Journal für Didaktik der Naturwissenschaften und der Mathematik (P/S)
Juni 2018, Vol.2, pp. 54-71

Back to nature: Wie bioaktive Substanzen aus Aloe vera und Opuntia ficus-indica (Feigenkaktus) wirken

Back to nature: The effects of bioactive compounds from Aloe vera and Opuntia ficus-indica (prickly pear cactus)

Melanie Beudels & Angelika Preisfeld

Zusammenfasssung

Sukkulenten kennt jeder. Aber wer weiß, dass diese interessante bioaktive Substanzen enthalten und daher als Heilpflanzen wirksam sein können? Am Beispiel von *Aloe vera* und *Opuntia ficus-indica* (Feigenkaktus) werden zell- und molekularbiologische Wirkungsmechanismen jener Substanzen für den handlungsorientierten, forschungsnahen Biologie-Oberstufenunterricht dargestellt.

Schlüsselwörter: Angewandte Zell- und Molekularbiologie im Biologieunterricht, bioaktive Substanzen, *Aloe vera*, *Opuntia ficus-indica* (Feigenkaktus)

Abstract

Everyone knows succulents. But who knows that they can act as medical plants synthesizing interesting bioactive compounds? Activity-oriented, research-related biology lessons for senior grades are developed using the example of Aloe vera and Opuntia ficus-indica (prickly pear cactus) to demonstrate cytological and molecular biological effects of their bioactive compounds.

Keywords: Applied Cell and Molecular Biology in biology lessons, bioactive compounds, *Aloe vera*, *Opuntia ficus-indica* (prickly pear cactus)

1 Einleitung

Viele Pflanzen oder Pflanzenbestandteile werden schon seit Jahrtausenden von den Menschen nicht nur als Nahrungsmittel, sondern auch als natürliche Arzneimittel verwendet. Als Beispiele seien die Kamille mit den ätherischen Ölen, die Ringelblume mit den Flavonoiden oder die Weidenrinde mit dem Salicin, das der Acetylsalicylsäure ähnlich ist, genannt.

Im Verlauf der letzten Jahrzehnte ist das Interesse an pflanzlichen Arzneimitteln aus verschiedenen Gründen deutlich größer geworden. Zum einen gibt es eine Reihe von Krankheiten oder Unverträglichkeiten, für die spezifische Heilmethoden noch fehlen. Zum anderen stoßen bisherige Medikamente der klassischen Schulmedizin oftmals an ihre Grenzen, weil sie z.B. zu starke Nebenwirkungen haben oder nur ein Symptom bekämpfen (Dehbi et al., 2013; Meyer et al., 2005; Osuna-Martínez et al., 2014).

Vielen ist nicht bekannt, dass auch Sukkulenten, wie der Feigenkaktus (Opuntia ficus-indica) oder die Aloe vera, Substanzen enthalten, die auf den Körper von Menschen und Tieren sowohl positive als auch negative Wirkungen haben können, also bioaktiv sind. Als Energielieferanten oder Zellbausteine werden diese bioaktiven Komponenten, darunter sekundäre Pflanzenstoffe und Enzyme, vom Menschen hingegen nicht benötigt. Die Erforschung ihrer genauen molekularen Wirkungsmechanismen - einzeln und im Zusammenspiel miteinander - wird noch viel Zeit in Anspruch nehmen. Klar ist jedoch, dass isolierte bioaktive Stoffe (z.B. in Pillenform) keine Alternative zu frischen Pflanzen oder Obst und Gemüse darstellen (Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V., 2014; Verbraucherzentrale Bundesverband, 2016).

In diesem Beitrag werden exemplarisch zwei Sukkulenten - die “berühmte“ Aloe vera und der Feigenkaktus - mit ihren bioaktiven Substanzen und potenziellen Wirkungen benutzt, um Lernenden die Möglichkeit zu geben, sich

anhand von bekannten Beispielen die vielfältigen Möglichkeiten von Pflanzeninhaltsstoffen zu erschließen.

2 Aloe vera

2.1 Biologie und Verbreitung

Die *Aloe vera* (L.) Burm.f. ist seit Jahrtausenden als Heilpflanze bekannt. Schon im alten Ägypten und Rom wurde sie zur Hautpflege und Beschleunigung der Wundheilung eingesetzt. Zur Gattung Aloe werden über 500 Arten gezählt. Nach neueren genetischen Analysen gehört Aloe nicht mehr zu der Familie der Liliengewächse (Liliaceae), sondern zur Familie der Grasbaumgewächse (Xanthorrhoeaceae) und der Unterfamilie der Affodillgewächse (Asphodeloideae) (Grace et al., 2015; Lowther et al., 2012; Sacan et al. 2017).
Die kaktusähnlich aussehende Pflanze, die von Laien auch häufig mit Agaven verwechselt wird, ist gekennzeichnet durch rosettenartig angeordnete, fleischige, lanzettförmige Laubblätter, die grün-grau gefärbt sind und durch Sonneneinstrahlung ihre Blattfarbe in Richtung rosa ändern können (s. Abbildung 1). Alle Blattränder sind mit kleinen, weiß- bis rosafarbenen "Zähnen" besetzt (s. Abbildung 2). Die gelben, orangefarbenen oder roten, röhrenförmigen Blüten treten in großen, traubenförmigen Blütenständen auf (Kammoun et al., 2011).
Vor ca. 16 Millionen Jahren entstand die Gattung Aloe in Südafrika. Von dort aus verbreiteten und diversifizierten sich diese Pflanzen, sodass sie heute nicht nur in trockenen und heißen Klimazonen der Welt zu finden sind, sondern auch in tropischen und subtropischen Gebieten.

Abbildung 1: *Aloe vera* Pflanzen im Botanischen Garten von Gran Canaria. Durch die starke Sonneneinstrahlung hat sich die Farbe der äußeren Blätter von grün-grau zu rosa geändert.

Foto: Beudels

Abbildung 2: *Aloe vera* von oben. Gut zu erkennen sind die am Blattrand befindlichen "Zähne".

Foto: Beudels

Vor ca. 16 Millionen Jahren entstand die Gattung Aloe in Südafrika. Von dort aus verbreiteten und diversifizierten sich diese Pflanzen, sodass sie heute nicht nur in trockenen und heißen Klimazonen der Welt zu finden sind, sondern auch in tropischen und subtropischen Gebieten. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Aloe vera ihren Ursprung auf der arabischen Halbinsel hat. Ihre immense Marktdominanz im Vergleich zu anderen Aloe-Arten ist nicht nur durch ihre phytochemischen Eigenschaften zu erklären, sondern auch damit, dass sie in ihrer frühen Geschichte in der Nähe wichtiger historischer Handelsruten kultiviert wurde und somit den Menschen seit Langem bekannt ist (Grace et al., 2015).

2.2 *Aloe vera*-Saft und *Aloe vera*-Gel

Aloe vera-Produkte liegen im Trend. Ihr Einsatzgebiet reicht von kosmetischen Artikeln wie Hautcreme, Seife und Shampoo über pharmazeutische Produkte wie Wundsalben und Gelpräparate bis zu funktionellen Lebensmitteln („Functional food"/Nutraceuticals), die mit zusätzlichen, angeblich gesundheitsfördernden Inhaltsstoffen angereichert sind (Das Erste, 2017). Wegen der hohen Nachfrage (mehr als 1 Milliarde Liter Blatt-Gel in 2012) wird Aloe vera sogar in großen Mengen auf Plantagen z.B. in subtropischen Regionen der USA kultiviert. Problematisch dabei ist die Tatsache, dass Aloen nicht in der Lage sind, sich selbst zu befruchten und dass die männliche Sterilität hoch ist. Aloe-Pflanzen werden daher größtenteils asexuell durch vegetative Vermehrung kultiviert (Lowther et al., 2012; Nejatzadeh-Barandozi, 2013).

Die Aloe vera ist eine Blattsukkulente, d.h. sie bildet in ihren Blättern ein dickes Wasserspeicherungsgewebe aus, um in trockenen Regionen, in denen es wenig oder sehr unregelmäßig regnet, überleben zu können. Um die industrielle und medizinische Nutzung der Aloe vera-Blätter nachvollziehen zu können, ist es hilfreich, das Blatt gedanklich in zwei Bestandteile zu gliedern: in die äußere grüne "Rinde" (Epidermis und Palisadenparenchym inklusive der Leitbündel) und in das innere, farblose Speicherparenchym, das oft auch Mark oder Blatt-Gel genannt wird (s. Abbildung 3) (Hammam, 2010; Nejatzadeh-Barandozi, 2013).
Die Bündelscheidenzellen in der Rinde der Blätter produzieren einen intensiv bitteren, gelben Milchsaft, der aufgrund der in ihm enthaltenen Anthracenderivate wie Aloin und Anthrachinon stark abführend wirkt. Dieser Milchsaft wird i.d.R. extrahiert und anschließend in Puderform verkauft. Das Mark umfasst den dickfleischigen Teil des Blattes mit den Zellwänden und Zellorganellen des Speicherparenchyms. Oft auftauchende Begriffe wie Gel oder Schleim beziehen sich dagegen auf die viskose, klare Flüssigkeit innerhalb der großen, dünnwandigen Zellen dieses Speicherparenchyms (Meyer et al., 2005; Vogler & Ernst, 1999).

Abbildung 3: Querschnitt durch ein *Aloe vera*-Blatt. Im Inneren ist das farblose Gel zu erkennen.

