

junge Menschen in einem ganz anderen Licht erscheinen lässt. Ich habe überwiegend Durchschnittsschüler an meiner Schule betreut und zusehen können, wie sie zu Persönlichkeiten gereift und in die Spitze der deutschen Jungforscher aufgestiegen sind.

- **Schülerpotenzial:** Leider ist die praktische Intelligenz, die diese Schüler auszeichnete, ein Merkmal, das die Schule und auch die Pädagogik gerne ignorieren. Deshalb behaupte ich, dass dem Lehrer im Klassenunterricht viele Schülerqualitäten verborgen bleiben und dass Noten und ein Schulzeugnis einen großen Teil des Schülerpotenzials nicht abbilden. Noch ist das kein Vorwurf an die Schule. Es wird aber einer, wenn sie Schülern nicht die Gelegenheit gibt, ihre verborgenen künstlerischen, musischen, schauspielerischen und innovativ-wissenschaftlichen Talente zu entdecken. Erst wenn sie das tut, wird sie ihrem Bildungsauftrag gerecht.
- **Lehrerfeedback:** Auch ein Lehrer braucht Streicheleinheiten! Bis er sie bekommt vergehen oft Jahrzehnte. Mir tat der enge Kontakt mit den Eltern, der ungezwungene Umgang mit Jugendlichen fast auf Augenhöhe und das unmittelbare positive Feedback von Schülern und Eltern aus der Forscher-AG sehr gut. Eltern sollen die Projekte ihrer Kinder durchaus unterstützend, aber mit Zurückhaltung begleiten. Wenn sie, getrieben vom eigenen Ehrgeiz, mitmischen wollen, dann ist meistens Ärger vorprogrammiert.
- **Funktionäre:** Die Stiftung „Jugend forscht“ muss jährlich eine Reihe von Großveranstaltungen organisieren, bei denen manche Funktionäre die Wettbewerbsmaschinerie stärker im Blick haben als den teilnehmenden Schüler. Besonders schmerzte es mich, dass der Spielraum im Fachgebiet Chemie durch absurde Sicherheitsbestimmungen massiv eingeschränkt wurde und Funktionäre das schamlos mittrugen.
- **Falsche Regeln:** Als ich im Sommer 2015 überrascht feststellte, dass sich die Richtlinien für Jungforscher an den KMK-Vereinbarungen für die Schulchemie und an den dort zulässigen Substanzen orientieren, habe ich in eindringlichen Appellen versucht, die Geschäftsleitung in Hamburg umzustimmen. Es war für mich nicht nachvollziehbar, dass die restriktiven und fragwürdigen Regeln, die für den Klassenunterricht mit 30 Schülern gelten, nun auch einem oder zwei Jungforschern aufgezwungen werden sollen, die unter permanenter Aufsicht ihres Betreuungslehrers im Schullabor arbeiten. Forschung in so engen Grenzen ist ein Widerspruch in sich: Das ist mein Credo!
- **Rücktritt:** Dass ich diese Angst vor Gefahrstoffen mit beherrschbaren Gefahren als Gift für die Freiheit von Forschung anprangerte, hat keinen Funktionär bei Jugend forscht beeindruckt oder zur Formulierung angemessener eigener Regeln inspiriert. Der Apparat einer Institution, die für Innovation und Kreativität steht, zeigte sich uneinsichtig und unbeweglich. Abschreiben ist eben bequemer als neu erfinden! Der Rückzug aus meiner ehrenamtlichen Betreuer Tätigkeit für Jungforscher im Sommer 2017 war deshalb auch ein veröffentlichter Protest [5] gegen kontraproduktive Überregulierungen.

