper Industry: An Overview of Mechanisms and Current Challenges.

URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/11/9268>

B3.7 Abbildung mit freundlicher Genehmigung von UPM-Kymmene: So entsteht Qualitätspapier, S. 14.

URL: https://www.upmpaper.com/siteassets/files/upm_making_paper_brochure_de_press.pdf

B3.8 & B3.9 Fotos: M. Hänel, IPN; mit freundlicher Genehmigung von Papierfabrik Meldorf GmbH & Co. KG

B3.10 Abbildung mit freundlicher Genehmigung von bifa Umweltinstitut GmbH

URL: <https://www.bifa.de/publikationen/bifa-texte/pdf/bifa-text-nr-70-nachhaltiger-papierkreislauf-eine-faktenbasis-pdf/>

B3.11 - links: Roland Mattern lizenziert nach GFDL

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Amylose#/media/Datei:Amylose5.svg>

- rechts: NEUROtiker unter public domain

URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Amylopektin#/media/Datei:Amylopektin_Haworth.svg

B3.12 repro by H. Grobe lizenziert unter CC BY 3.0 (unveränderte Datei)

URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:050euro-uv.jpg?uselang=de>

B3.13 NEUROtiker unter public domain

URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Cellulose#/media/Datei:Cellulose_Sessel.svg

B3.14 Emmanuel Bellman unter freier Pixabay-Lizenz

URL: https://pixabay.com/de/users/emanuel1901-2110335/?utm_source=link-attribution&utm_medium=referral&utm_campaign=image&utm_content=1221391

B3.15-B3.17 Abbildungen mit freundlicher Genehmigung von MEDEWO GmbH

URL: <https://www.medewo.com/blog/at/produkte/wissenswertes-ueber-wellpappe-5-fragen-5-antworten/>

B3.18 Skizze: C. Akkus

B3.19 & B3.20 Abbildung und Foto mit freundlicher Genehmigung von A. Winkler (www.Zimmerer-Treff.com)

URL: <https://zimmerer-treff.com/storage/BSWALSzt/wrl-m/bogen/bogen.htm>

B3.21 & B3.22 Fotos: M. Hänel, IPN

Bildnachweis zu Abbildung C1:

Foto: M. Hänel, IPN