Foto: Beudels

Die meisten kosmetischen und medizinischen Aloe vera-Produkte enthalten dieses Blatt-Gel oder aber Extrakte daraus, da die erwähnten Komponenten des bitteren Milchsaftes neben ihrer abführenden Wirkung auch z.B. allergische Reaktionen der Haut herbeiführen können (Verbraucherzentrale Bundesverband, 2017).
Das Gel, welches zu 99 % aus Wasser besteht, enthält mindestens 75 bioaktive Substanzen, darunter Aminosäuren, weitere organische Säuren, Proteine (meist Glykoproteine und Enzyme), Kohlenhydrate, Mineralien, Steroide und Vitamine (sehr geringe Mengen). Als zweithäufigste Substanzen nach Wasser folgen Mucopolysaccharide wie Acemannan und Glucomannan, die als Wasser-bindende Moleküle für die Wasserspeicherfähigkeit des Blattes und damit für die schleimartige Konsistenz des Gels verantwortlich sind (Bhalang & Tompkins, 2015; Vogler & Ernst, 1999).

2.3 Wirkungen der bioaktiven Substanzen

Die Liste der postulierten, positiven Wirkungen von Aloe vera auf den menschlichen Organismus ist lang. Viele der in Kasten 1 aufgeführten Effekte wurden seit den 1930er Jahren durch in vitro und in vivo Experimente an Tieren und Menschen bestätigt (z.B. antioxidative Eigenschaften der enthaltenen Polyphenole). Andere - wie z.B. die antikanzerogene Wirkung - wurden noch nicht verifiziert, da die meisten molekularen Mechanismen, die diese Wirkungen hervorrufen, noch unzulänglich erforscht sind. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass viele der zellulären und organismischen Effekte durch ein Zusammenspiel mehrerer bioaktiver Substanzen der Pflanze ausgelöst werden (Finberg et al., 2015; Hammam, 2010; Kammoun et al., 2011).

Hinreichend untersucht hingegen sind die dermatologischen Wirkungen des Blatt-Gels, dessen topische Anwendung als sehr sicher gilt (keine/wenige Nebenwirkungen bekannt): Aufgrund des hohen Wassergehalts spendet es der Haut viel Feuchtigkeit. Bei Brandwunden, Sonnenbrand und anderen Strahlungsschäden kühlt es die Haut und fördert u.a. die Zellerneuerung. Im Gel enthaltene Carboxypeptidasen und Salicylate deaktivieren z.B. das Peptidhormon Bradykinin, welches an der Regulation von Entzündungsprozessen im menschlichen Körper beteiligt ist und zu einer erhöhten, lokalen Schmerzempfindlichkeit führt. Das Blatt-Gel besitzt somit auch eine schmerzlindernde Wirkung (Finberg et al., 2015; Meyer et al., 2005).

Das langkettige Zuckermolekül Acemannan, welches aus einer Kette acetylierter Mannose-Einheiten in β-1,4-glykosidischer Bindung aufgebaut ist, wurde als eines der wichtigsten bioaktiven Komponenten des Gels identifiziert.

Durch die Aktivierung von Wachstumsfaktoren stimuliert es die Proliferation von Epithelzellen und Fibroblasten, die bei der Wundheilung eine entscheidende Rolle spielen. Zudem wird die Kollagen- und Glykosaminoglykansynthese induziert. Beide Moleküle sind wichtige Bestandteile der extrazellulären Matrix des Bindegewebes (Bhalang & Tompkins, 2015; Xing et al., 2015).
Acemannan hat zudem auch antibakterielle, antimykotische und das Immunsystem-stimulierende Eigenschaften. Es wird davon ausgegangen, dass Makrophagen - die zu den "Fresszellen" des Immunsystems gehören - aktiviert werden, indem Rezeptoren auf ihrer Oberfläche endständige Mannose-Monomere als "fremd" und damit als gefährlich für den Körper erkennen, da dieses Monomer am Ende von Polysacchariden im Menschen sehr selten vorkommt. Innerhalb der Makrophagen werden durch die Aktivierung zahlreiche Signalkaskaden ausgelöst, z.B. kommt es zu einer verstärkten Produktion und Freisetzung von inflammatorischen Cytokinen (Eiweiße, die z.B. andere Zellen des Immunsystems aktivieren) und Stickstoffmonoxid (bewirkt die Ausweitung von Blutgefäßen) (Bhalang & Tompkins, 2015; Xing et al., 2015).

Postulierte Wirkungen der *Aloe vera*:

- dermatologische Wirkungen: feuchtigkeitsspendend, hautberuhigend, die Wundheilung fördernd, zellerneuernd, Behandlung von Verbrennungen, Schuppenflechte, Neurodermitis
- schmerzlindernd
- antiinflammatorisch
- das Immunsystem stimulierend
- antibakteriell und antimykotisch
- antidiabetisch (z.B. Blutzuckerspiegel-senkend)
- antiarthritisch
- antikanzerogen
- antioxidativ
- stark abführend (Milchsaft der Blattrinde)

Kasten 1: Postulierte Wirkungen der *Aloe vera* auf den menschlichen Organismus (zusammengestellt nach Bhalang & Tompkins, 2015; Finberg et al., 2015; Meyer et al., 2005; Vogler & Ernst, 1999).

3 Der Feigenkaktus

3.1 Biologie, Verbreitung und Nutzung

Bei Urlauben im Mittelmeerraum fallen einem des Öfteren große strauch- bis baumartige Kakteen auf, die aus vielen Sprossgliedern bestehen, deren scheinbare "Blätter" mit Dornen und an den Rändern mit feigenähnlichen Früchten besetzt sind (s. Abbildung 4).

Abbildung 4: Oben: Feigenkaktus (*Opuntia ficus-indica*) auf Gran Canaria. Unten: Kladodie mit Areolen, aus denen Dornen und Glochiden entspringen. Zudem sind die Früchte zu erkennen.
Fotos: Beudels

Abbildung 5: Gelbe Blüte des Feigenkaktus.
Foto: Beudels

Abbildung 6: Dornen und Glochiden der Areolen eines Feigenkaktus in Tunesien. Zu sehen sind zusätzlich zwei sich entwickelnde Früchte, die Kaktusfeigen genannt werden.
Foto: Beudels

Gemeint ist der Feigenkaktus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill; engl. prickly pear cactus), welcher ursprünglich aus Mexiko stammt und dort seit Langem sowohl als traditionelles Nahrungsmittel dient, als auch als Medizin gegen zahlreiche Krankheiten eingenommen wird. Sogar im Staatswappen dieses Landes ist er abgebildet. Heutzutage kann man ihn in den meisten ariden und semiariden Gebieten der Welt, wie den südlichen USA, Südamerika und Australien, aber auch im Mittelmeerraum finden (Wickert, 2006; Yahia & Mondragon-Jacobo, 2011).
Die scheinbaren "Blätter" sind - wie bei anderen Stammsukkulenten - in Wirklichkeit abgeflachte, grüne Sprossglieder (Flachsprosse), die Kladodien genannt werden. Auf diesen befinden sich lange Dornen (s. Abbildung 6; andere Opuntien-Art), die den Blättern einer Pflanze homolog und bei Opuntia ficus-indica unauffällig sind oder auch vollständig fehlen können, was die Nutzbarmachung der Kladodien erleichtert. Die Dornen entspringen den als Areolen bezeichneten kissenartigen Bereichen, die reduzierten, im Wachstum stehengebliebenen Seitensprossen entsprechen. Aus diesen wachsen zudem noch Büschel aus kurzen, borstenähnlichen Widerhaken - die Glochiden - heraus (s. Abbildung 6). Sowohl Dornen als auch Glochiden dienen dem Schutz vor Fraß und Beschädigung. Hauptbestandteil der Flachsprosse ist mit 80-95% Wasser, gefolgt von kleinen Mengen an Kohlenhydraten bzw. Ballaststoffen, Proteinen, Säuren, Mineralien und bioaktiven Substanzen (s. Kap. 3.2). Junge Kladodien werden häufig roh als Salat verspeist, eingemacht oder z.B. in Aufläufen verwendet (Hegwood, 1990; Osuna-Martínez et al., 2014; Shedbalkar et al., 2010; Wickert, 2006).

Die ovalen, etwa hühnereigroßen Früchte (s. Abbildung 7), die Kaktusfeigen genannt werden und aus den großen, gelb bis rot gefärbten Blüten (s. Abbildung 5) hervorgehen, sind nur am Rand der Kladodien zu finden (s. Abbildung 4). Auch die Epidermis der Fruchtschale bildet Areolen mit Dornen und Glochiden, die vor dem Verzehr entfernt werden müssen. Kaktusfeigen, die man zu den Beeren zählt, variieren je nach Anbauort, Erntezeit sowie Kultivar in ihrer Größe, Farbe (weiß-gelb über gelb-grün bis orange und dunkelrot), Gestalt und stofflichen Zusammensetzung (Piga, 2004; Shedbalkar et al. 2010; Wickert, 2006).
Allen Früchten ist jedoch gemeinsam, dass sie in ihrem saftigen Mark, das von einer dicken Fruchtschale umgeben ist, viele dunkle, harte Samen enthalten, die essbar sind. Das Mark besteht zu 85-90% aus Wasser und schmeckt aufgrund des hohen Zucker- (ca. 14%; hauptsächlich Glucose und Fructose) und des sehr geringen Säuregehalts mild und süß. Ein Detail, welches viele Verbraucher nicht kennen, ist, dass der Vitamin C-Gehalt dieser Frucht höher ist als z.B. von Äpfeln, Trauben oder Bananen. Zudem ist sie reich an Mineralstoffen wie Calcium und Magnesium und enthält viele freie Aminosäuren (besonders Prolin, Glutamin und die nicht-proteinogene Säure Taurin) (Piga, 2004; Wickert, 2006; Yahia & Mondragon-Jacobo, 2011).