## 2. Forscher an die Schulen

### 2.1 Erfahrungen und Tipps

- **Innovation:** Forschen ist ein zutiefst schöpferischer Akt, dessen Einmaligkeit auch ins Schülerbewusstsein dringt. Nicht nur die großen Forscher unserer Zeit sind es, sondern auch Schüler, die in ferne Wissenswelten vorstoßen können, die wenige Menschen kennen und keiner vor ihnen betreten hat. Neil Amstrong hat dieser Faszination Ausdruck verliehen, als er als erster Mensch den Fuß auf den Mond setzte. Bezogen auf einen jungen Forscher könnte dann sein legendärer Satz lauten: „Ein kleiner Schritt für die Menschheit, aber ein großer in der Entwicklung eines jungen Menschen!“
- **Hand- und Kopfarbeit:** Die Begeisterung am Neuen wächst sich gelegentlich auch zu rauschartigen Zuständen mit Grenzerfahrungen aus. Forschen ist mehr als eine Reise in unbekannte Welten. Es ist die Aufforderung zum zielgerichteten Handeln, planvollen Vorgehen und sauberen Experimentieren. Es ist die Verbindung von Kopf- und Handarbeit, und genau das macht ihren Reiz aus. Handarbeit tut Not in einer verkopften Schulwelt!
- **Rückschläge:** Forschen ist nur selten reines Vergnügen. Es ist zeitraubend und mit hohem Einsatz und Entbehrungen verbunden, kommt nicht ohne Frustrationen aus und erfordert Beharrlichkeit und Durchhaltevermögen. Was hilft, unvermeidliche Rückschläge zu überstehen, ist die exakte Protokollierung und die kritische Reflexion der Tätigkeiten und Ergebnisse, das Hinterfragen jedes einzelnen Schritts und die phantasievolle Suche nach Aus- oder Umwegen.
- **Schüler finden:** Woher kommen die Schüler? Dass sie aus eigenem Antrieb Kontakt zu einer Forscher-AG an der Schule suchen, kommt immer seltener vor. Also macht sich der Lehrer auf die Suche. Eine große Fundgrube ist der propädeutische NaWi-Unterricht in der Unterstufe. Dort machen Kinder durch außerordentliches Interesse, kluge Erklärungen, experimentelles Geschick oder erkennbare Begeisterung auf sich aufmerksam.
- **Ältere Schüler finden:** Wenn es den Zugang über die NaWi-Schiene nicht gibt, oder wenn man Jungforscher in höheren Jahrgängen gewinnen will, dann hilft oft ein Blick in die Notenlisten und ein Gespräch mit dem Mathe-, Physik-, Bio- oder Chemielehrer. Spitzennoten können aber niemals die alleinigen Auswahlkriterien sein.
- **Teamarbeit:** Die Themen werden in der Regel in Zweier- bzw. Dreiergruppen bearbeitet, wobei oft gute zwischenmenschliche Beziehungen und komplementäre Eigenschaften im Team zu besonders ambitionierten und erfolgversprechenden „Seilschaften“ führen. „Jugend forscht“ bietet für besonders Begabte an Gymnasien die Möglichkeit, die von Wirtschaft und Industrie so vehement geforderte, in einem Schulsystem mit Individualbewertung aber nur schwer praktikable Teamarbeit intensiv zu fördern.
- **Arbeitsteilung:** Teamarbeit gestattet auch im Falle anderer wichtiger Termine das Fehlen eines Teampartners bei Labormeetings. Die Arbeitsteilung wird gerade in starken Schaffensphasen oder in Stresssituationen bei Wettbewerben als Entlastung empfunden.

- **Elterngespräch:** Bei Neuzugängen in der AG ist ein offenes Gespräch mit dem Schüler und mit den Eltern zu empfehlen, in dem das freiwillige Engagement gewürdigt, aber auch der organisatorische Ablauf und die Zusatzbelastung angesprochen werden.
- **Siegermentalität:** Ein Einstieg im frühen Alter ist ratsam, weil man kaum auf Anhieb auf dem Siegereppchen landet. Dass man das will, hat keinen Rechtfertigungs- und Erklärungsbedarf. Es liegt in der Natur eines jeden Wettbewerbs. Kein Sportler nimmt an einem Wettbewerb mit der erklärten Absicht teil, nicht gut abschneiden zu wollen. Und wie im Spitzensport erfordert das Heranführen an immer anspruchsvollere Aufgaben und höhere Ziele einen langen Atem. Die Summe an Erfahrungen, durch wiederholte Teilnahme am Wettbewerb, trägt erheblich zur Reifung bei.
- **Einzelkämpfer:** Da gibt es das Märchen, dass sich ein rastloser kleiner Daniel Düsentrieb zuhause im Keller gegen den Widerstand der besorgten Mutter ein Labor einrichtet und eine revolutionäre Erfindung macht. Das lässt sich auch gut an die Presse verkaufen, nur leider läuft das in 99,9 % aller Fälle ganz anders. Vereinzelt gibt es sie noch, die Einzelkämpfer, die ihre eigene Idee umsetzen und damit im Wettbewerb durchstarten. Bei genauerem Hinsehen wird aber auch da oft deutlich, dass der Vater, ein Onkel oder eine Firma Hilfestellung geleistet haben. Ich habe einen hohen Respekt vor solchen Schülern und eigentlich sind es die wahren Helden der naturwissenschaftlichen Wettbewerbe, die es verdient haben, Spitzenplätze zu belegen.
- **Messbare Ergebnisse:** Der Alltag sieht aber anders aus. Ich habe es in über 30 Jahren Betreuer Tätigkeit ein einziges Mal erlebt, dass ein Schüler mit dem Hinweis an mich herantrat: „Ich hab‘ da ‘ne tolle Idee!“ Ich musste ihm seine Illusion schnell rauben, indem ich ihm nachwies, dass sich die Idee nicht in Untersuchungsreihen gießen lässt, aus denen messbare Ergebnisse herauskommen.
- **Themenfindung:** Und woher kommen die Themen? In aller Regel sind die Lehrer oder andere Mentoren die Ideengeber. Das ist ja auch in keiner Weise anrühlich. An der Hochschule sucht sich der Masterstudent oder der Doktorand einen Professor und der hat ein abgestecktes Forschungsgebiet, das in seinem Arbeitskreis bearbeitet wird. Also wird er dem Kandidaten sagen: „Das ist Ihr Thema!“ So funktioniert professionelle Forschung und deshalb muss man bei „Jugend forscht“ nicht so tun, als hätte irgendeine Muse die Kids heimlich geküsst.
- **Themensammlung:** Ich habe über viele Jahre in einem Ordner eine Themensammlung angelegt. Die Themen stammen aus Tageszeitungen, Magazinen, der „Apothekenumschau“ oder Fachzeitschriften wie „Chemkon“, „PdN-ChiS“ und „ChiuZ“. Die besten sind die, die auf den ersten Blick ganz trivial erscheinen, aber einen hohen Alltagsbezug haben. Dazu braucht es schon den geübten Blick und den sprichwörtlich guten Riecher.
- **Schulische Mittel:** Themen kommen natürlich nur dann für ein kleines Forschungsprojekt an Schulen in Frage, wenn sie mit schulischen Mitteln umsetzbar sind oder wenn mit den schulischen Möglichkeiten zumindest ein Einstieg möglich ist. Meine Aspiranten haben zunächst mit mir das Archiv des Lehrers nach dem passenden Projekt durchstöbert.