Kaktusfeigen werden vor allem frisch, aber auch als Trockenfrucht verzehrt und außerdem zur Honig- und Marmeladenherstellung verwendet. Der Saft aus der Frucht dient dem Süßen und Aromatisieren von Erfrischungs- und

Gesundheitsgetränken. Außerdem werden die aus der Frucht extrahierten Farbpigmente, die zu den Betalainen gehören und die Fruchtschale und das Mark rot, orange oder gelb färben, zur natürlichen Farbgebung oder als Additive in vielen kosmetischen und pharmazeutischen Produkten sowie in Nahrungsmitteln benutzt (Piga, 2004; Shedbalkar et al., 2010; Wickert, 2006).

Abbildung 7: Rote und gelbe Früchte des Feigenkaktus. Zu erkennen ist das rot gefärbte, fleischige Mark mit den enthaltenen Samen.

Foto: Beudels

3.2 Bioaktive Substanzen des Feigenkaktus

Seit einigen Jahren steht der Feigenkaktus im Fokus weltweiter, wissenschaftlicher Forschung, weil in ihm bioaktive Komponenten gefunden wurden, die u.a. antioxidative Eigenschaften haben. Die meisten wissenschaftlichen Studien zu den Effekten des Feigenkaktus wurden bisher in seinem Heimatland Mexiko durchgeführt, in dem auch schon die Azteken Teile dieser Pflanze für heilende Zwecke nutzten.
In der traditionellen mexikanischen Volksmedizin werden die Kladodien meist im gekochten oder getrockneten Zustand zur Vorbeugung von chronischen Erkrankungen wie Diabetes mellitus Typ II, Bluthochdruck oder Hypercholesterinämie (erhöhter Cholesterinspiegel im Blutplasma) eingesetzt. Experimente und klinische Studien zeigen, dass die in den Flachsprossen enthaltenen Pektin-ähnlichen Polysaccharide (Ballaststoffe für den Menschen), die der Pflanze als komplexes dreidimensionales Netzwerk zur Wasserspeicherung dienen, mit für diese Wirkungen verantwortlich sind. Neben ihrer Fähigkeit als Ballaststoffe das Sättigungsgefühl zu erhöhen, kommt es u.a. durch ihre Fähigkeit Fett zu binden, welches mit dem Stuhl ausgeschieden wird, bei regelmäßigem Verzehr zu einer Reduzierung des Triglycerid- und Cholesterinspiegels im Blut. Zudem wird der Blutzuckerspiegel - vermutlich durch eine erhöhte Insulinausschüttung - gesenkt. Aus den Blüten des Feigenkaktus werden Tees gegen Prostata- und Blasenbeschwerden hergestellt. Ein regelmäßiger Verzehr der Früchte hilft z.B. durch die oben erwähnten hohen Konzentrationen an Calcium und Magnesium dabei, einer Osteoporose oder Muskelkrämpfen beim Sport vorzubeugen (Hegwood, 1990; Osuna-Martínez et al., 2014; Shedbalkar et al., 2010; Wickert, 2006).
Wie die beschriebenen Effekte jedoch auf zellulärer und molekularer Ebene zustande kommen und welche Substanzen genau dafür verantwortlich sind, ist in vielen Fällen noch ungeklärt. Nachfolgend wird auf die antioxidativen Komponenten und ihre Wirkungen eingegangen, da in diesem Bereich schon viele Studien durchgeführt wurden, die zeigen, dass es einen positiven Zusammenhang zwischen einer Feigenkaktus-reichen Ernährung und einem reduzierten Risiko für Krankheiten, die mit oxidativem Stress assoziiert sind, gibt (Osuna-Martínez et al., 2014).

Oxidativer Stress tritt auf, wenn die Bildung von Prooxidantien (Substanzen, die in der Lage sind, Biomoleküle zu oxidieren) bzw. reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) die Kapazitäten einer Zelle, sich selbst mithilfe antioxidativer Abwehrsysteme zu schützen, stark übertrifft. Unsere aerobe Lebensweise bedingt, dass wir zur Energiegewinnung Sauerstoff aus der Luft benötigen, um Moleküle aus der Nahrung zu oxidieren. Oxidation - d.h. der Transfer von einem oder mehreren Elektronen von einem Molekül auf ein anderes (Redoxreaktion) - lässt sich auch im Alltag oft beobachten: Apfelscheiben werden braun, Eisen rostet und Butter wird nach langer Zeit an der Luft ranzig. Während der Zellatmung, die in den Mitochondrien abläuft, entweichen bei der Elektronenübertragung der Atmungskette kontinuierlich einzelne, ungepaarte Elektronen. Dadurch können freie Sauerstoffradikale entstehen, die sehr reaktiv sind, weil sie durch ungepaarte Elektronen “unvollständig“ sind. Um wieder “vollständig“ zu werden, greifen sie andere Moleküle willkürlich an und entreißen ihnen ein Elektron, sodass sie nun auch zu einem Radikal werden. Eine gefährliche Kettenreaktion wird ausgelöst, die dazu führen kann, dass viele essentielle Biomoleküle der Zelle - darunter Lipide der Zellmembran, DNA und Proteine - stark beschädigt werden. Es kommt beispielsweise zu Doppelstrangbrüchen und

Mutationen der DNA, Proteine denaturieren und Plasma- sowie Organellenmembranen werden stark geschädigt. Die Zellschädigungen oder auch der teilweise resultierende Zelltod (Apoptose oder Nekrose) sind mit zahlreichen degenerativen, chronischen Krankheiten assoziiert: Es kann z.B. zu Krebs, kardiovaskulären Erkrankungen und Alterungsprozessen kommen. Exogene Faktoren wie Rauchen, Umweltgifte und UV-/ Röntgen-Strahlung sorgen für eine Erhöhung des oxidativen Stresses.
Neben den Mitochondrien bzw. oxidativen Enzymen als Hauptquelle der ROS werden freie Radikale aber auch von Fresszellen des Immunsystems ausgeschüttet, um Pathogene zu zerstören, und spielen des Weiteren eine Rolle als Signalmoleküle (Gosslau & Rensing, 2002; Gülçin, 2012).

Die Zellen des Menschen besitzen zur Reduzierung von oxidativen Schäden zahlreiche antioxidative Abwehrmechanismen, die auf drei Ebenen wirken: Vorbeugung, Gegenwirkung und Reparatur bzw. Abbau (z.B. durch DNA-Reparaturenzyme). Auf der Ebene der Gegenwirkung befinden sich antioxidative Enzyme, deren Expression besonders durch oxidativen Stress induziert wird, sowie nicht-enzymatische Antioxidantien, die man u.a. auch im Feigenkaktus gefunden hat (Gosslau & Rensing, 2002; Gülçin, 2012; Stintzing et al., 2012). Besonders im Saft der Frucht konnten zahlreiche antioxidative Moleküle in hohen Konzentrationen nachgewiesen werden. Dies waren neben Vitamin C (L-Ascorbinsäure), das bei Experimenten 30-40% der antioxidativen Kapazität ausmachte, (Poly-)Phenole inklusive der Flavonoide und ganz besonders Betalaine, die den Alkaloiden zugeordnet und aus der Aminosäure Tyrosin synthetisiert werden. Betalaine sind wasserlösliche Farbpigmente, deren primäre Funktion in Pflanzen es ist, Blüten und Früchte zur Anlockung von Insekten und Vögeln für die Bestäubung und Samenverbreitung ansprechend zu färben. Sowohl violett-rot färbende Betacyane (darunter Betanin, das auch die Rote Beete violett tönt) als auch gelb färbende Betaxanthine zeigen antioxidative, antiproliferative sowie antikanzerogene Eigenschaften.
Antioxidantien, die - wie oben ersichtlich wird - chemisch sehr heterogen und komplex sind, inhibieren den oxidativen Prozess, indem sie u.a. ROS abfangen („Radikalfänger“) und mithilfe z.B. ihrer Hydroxylgruppen an den Ringstrukturen ein Wasserstoffatom inklusive seines Elektrons an diese Radikale abgeben. Radikalkettenreaktionen, daraus folgende Zellschäden sowie die Entstehung von Krankheiten können so vermieden werden, denn auch die Antioxidantien werden nach Abgabe des Elektrons direkt mithilfe anderer Moleküle wieder in ihre Ursprungsform zurückgebracht. Es wird davon ausgegangen, dass mehrere Antioxidantien zusammen synergistische Effekte ausüben. Zudem haben klinische Studien gezeigt, dass hohe Dosen an Antioxidantien (z.B. in Form von Nahrungsergänzungsmitteln) aber auch prooxidative Wirkungen haben können (Gosslau & Rensing, 2002; Gülçin, 2012; Osuna-Martínez et al., 2014; Stintzing et al., 2012).

4 Didaktische Überlegungen

4.1 Allgemeine Einordnung des Themas und Ziele

Viele Schülerinnen und Schüler kennen die Aloe vera und den Feigenkaktus aus ihrem Alltag. Letzterer könnte ihnen schon bei Urlauben in subtropischen Ländern aufgefallen sein, die Kaktusfeige kann im Supermarkt gekauft werden und pflegeleichte Aloe-Pflanzen finden sich neben anderen Sukkulenten oft als Zimmerpflanzen auf Fensterbänken wieder oder sind - meist in sehr geringen Mengen - in kosmetischen und medizinischen Produkten enthalten. Mit den Eigenschaften und Wirkungen der in ihnen enthaltenen bioaktiven Substanzen werden sich die SuS in den allermeisten Fällen noch nicht beschäftigt haben.
Am Beispiel dieser beiden Pflanzen sollen die SuS erfahren, dass Makromoleküle sowie zell- und molekularbiologische Abläufe (Wirkung von Enzymen, Proteintranslation, Signalkaskaden, Mutationen), die sie theoretisch im Unterricht behandeln, in allen lebenden Organismen und zu jeder Zeit eine Rolle spielen. Sie werden zudem dazu angeregt, kritisch zu reflektieren, welche zellulären und körperlichen Auswirkungen der regel- und unregelmäßige Konsum von Nahrungsmitteln, pharmazeutischen Produkten oder Kosmetika haben kann. Gleichzeitig wird interdisziplinäres bzw. mehrperspektivisches Denken gefördert, denn die behandelte Thematik verknüpft biologische, chemische sowie medizinische Disziplinen und diverse naturwissenschaftliche Arbeitsweisen. Dieses mehrperspektivische Lernen verhindert durch unterschiedliche Sichtweisen auf eine

Problemstellung träges Wissen, welches im Alltag nicht eingesetzt werden kann und fördert eine flexible, kritische sowie ganzheitliche Erfassung von Lerninhalten (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014, S. 11; Spörhase & Ruppert, 2014, S. 55).
Aufgrund der teilweise anspruchsvollen Inhalte und vorausgesetzter Grundkenntnisse auf dem Gebiet der Zell- und Molekularbiologie wird ein Einsatz der bereitgestellten Unterrichtsmaterialien für die Oberstufe empfohlen. Die fünf Arbeitsblätter (inklusive online-Zusatzmaterial) sind thematisch zweiteilig angelegt. Die Arbeitsblätter 1a bis 1c behandeln die Eigenschaften der Aloe vera im Allgemeinen und die Wirkungen ihres Blatt-Gels im Speziellen. Arbeitsblätter 2a und 2b gehen auf oxidativen Stress in Zellen und Antioxidantien des Feigenkaktus ein. Die Konzeption der Aufgaben, die den Inhaltsfeldern "Biologie der Zelle" (Schwerpunkt; inklusive Biomoleküle und biomedizinische Fragestellungen), "Energiestoffwechsel" (inklusive Enzymatik und Ernährung) sowie "Genetik" (Regelung Transkription, Translation, Signalkaskaden) zugeordnet werden können (beispielhafte Orientierung am Lehrplan NRW Biologie Oberstufe (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014, S. 19-41)), umfasst in der Reihenfolge der Arbeitsblätter steigende Anforderungsniveaus und baut auf erarbeitetes Wissen auf. Eine chronologische Erarbeitung je Thema (1 oder 2; es müssen nicht beide fachlichen Kontexte bearbeitet werden) wird daher empfohlen. Da die angesprochene Thematik kaum Inhalt von Lehrbüchern ist, können die Materialien dazu dienen, als forschungs- und alltagsnahe Ergänzung zu bestimmten Unterrichtsinhalten eingesetzt zu werden. Im Rahmen der Abiturvorbereitung kann mithilfe der Aufgaben gelerntes Basiswissen der oben genannten Inhaltsfelder an neuen Sachverhalten vertieft und trainiert werden. Außerdem bietet sich ein Einsatz in projektartigen Unterrichtsvorhaben (lebensweltliche Relevanz der Biologie z.B. im Kontext der Biomedizin und Volkskrankheiten) oder in Facharbeiten an (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014, S. 12-13). Insgesamt sind alle Arbeitsblätter handlungsorientiert gestaltet: Die Selbsttätigkeit der SuS („Kopf- und Handarbeit") steht im Vordergrund; die Lehrperson tritt als Lernbegleiter/in und -organisator/in auf. Kommunikation, Kooperation und Problemlösen werden durch Partnerarbeit (für alle Arbeitsblätter empfohlen) sowie innerhalb der Ergebnissicherung im Plenum gefördert. Zudem soll die alltags- und forschungsnahe Thematik Schülerinteressen wecken bzw. an sie anknüpfen (Meyer, 2011, S. 395-428).

4.2 Materialien und Unterrichtsanregungen im Detail

Arbeitsblätter zur Wirkung der Aloe vera

Die Arbeitsblätter 1a-c (Aloe vera) sollen den SuS das Konzept der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung näherbringen sowie ihr Fachwissen auf dem Gebiet der Kohlenhydrate (Aufbau, Funktionen), der mit ihnen verknüpften zellulären Signalkaskaden sowie der Enzymatik stärken.
Zum Einstieg in das Gebiet der Pflanzenheilkunde und der bioaktiven Substanzen (Arbeitsblatt 1a) dient ein Videobeitrag der ARD (Das Erste, 2017). Mithilfe des zu erstellenden Steckbriefes eignen sich die SuS Basiskenntnisse über die Aloe vera an, die für die kommenden Aufgabenstellungen nötig sind (Kompetenzerwartungen: Wiedergabe und Systematisierung biologischen Fachwissens (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014, S. 61)). Zudem soll früh die kritische Auseinandersetzung mit Inhaltsstoffen von Produkten geübt werden. Alltagsbezogene Kurzvideos wecken das Interesse und die Aufmerksamkeit der SuS und steigern ihre Motivation, sich mit den Inhalten auseinanderzusetzen (Schulz-Zander, 2005). Im zweiten Teil des Arbeitsblattes vertiefen die SuS ihr Wissen über die Eigenschaften und Wirkungen des Blatt-Gels und lernen die Schritte des naturwissenschaftlichen Erkenntniswegs (von der Forschungsfrage bis zu Schlussfolgerungen) mithilfe eines Selbsterfahrungsexperiments kennen. Um die kognitive, soziale und motorisch-manuelle Handlungskompetenz der SuS zu fördern, ist das selbständige Planen, Durchführen und Auswerten eines Experiments eine sehr wirksame Unterrichtsmethode (Meyer, 2011, S. 318). Es wird Neugierde „auf Mehr" geweckt, die Beobachtungs- und Analysefähigkeit geschult sowie Einblick in naturwissenschaftliche Forschungsmethoden gegeben (Meyer, 2011, S. 313). Biologisch angebaute Aloe vera-Pflanzen, die leicht in ihrer Pflege sind, können für ca. 15 Euro in Gartencentern oder über das Internet

erworben werden. Die Lehrperson sollte vor dem Selbstversuch mit den SuS Sicherheits- und Durchführungsaspekte (mögliche Allergien, Filetieren des Blattes) besprechen und sich mit potenziellen Forschungsfragen der SuS auseinandersetzen. Beispiele hierfür wären: Was passiert mit der Feuchtigkeit beim Verreiben des Gels auf der Haut nach kurzer Zeit? Wie fühlt sich die Haut vorher und nachher an? Was sind die Charakteristika des Gels (Konsistenz, Farbe, Geruch etc.) und wodurch werden sie bedingt? Welche Wirkungen des Gels, die auch im Film beschrieben wurden, kann man aus dem Selbstversuch ableiten?

Anhand des Arbeitsblattes 1b lernen die SuS - dem Selbstversuch nachfolgend - eine bioaktive Komponente des Gels (das Polysaccharid Acemannan) und ihre Wirkung auf menschliche Zellennäherkennen. Der Zusatztext „Kohlenhydrate und ihre Eigenschaften“ (online-Material 1) vermittelt zunächst - falls noch nicht oder wenig im Unterricht behandelt - Basisinformationen über Mono- und Polysaccharide (Inhaltsfeld Biologie der Zelle; Makromoleküle; Zusammenhang Struktur und Funktion (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014, S. 23-24)). Zur Sicherung dient das Ausfüllen einer Tabelle. Aufbauend auf der Bestimmung der Struktur von Acemannan mithilfe zuvor gewonnener Informationen beschäftigen sich die SuS spielerisch (gemeinsames Anordnen und Verschieben der Kärtchen; s. oben: Handlungsorientierung) mit den durch dieses Molekül ausgelösten, zellulären Signalwegen und den körperlichen Auswirkungen. Bei dieser spielerischen Aneignung von Wissensbeständen und einer vertiefenden Hausaufgabe, deren Fokus auf dem Thema Enzymatik (Funktion von Enzymen im Kontext von Signalkaskaden) liegt, können die bestehenden Kenntnisse der SuS anhand eines bisher unbekannten Sachverhaltes vertieft werden (Kompetenzerwartungen: Vernetzung und Recherche (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014, S. 61-63)).

Der Einsatz des Arbeitsblattes 1c kann im Anschluss an die Besprechung der Hausaufgaben geschehen oder das Blatt wird interessierten oder schneller arbeitenden SuS als Zusatzaufgabe ausgegeben. Es behandelt aktuelle Forschungsergebnisse zu dermatologischen Wirkungen des Aloe vera-Gels, welches die SuS durch die vorangegangenen Aufgaben schon näher kennengelernt haben. Ziel ist es, einfache Originalexperimente nachzuvollziehen, die sich am naturwissenschaftlichen Erkenntnisweg (s.o.) orientieren. Die SuS lernen, Forschungsvorgehen und -daten, welche tabellarisch oder stichwortartig dargestellt sind, zu beschreiben, auszuwerten und kritisch zu analysieren. Hier sind hohe Transfer- und Verknüpfungsleistungen gefordert (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014, S. 61-65). Alle drei Arbeitsaufträge sollten daher am Ende in einer Diskussion im Plenum besprochen werden.

Arbeitsblätter zu Opuntia ficus-indica und zu oxidativem Stress

Die Arbeitsblätter 2a und 2b (Feigenkaktus) beschäftigen sich mit anderen bioaktiven Komponenten - den Antioxidantien. Einige SuS werden diesen Begriff schon im Kontext gesunder Ernährung oder von Werbung im Fernsehen bzw. in Apothekenzeitschriften gehört haben. Welche Wirkungen sie auf den menschlichen Körper auch z.B. hinsichtlich ihrer Dosierung haben, ist vielen jedoch weitestgehend unbekannt. Um sich ihrer Wirkungsweise zu nähern, wird in Arbeitsblatt 2a mithilfe der gestellten Aufgaben, die durch das Lesen des Zusatztextes (s. online-Material 2: “Oxidativer Stress in Zellen und Schutzmechanismen des Körpers“) beantwortet werden können, zunächst Basiswissen zur Entstehung von oxidativem Stress, seinen Auswirkungen auf Zellen und Körper sowie zu zellulären Schutzmechanismen vermittelt. Gleichzeitig können beim Ausfüllen der Tabelle Kenntnisse zum Zellaufbau (Lipide/Biomembranen; Proteine/Enzyme und Nukleinsäuren/DNA und RNA) wiederholt werden, und es findet eine Vernetzung zu den Inhaltsfeldern Genetik (Mutationen, Tumorentstehung etc.) und Energiestoffwechsel (Funktion der Mitochondrien; Enzymatik) statt (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014, S. 19-31). Das Verständnis für die Entstehung von Krankheiten wie Krebs, die ihnen im Alltag aufgrund des steigenden Alters der Bevölkerung immer öfter begegnen, wird dadurch sukzessiv aufgebaut.

Ein einfacher Versuch, in dem auf eine Apfelhälfte Zitronensäure getropft wird und auf die andere Hälfte nicht (eine halbe Stunde an der Luft inkubieren lassen), zeigt, welche Wirkung Antioxidantien (hier Vitamin C) auf die Oxidation von Nahrungsmitteln besitzen. Wie

beim Versuch des Arbeitsblattes 1a wird durch dieses Einstiegsexperiment die Neugier der SuS (genaue Wirkungsweise von Antioxidantien) geweckt. Eine Recherche, welche Antioxidantien in Zitrone und Kaktusfeige enthalten sind, kann sich der Auswertung des Versuchs anschließen. Empfehlenswert zur Ergänzung der Inhalte ist auch der kurze Videobeitrag aus der Sendung Quarks & Co (2016; s. Arbeitsblatt 2a), welcher aufzeigt, dass ein Übermaß an Antioxidantien auch negative Auswirkungen auf den Körper haben kann.
Arbeitsblatt 2b dient im Anschluss daran der intensiveren Auseinandersetzung mit dem Thema Antioxidantien. Interdisziplinäres, vernetzendes Lernen steht dabei im Fokus (Spörhase & Ruppert, 2014, S. 55; Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014, S. 11). Es kommt exemplarisch die Kaktusfeige zum Einsatz, da sie viele antioxidative Substanzen enthält (zweifach so hohe antioxidative Kapazität wie z.B. ein Apfel oder eine Tomate). Die Früchte können eingekauft und verkostet (z.B. auch in einem Smoothie einsetzbar; tolle Färbung durch die Farbpigmente) sowie von außen und innen untersucht werden. Das Fachwissen über die chemischen Eigenschaften von Antioxidantien, die die SuS vorher durch den Einführungstext kennengelernt haben, werden hier am Beispiel der Strukturformeln von Vitamin C und Betanin vertieft. Mit Vitamin C sind die SuS bereits im Einführungsexperiment in Berührung gekommen; dass Betalaine wie Betanin in der Frucht enthalten sind, können sie visuell (Farbe der Frucht) überprüfen. Das Themengebiet “Feigenkaktus und die Wirkung seiner bioaktiven Substanzen“ ist beliebig erweiterbar.

7 Quellen

Literatur

Bhalang, K. & Tompkins, K. (2015). Polysaccharides from Aloe vera and Oral Ulcerations. In: Ramawat, K.G. & Mérillon, J.-M. (Hg.): Polysaccharides. Cham: Springer International Publishing, S. 2137-2150.

Das Erste (2017). Aloe-Vera-Hype: Wundermittel oder Abzocke. http://mediathek.daserste.de/Plusminus/Aloe-Vera-Hype-Wundermittel-oder-Abzock/Video?bcastId=432744&documentId=47312514 (01.12.2017).

Dehbi, F., Hasib, A., Tilaoui, M., El Batal, H., Zaki, N., Ouatmane, A., Jaouad, A. & Zyad, A. (2013). Bioactive Constituents, Antioxidant Activity and in Vitro Cancer Cell Cytotoxicity of Moroccan Prickly Pear (Opuntia ficus indica L.) Juices. Journal of Natural Sciences Research 14/3, S.12-20.

Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. (2014). Sekundäre Pflanzenstoffe und ihre Wirkung auf die Gesundheit – Eine Aktualisierung anhand des Ernährungsberichts 2012. http://www.dge.de/wissenschaft/weitere-publikationen/fachinformationen/sekundaere-pflanzenstoffe-und-ihre-wirkung/#c1697 (01.12.2017).

Finberg, M.J., Muntingh, G.L. & van Rensburg, C.E.J. (2015). A comparison of the leaf gel extracts of Aloe ferox and Aloe vera in the topical treatment of atopic dermatitis in Balb/c mice. Inflammopharmacology 6/23, S. 337-341.

Gosslau, A. & Rensing, L. (2002). Oxidativer Stress, altersabhängige Zellschädigungen und antioxidative Mechanismen. Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie 2/35, S. 139-150.

Grace, O.M., Buerki, S., Symonds, M.R.E., Forest, F., van Wyk, A.E., Smith, G.F., Klopper, R.R., Bjora, C.S., Neale, S., Demissew, S., Simmonds, M.S.J. & Ronsted, N. (2015). Evolutionary history and leaf succulence as explanations for medicinal use in aloes and the global popularity of Aloe vera. BMC Evolutionary Biology 15, S. 29.

Gülçin, İ. (2012). Antioxidant activity of food constituents: an overview. Archives of Toxicology 3/86, S. 345-391.

Hammam, J.H. (2010). Composition and Applications of Aloe vera Leaf Gel. Molecules 8/13, 1599-1616.

Hegwood, D.A. (1990). Human Health Discoveries with Opuntia sp. (Prickly Pear). Hortscience 12/25, S. 1515-1516.

Kammoun, M., Miladi, S., Ben Ali, Y., Damak. M. Gargouri, Y. & Bezzine, S. (2011). In vitro study of the PLA2 inhibition and antioxidant activities of Aloe vera leaf skin extracts. Lipids in Health and Disease 10, S. 30.

Lowther, W., Lorick, K., Lawrence, S.D. & Yeow, W.-S. (2012). Expression of biologically active human interferon alpha 2 in Aloe vera. Transgenic research 6/21, S. 1349-1357.

Meyer, H. (2011). Unterrichtsmethoden II: Praxisband. 14. Aufl. Berlin: Cornelsen.

Meyer, S., Vogt, T., Landthaler, M. & Karrer, S. (2005).

Use of phytopharmaceutical agents in dermatology. Indications, therapeutic approaches and side effects. Der Hautarzt 5/56, S. 483-499.

Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2014). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II, Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen, Biologie. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/bi/KLP_GOSt_Biologie.pdf (01.12.2017).

Nejatzadeh-Barandozi, F. (2013). Antibacterial activities and antioxidant capacity of Aloe vera. Organic and Medicinal Chemistry Letters 1/3, S. 5.

Osuna-Martínez, U., Reyes-Esparza, J. & Rodríguez-Fragoso, L. (2014). Cactus (Opuntia ficus-indica): A Review on its Antioxidants Properties and Potential Pharmacological Use in Chronic Diseases. Natural Products Chemistry & Research 6/2, S. 153.

Piga, A. (2004). Cactus Pear: A Fruit of Nutraceutical and Functional Importance. Journal of the Professional Association for Cactus Development, S. 9-22.

Quarks & Co (2016). Gute Vitamine? Böse Vitamine! Vom Mythos der gesunden Radikalfänger. http://www1.wdr.de/fernsehen/quarks/sendungen/vitamine-radikalfaenger100.html (01.12.2017).
Sacan, O., Akev, N. & Yanardag, R. (2017). In vitro inhibitory effect of Aloe vera (L.) Burm. f. leaf extracts on the activity of some enzymes an antioxidant activity. Indian Journal of Biochemistry & Biophysics, 54, S.82-89.

Schulz-Zander, R. (2005). Veränderung der Lernkultur mit digitalen Medien im Unterricht. In: Kleber, H. (Hrsg.). Perspektiven der Medienpädagogik in Wissenschaft und Bildungspraxis. München: kopaed, S. 125-140.

Shedbalkar, U.U., Adki, V.S., Jadhav, J.P. & Bapat, V.A. (2010). Opuntia and Other Cacti: Applications and Biotechnological Insights. Tropical Plant Biology 3/3, S. 136-150.

Spörhase, U. & Ruppert, W. (2014). Biologiemethodik. Handbuch für die Sekundarstufe I und II. 3. Aufl. Berlin: Cornelsen Schulverlage.

Stintzing, F.C., Schieber, A. & Carle, R. (2012). Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. European Food Research and Technology 212, S. 396–407.

Verbraucherzentrale Bundesverband (2016). Sekundäre Pflanzenstoffe. https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/nahrungsergaenzungsmittel/sekundaere-pflanzenstoffe-4946 (01.12.2017)

Verbraucherzentrale Bundesverband (2017). Aloe vera. https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/nahrungsergaenzungsmittel/aloe-vera-8592 (01.12.2017).

Vogler, B.K., Ernst, E. (1999). Aloe vera: a systematic review of its clinical effectiveness. British Journal of General Practice 49/447, S. 823-828.

Wickert, T. (2006). In vitro-Studien zur Biofunktionalität von Betanin und Indicaxanthin sowie von Extrakten aus der Kaktusfeige (Opuntia ficus indica). Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg.

Xing, W., Guo, W., Zou, C.H., Fu, T.T., Li, X.Y., Zhu, M., Qi, J.H., Song, J., Dong, C.H., Li, Z., Xiao, Y., Yuan, P.-S., Huang, H. & Xu, X. (2015). Acemannan accelerates cell proliferation and skin wound healing through AKT/mTOR signaling pathway. Journal of Dermatological Science 2/79, S. 101-109.

Yahia, E.M. & Mondragon-Jacobo, C. (2011). Nutritional components and anti-oxidant capacity of ten cultivars and lines of cactus pear fruit (Opuntia spp.). Food Research International 44, S. 2311-2318.

Kontakt

Melanie Beudels (M.Sc.),
Prof. Dr. rer. nat. Angelika Preisfeld
Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
Lehrstuhl für Zoologie und Didaktik der Biologie
Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal

melanie.beudels@uni-wuppertal.de
apreis@uni-wuppertal.de

Eingegangen: 10. Januar 2018 / Angenommen: 15. Mai 2018 / Online publiziert: 29. Juni 2018
Gesellschaft für Didaktik der Naturwissenschaften und der Mathematik (GdNM)

Arbeitsblatt 1a: *Aloe vera* - eine prominente und als Heilpflanze genutzte Sukkulente

Teil 1: Theorie
Zum Einstieg in die Welt der Pflanzenheilkunde dient euch ein kurzer Filmbeitrag der ARD über die *Aloe vera* und ihre Verwendung in Alltagsprodukten. Diesen kann man unter folgendem Link finden:

http://mediathek.daserste.de/Plusminus/Aloe -Vera-Hype-Wundermittel-oder-Abzock/Video?bcastId=432744&documentId=47312514

Arbeitsauftrag
Schaut euch den Filmbeitrag zu der *Aloe vera* an und stellt einen Steckbrief für sie über die folgenden Eigenschaften zusammen:

Name
Vorkommen
Aussehen
Positive/negative Wirkungen
Was gibt es bei *Aloe vera*-Produkten für Kritik? Auf was sollte man achten, wenn Produkte gekauft werden?

Teil 2: Praxis
Im Folgenden könnt ihr mithilfe eines Selbstversuchs mit dem *Aloe vera*-Blatt-Gel mehr über die Eigenschaften und Wirkungen dieses Gels herausfinden. Stellt dazu zunächst eine Forschungsfrage und Hypothesen auf, die ihr mit dem Selbstexperiment beantworten und prüfen wollt. Besprecht danach mit eurer Lehrperson kurz das weitere Vorgehen (z.B. Sicherheitsaspekte). Geht nach dem folgenden Schema vor:
1) Formulierung einer Forschungsfrage
2) Hypothesenbildung
3) Planung (Sicherheitsaspekte, benötigtes Material, wie soll vorgegangen werden?)
4) Durchführung und Beobachtungen
5) Schlussfolgerungen, Diskussion der Ergebnisse im Plenum

Abb. 1: Links: Angeschnittenes *Aloe vera*-Blatt. Im Blattinneren ist das durchsichtige, schleimartige Gel zu sehen. Rechts: Filetierter Teil eines jungen *Aloe vera*-Blattes. Fotos: Beudels

Abb. 2: Stück eines Blatt-Gels auf der Haut. Foto: Beudels

Arbeitsblatt 1b: Zell- und molekularbiologische Wirkungen des Polysaccharids Acemannan

Das innere, schleimige Gewebe des *Aloe vera*-Blattes, das als Wasserspeicher für Trockenzeiten dient, enthält Mehrfachzucker (Polysaccharide). Es wurde ein Mehrfachzucker namens Acemannan (s. Abb. 1) entdeckt, der für viele positive Wirkungen der Pflanze auf den menschlichen Körper verantwortlich sein soll, also *bioaktiv* ist. Acemannan soll z.B. die Heilung von Hautwunden beschleunigen, Schmerzen und Entzündungssymptome lindern sowie das Immunsystem modulieren.

Wie es Acemannan aber auf molekularer Ebene gelingt, diese Effekte auszulösen, war lange unbekannt. Seit Kurzem gibt es die ersten Experimentalergebnisse, die zeigen, welche zellulären Signalwege durch Acemannan beeinflusst werden. Wichtig bei der Wirkung dieses Polysaccharids ist, dass β-glykosidische Bindungen (wie auch bei Cellulose) von menschlichen Enzymen nicht gespalten werden können, sodass das Molekül seine Wirkung entfalten kann, ohne abgebaut zu werden.

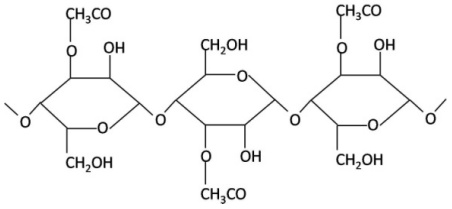

Abb. 1: Molekulare Struktur von Acemannan. Quelle: Eigene Darstellung

Arbeitsaufträge

1. Um die Struktur und Funktionen von Acemannan nachvollziehen zu können, sind zunächst Basisinformationen über Kohlenhydrate nötig. Füllt dafür unter Zuhilfenahme des Informationstextes* die nachfolgende Tabelle aus:

Typ des Kohlenhydrats	**Beispiel**	**Funktionen in Menschen/Pflanzen**
Polysaccharid		
Monosaccharid		

Tab. 1: Schema der auszufüllenden Tabelle. In Spalte 2 sollen Beispiele je Kohlenhydrattyp, in Spalte 3 die jeweiligen Funktionen in Mensch und Pflanze genannt werden

2. Beschreibt (auch mithilfe der zuvor zusammengestellten Infos) die molekulare Struktur von Acemannan.

3. Versucht die zellulären und molekularen Wirkungen und dazugehörigen Signalwege von Acemannan mithilfe der hier abgebildeten Informationskärtchen (können ausgeschnitten werden) in einem Pfeil-/Fließdiagramm darzustellen. Alle zur Konstruktion der Signalwege benötigten Informationen findet ihr auf den Karten.

4. Protein S6-Kinase und mTOR sind Enzyme, die zu den Proteinkinasen zählen. Recherchiert (als Hausaufgabe) im Internet, wie Kinasen aktiviert sowie deaktiviert werden und wie sie wirken.

Acemannan Polysaccharid bindet an Rezeptoren auf Zelloberflächen, die u.a. acetylierte Mannose erkennen gilt auch für Rezeptoren von Makrophagen	**mTOR** Enzym Kinase = katalysiert das Anhängen einer Phosphatgruppe an bestimmte Proteine oder Enzyme und aktiviert diese dadurch. Notwendig für Aktivierung einer Protein S6-Kinase und Translations-Iniatiationsfaktor-4F
Oberflächenrezeptoren in den Zellmembranen (z.B. von Epithelzellen) aus Proteinen aufgebaut induzieren durch Aktivierung eine intrazelluläre Signalkaskade, die mTOR aktiviert	**Wachstumsfaktoren** Proteine werden translatiert → Beschleunigung der Zellproliferation → Auslösen vom Immunsystem-Reaktionen
Protein S6-Kinase Enzym Reguliert im aktivierten Zustand die Translation von Proteinen durch Aktivierung des ribosomalen Proteins S6	**Wundheilung** durch Erhöhung der Kollagen- und Glykosaminoglykansynthese
Zellproliferation entspricht Zellwachstum und Zellteilung	**Aktivierte Makrophagen** Makrophagen: Zellen des Immunsystems Aufgaben u.a.: Abwehrreaktionen, Zerstörung von Tumorzellen, Wundheilung
Rezeptoren von Makrophagen erkennen Mannose-Einheiten als „fremd“, da Mannose am Ende von Polysacchariden im Menschen fast nicht vorhanden; aber viel bei Mikroorganismen	

*online-Material 1 (einseitiger Informationstext: Kohlenhydrate und ihre Eigenschaften)

Arbeitsblatt 1c: Studie zur Wirkung von *Aloe*-Blatt-Gelen bei Neurodermitis (Finberg *et al.* 2015)

Ziel und Aufbau der Studie: Ein Forscherteam aus Südafrika hat kürzlich eine Studie durchgeführt, in der sie die Wirkung von Blatt-Gelen aus zwei *Aloe*-Arten auf die Ausbildung von Symptomen der Neurodermitis bei Mäusen untersucht haben.

In den folgenden Boxen findet ihr Informationen, die zum Verständnis der Studie wichtig sein können.

Neurodermitis:

- chronische, wiederkehrende Hauterkrankung; vererbt; bis zu 20% der Kinder in Industrieländern betroffen
- Symptome: trockene, schuppige, juckende Haut, Entzündung, entzündlich bedingte Absonderung von Blutbestandteilen ins Gewebe
- Gründe/Auslöser: verstärkte Reaktion der Haut auf innere (z.B. Stress) und äußere Reize (z.B. Kontaktallergene); Überreaktion des Immunsystems
- erhöhte IgE-Produktion; Allergen-IgE Reaktivität; IgE (Immunglobulin E) ist ein Antikörper des menschlichen Immunsystems
- oft gleichzeitig auch Allergien, wie Heuschnupfen oder Nahrungsmittelallergien (auch hier spielt IgE eine Rolle)

Konventionelle Behandlungsformen:

- äußerliche Behandlung der Haut mit Kortikoiden (wirken entzündungshemmend und immunsuppressiv) und Antihistaminika (Wirkstoffe gegen allergische Reaktionen)
- beide sind relativ wirksam, haben aber unangenehme Nebenwirkungen (z.B. einschläfernd, Gewebeschwund, Kapillarblutungen) und Langzeit-Nebenwirkungen (z.B. Verminderung der Knochendichte, grauer Star)

Vorgehen der Forscher:

- Sensibilisierung von 60 Mäusen: Auftragen einer 0,25%igen 2,4-Dinitrochlorbenzol-Öl-Emulsion (starkes Kontaktallergen) am rechten Ohr an Tag 1 und 8; dann jeden 2. Tag bis zum Ende des Experiments (Tag 26)
- Tag 16: Aufteilung der Mäuse in 3 gleich große Gruppen. An betroffenen Hautstellen des Ohrs: tägliches Auftragen…
  - Gruppe 1: …eines Placebo-Gels
  - Gruppe 2: …eines *Aloe ferox*-Blatt-Gels
  - Gruppe 3: …eines *Aloe vera*-Blatt-Gels
- an Tag 1 und 26: Blutabnahme (zur Bestimmung der IgE-Konzentration), Fotos der Mäuse; am Ende: mikroskopische Schnitte der betroffenen Stellen (Rücken)

Die wichtigsten Ergebnisse der Studie sind in folgender Tabelle dargestellt.

Gel-Behandlung	Anzahl Mäuse	Durchschnittskonzentration von IgE (ng/mL)	Fotos der Haut des Rückens	Mikroskopische Bilder der Hautsektion (Rücken)
Placebo	18	4356,183	deutliche Anzeichen einer Neurodermitis	Abwesenheit normaler Hautstrukturen, wie Haarfollikel, Schweißdrüsen; Eiterbildung, übermäßige Haut-Verhornung
Aloe ferox	18	4356,183*	keine Anzeichen für eine Neurodermitis	Zunahme subepithelialer Stromazellen (als bindegewebiges Stützgerüst)
Aloe vera	20	4105,793*	leichte Anzeichen für eine Neurodermitis	Zunahme subepithelialer Stromazellen (als bindegewebiges Stützgerüst)

Tab. 1: Ergebnisse der Studie. Dargestellt sind die Behandlungsform, Anzahl der Versuchstiere, die am Ende der Versuche gemessenen IgE-Durchschnittskonzentrationen im Blutserum sowie die beobachteten Symptome. Das * steht für ein signifikantes Ergebnis (Daten übersetzt und zusammengestellt nach Finberg *et al.* 2015)

Arbeitsaufträge

1. Beschreibt kurz in eigenen Worten die Durchführung der dargestellten Studie. Geht dafür bitte auch auf die folgende Frage ein: Wofür wurden in der Studie 2,4-Dinitrochlorbenzol und ein Placebo-Gel eingesetzt?

2. Fasst die Ergebnisse der Studie in wenigen Sätzen zusammen.

3. Nehmt kritisch Stellung zu dem folgenden Fazit der Forscher, indem ihr auf eure bisherigen Überlegungen und die obigen Informationen zurückgreift:

„Die Blatt-Gele von *Aloe ferox* und *Aloe vera* könnten bei einer lokalen Anwendung auf der Haut eine sichere und hilfreiche Alternative zu Antihistaminika und Kortikosteroiden sein, um Patienten mit einer wiederkehrenden, chronischen Neurodermitis zu behandeln.“ (frei übersetzt nach Finberg *et al.* 2015)

Arbeitsblatt 2a: Oxidativer Stress in Zellen

Die aerobe Lebensweise des Menschen bedingt, dass zur Energiegewinnung Sauerstoff aus der Luft benötigt wird, um Moleküle aus der Nahrung zu oxidieren. Während dieses Prozesses kann in den Zellen oxidativer Stress entstehen.

Aufgabenstellung und Fragen

Lest euch den **Text* zum Thema "Oxidativer Stress in Zellen und Schutzmechanismen des Körpers"** durch. Beantwortet im Anschluss die untenstehenden Fragen.

1) Wodurch entsteht oxidativer Stress im menschlichen Körper?

2) Durch oxidativen Stress kann eine Reihe von Biomolekülen in den Zellen beschädigt werden. Füllt dazu die untenstehende Tabelle aus.

Biomolekül	**Strukturen der Zelle, die diese Biomoleküle enthalten**	**Schädigungen durch ROS**	**Auswirkungen auf die Zelle/den Körper**
Lipide			
Proteine			
Nukleinsäuren			

Tab. 1: Biomoleküle, Zellstrukturen, die diese Moleküle enthalten sowie Schäden dieser Biomoleküle durch reaktive Sauerstoffspezies und langfristige Auswirkungen auf die Zellen und den Körper

3) Welche Mechanismen verwenden Zellen, um sich vor oxidativem Stress zu schützen?

4) Im Text wurden **Antioxidantien** als eine Art der Schutzmechanismen des Körpers gegen oxidativen Stress vorgestellt. Sicherlich habt ihr schon einmal von ihnen im Zusammenhang mit dem Verzehr von Obst und Gemüse gehört. Diese bioaktiven Substanzen sind z.B. in Zitronen oder Kaktusfeigen enthalten.

Ein einfacher Versuch (Anordnung s. Abb. 1) kann euch zeigen, was die Zugabe eines Antioxidans bei Nahrungsmitteln bewirken kann. Besprecht die Durchführung dieses Versuchs mit eurer Lehrkraft.

Abb. 1: Versuchsanordnung. Foto: Beudels

4.1) Was könnt ihr beobachten?

4.2) Wie kann man die Beobachtungen erklären?

Weiteres interessantes Material zu freien Radikalen und Antioxidantien:
Beitrag der Sendung Quarks & Co (ca. 4 min):
http://www1.wdr.de/fernsehen/quarks/sendungen/vitamine-radikalfaenger100.html

*online-Material 2 (einseitiger Informationstext)

Abb. 2: Aufgeschnittene Kaktusfeigen. Foto: Beudels

Arbeitsblatt 2b: Antioxidative Substanzen aus der Kaktusfeige (Frucht des Feigenkaktus)

Obst und Gemüse beinhalten eine Vielzahl an Substanzen, die wichtig für die Gesundheit des menschlichen Körpers sind. Neben den Hauptkomponenten (Proteine, Zucker und Lipide) und den Mikronährstoffen (z.B. Mineralien) enthalten diese Nahrungsmittel auch andere Substanzen, die positive und negative Effekte auf die menschliche Gesundheit haben können. Zu diesen *bioaktiven* Substanzen gehören auch **Antioxidantien**.
Im Saft von **Kaktusfeigen** (Abb. 1, links), die die Früchte des Feigenkaktus sind, wurden zahlreiche Antioxidantien gefunden, darunter auch **Vitamin C** sowie **Betalaine**, die der Farbgebung der Frucht zur Anlockung von Tieren dienen (s. Abb. 1, rechts). Betacyane (darunter Betanin, welches auch die Rote Beete violett tönt) färben die Früchte rot-violett, Betaxanthine färben sie gelb.

Abb. 1: Links: Eine gelbe Kaktusfeige. Rechts: Aufgeschnittene Kaktusfeigen, deren Mark durch die Betalaine entweder rot oder gelb gefärbt ist. Fotos: Beudels

Aufgabenstellung

Nachfolgend seht ihr die Strukturformeln von Betanin (Abb. 2) und Vitamin C (Abb. 3). Versucht mithilfe der untenstehenden Informationen die Fragen zu beantworten:

1) Wie wirken Antioxidantien und welche Moleküleigenschaften sind für diese Wirkung nötig?

2) Ist Vitamin C oder Betanin das stärkere Antioxidans?

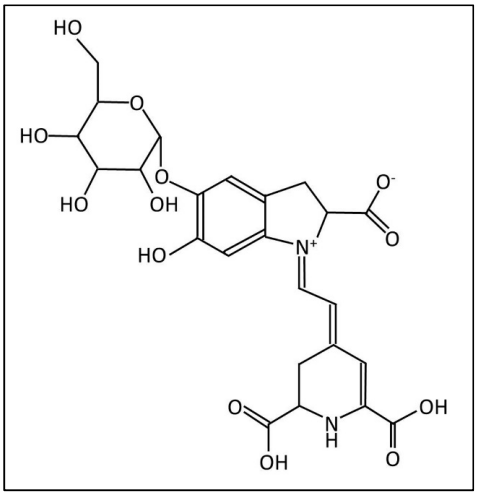

Abb. 2: Strukturformel von Betanin.
Quelle: Eigene Darstellung

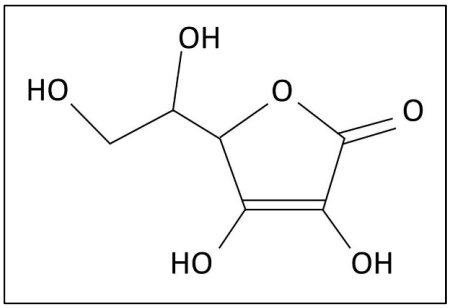

Abb. 3: Strukturformel von Vitamin C. Quelle: Eigene Darstellung

Antioxidantien:

- chemisch sehr heterogen und komplex
- Radikalfänger: fangen reaktive Sauerstoffspezies ein und geben ihnen ein Elektron (bzw. ein Wasserstoffatom) ab
- Strukturen, die dafür wichtig sind: Hydroxyl- (-OH) und Carbonylgruppen (-CO), aromatische Ringstrukturen (Doppelbindungen)
- Unterbrechung Radikalkettenreaktion → weitere Oxidation von Zell-Molekülen verhindert

Kasten 1: Wichtiges über Antioxidantien

Zusatzmaterial 1: Kohlenhydrate und ihre Eigenschaften

Wichtige Stichworte: Kohlenhydrate, Mono-, Di-, Polysaccharide

Kohlenhydrate (auch Zucker oder Saccharide genannt) bestehen aus den Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) und stammen meist aus Pflanzen. Sie haben drei biologische Hauptfunktionen:

Sie dienen als ***transportable und speicherbare Energiequelle***, wobei die Energie aus ihnen in einer von den Körperzellen nutzbaren Form freigesetzt werden kann (wichtigste, schnell verfügbare Energiequelle des Menschen). Sie liefern ***Kohlenstoffgerüste***, die sich zu anderen Biomolekülen umbauen lassen und dienen bei vielen molekularen und zellulären Prozessen als ***Signal- oder Erkennungsstrukturen***.

Man kann innerhalb der Kohlenhydrate zwischen Monosacchariden, Disacchariden und Polysacchariden unterscheiden.

- ***Monosaccharide (=Einfachzucker)*** bestehen aus einer Zuckergrundeinheit. Diese Grundeinheit kann z.B. ***Glucose*** (Traubenzucker, s. Abb. 1, links) oder Fructose (Fruchtzucker) sein. Glucose ist von zentraler Bedeutung für unseren Stoffwechsel, da die Zellen sie als Energiequelle nutzen (auch als „Blutzucker" bekannt). ***Mannose*** (s. Abb. 1, rechts) ist ein Epimer (gleiche Summenformel: $C_6H_{12}O_6$, aber andere räumliche Anordnung) der Glucose und Bestandteil vieler pflanzlicher Polysaccharide.
- ***Disaccharide (=Zweifachzucker***) sind aus zwei Einfachzuckern aufgebaut, welche über eine Glykosidbindung verbunden sind. Ein Disaccharid, welches wir jeden Tag vor unseren Augen haben, ist der ***Haushaltszucker (Saccharose; Rohrzucker)***. Saccharose besteht aus Glucose und Fructose und wird aus Zuckerrüben/Zuckerrohr gewonnen. Sie sättigt nur kurz und hat viele „leere Kalorien". Es gibt noch weitere wichtige Disaccharide wie z.B. ***Lactose*** (Milchzucker).
- ***Polysaccharide (=Vielfachzucker)***: Bei ihnen sind viele Monosaccharide (meist einige 100 bis einige 1000) zu einem Polymer verbunden. Für den Menschen sind die ***Stärke*** (als Nahrungsquelle) und das ***Glykogen*** (als Speicherstoff überschüssiger Kohlenhydrate in Leber und Muskeln) sehr bedeutend. Beide werden aus dem Monosaccharid Glucose aufgebaut. Neben diesen beiden Polysacchariden sind ***Ballaststoffe*** wie die ***Cellulose*** für die gesunde Ernährung wichtig. Diese sind für uns aufgrund ihrer Bindungsart unverdaulich (passende Enzyme fehlen), quellen im Darm aber auf und regen die Darmaktivität sowie Schleimproduktion an.

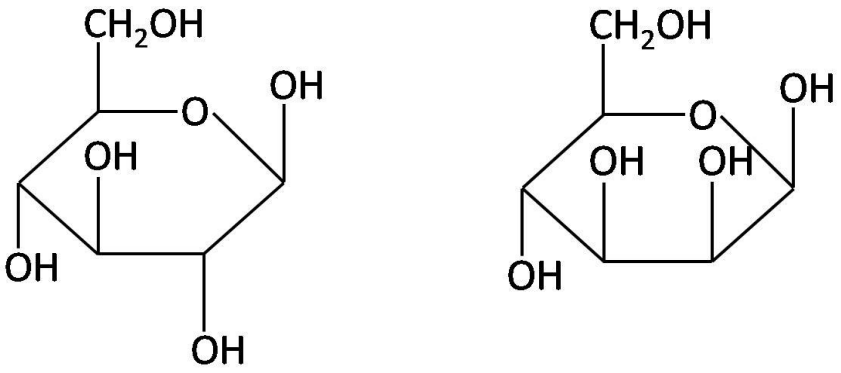

Abb. 1: Links: Das Monosaccharid Glucose. Rechts: Im Vergleich dazu das Epimer Mannose.
Quelle: Eigene Darstellung

(Literaturquellen: Clauss & Clauss (2009). Humanbiologie kompakt. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. S.36-37; Ganz *et al*. (2007). Naturwissenschaften kompakt. Stuttgart: Ernst Klett Verlag. S. 81-82)

Zusatzmaterial 2: Oxidativer Stress in Zellen und Schutzmechanismen des Körpers

Die Entstehung von oxidativem Stress

Wie im einfachen Modell in Abbildung 1 dargestellt, entsteht **oxidativer Stress**, wenn die Bildung von Substanzen, die in der Lage sind, Biomoleküle zu oxidieren (**Prooxidantien** genannt) bzw. **reaktiven Sauerstoffspezies (ROS**= reactive oxygen species**)** die Kapazitäten einer Zelle, sich selbst mithilfe antioxidativer Abwehrsysteme zu schützen, stark übertrifft.

Der Körper des Menschen benötigt zur Energiegewinnung Sauerstoff aus der Luft, um damit Nahrungsmoleküle zu oxidieren. **Oxidation** ist die Abgabe von einem oder mehreren Elektronen und lässt sich auch im Alltag des Öfteren beobachten: Eisen rostet oder Butter wird nach langer Zeit an der Luft ranzig.

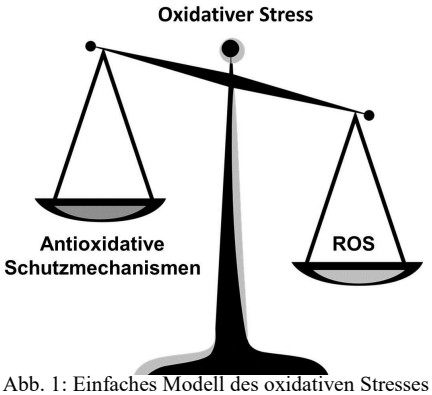

Abb. 1: Einfaches Modell des oxidativen Stresses

Während der Zellatmung, die in den "Kraftwerken der Zelle“ - den Mitochondrien - abläuft, entweichen bei der Elektronenübertragung der Atmungskette kontinuierlich einzelne, ungepaarte Elektronen. Dadurch können ROS entstehen, die sehr reaktiv sind, weil sie durch ungepaarte Elektronen “unvollständig“ sind. Um wieder “vollständig“ zu werden, greifen sie andere Moleküle willkürlich an und entreißen ihnen ein Elektron, sodass diese nun auch zu einem Radikal werden. Eine gefährliche Kettenreaktion ist die Folge, die dazu führen kann, dass wichtige Moleküle der Zelle beschädigt werden.

Äußere Faktoren wie Luftverschmutzung, UV-Strahlung oder das Rauchen von Zigaretten sorgen für eine Erhöhung des oxidativen Stresses. ROS haben aber auch positive Wirkungen: Fresszellen des Immunsystems nutzen freie Radikale, um z.B. Bakterien zu zerstören.

Beschädigungen wichtiger Biomoleküle der Zellen und ihre Auswirkungen für den Körper

Nukleinsäuren: ROS greifen täglich tausende Male die DNA und RNA von Zellen an. Besonders die DNA der Mitochondrien ist betroffen. Es kommt durch die Oxidation der Ribose zu Doppel-und Einzelstrangbrüchen, DNA-DNA- sowie DNA-Protein-Addukte entstehen und Basen werden modifiziert. Mutationen und Fehler bei der Replikation sowie Transkription sind die Folge. Schäden der Mitochondrien-DNA führen zu weiterem oxidativen Stress.

Proteine: Aminosäuren wie Cystein, Tyrosin oder Histidin sind aufgrund bestimmter chemischer Gruppen (Thiolgruppe des Cysteins, Phenylgruppe des Tyrosins, Imidazolring des Histidins) in ihrem Molekül anfällig für Oxidation. Dadurch kann es z.B. zu Aminosäure-Dimerisierungen kommen. Peptidbindungen werden oxidiert, sodass Proteine fragmentieren und ihre Konformation ändern bzw. denaturieren. Folge sind u.a. Enzymdefekte und Veränderungen des Cytoskeletts.

Lipide/Fettsäuren: Mehrfach ungesättigte Fettsäuren (besitzen Doppelbindungen zwischen den Kohlenstoffatomen) in den Plasma- sowie Organellenmembranen können sehr leicht durch ROS oxidiert und damit sehr gefährlich werden. Es kommt zu einer Kettenreaktion, in der andere Lipide und Moleküle, wie Membranproteine, beschädigt werden. Die Membranfluidität und –permeabilität verändern sich und das Ionengleichgewicht wird in Folge dessen gestört: Ca^{2+} strömt beispielsweise ins Cytosol und aktiviert dadurch bestimmte Enzyme, wodurch es zum Zelltod (Apoptose oder Nekrose) kommen kann.

Die oben beschriebenen Zellschädigungen oder auch der resultierende Zelltod können zahlreiche degenerative, chronische Krankheiten zur Folge haben: Krebs, kardiovaskuläre Erkrankungen oder z.B. Alterungsprozesse.

Antioxidative Schutzmechanismen des Körpers

Menschliche Zellen haben zur Reduzierung von oxidativen Schäden zahlreiche Abwehrmechanismen ausgebildet, die drei Ebenen betreffen: **Vorbeugung** (z.B. Inaktivierung bestimmter Substanzen, bevor sie wirken können), **Gegenwirkung** und **Reparatur bzw. Abbau** (z.B. durch DNA-Reparaturenzyme, Phospholipasen für geschädigte Lipide). Auf der Ebene der Gegenwirkung befinden sich antioxidative Enzyme in den Mitochondrien und im Cytosol, deren Expression besonders durch oxidativen Stress induziert wird, sowie nicht-enzymatische Antioxidantien, die in der Lage sind, die Oxidation anderer Moleküle zu inhibieren.

(Literaturquellen: Gosslau, A., Rensing, L.: Oxidativer Stress, altersabhängige Zellschädigungen und antioxidative Mechanismen. Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie 2/35, (2002), S. 139-150; Gülçin, İ.: Antioxidant activity of food constituents: an overview. Archives of Toxicology 3/86, (2012), S. 345-391)