- **Forschungsschwerpunkt:** Als Schwerpunktthema hat sich in meiner langen Betreuer-tätigkeit die Wirt-Gast-Chemie herauskristallisiert. Das hing auch damit zusammen, dass über entsprechende Industriekontakte Zeolithe und Cyclodextrine als Materialspenden eingegangen sind. Beide faszinieren dadurch, dass sie molekulare Höhlen oder Poren-systeme bilden, in die sich Gastmoleküle passgenau einlagern lassen. So können Substanzen oder Wirkstoffe durch Adsorption deponiert werden, um sie ganz zu beseitigen oder die Entfaltung ihrer Wirkung zu verzögern. Zeolithe sind auch als Kataly-satoren eine äußerst interessante Substanzklasse. Es entwickelten sich Projekte, die in Wettbewerben sehr erfolgreich abschnitten. Der thematische Bogen dieser Arbeiten spannte sich von Zeolithen als Geruchsspeicher für Körperschweiß [6] über den katalytischen Abbau von FCKW [7] bis hin zum Einsatz von Cyclodextrinen zur Beseitigung von Mundgeruch [8] oder als Fluoreszenzverstärker bei Tumormarkern [9].
- **Aufsicht:** Auf eine Besonderheit des Fachgebietes Chemie im Rahmen des Wettbewerbs „Jugend forscht“ sei noch hingewiesen: Fast alle anderen Fachgebiete erfordern kein speziell ausgestattetes Labor mit strengen Sicherheitsregeln. Deshalb lassen sich bei Projekten aus diesen Bereichen Arbeiten auch mal zuhause oder ohne Aufsicht erledigen, zumindest streckenweise. Das gibt es in der Chemie nicht. Der Jungforscher braucht ein Chemielabor, und wenn er es in der Schule findet, dann erfordert das Arbeiten dort zwingend eine Aufsicht.
- **Forschertag:** Bei mir traf sich die Gruppe jeden Samstagvormittag im Schullabor und konnte Untersuchungen weitgehend ungestört und ohne permanenten Blick auf die Uhr in Angriff nehmen, deren Ausgang unvorhersehbar war. Deshalb war der Forscher-tag nach hinten offen. Zugegeben: Nicht jede Lehrerfamilie macht das mit, im Gegensatz zu Eltern, die sich freuen, wenn ihre Kids samstags unter sind! Die regel-mäßigen Labormeetings nutzten die Schüler aber nicht nur zum eifrigen Forschen, son-derne auch zu gemütlichen Kaffeetunden bei Plausch und Tratsch über den Schulalltag.
- **Betreuertätigkeit:** Die Unterstützung des Betreuungslehrers beginnt mit der Beratung bei der Themensuche und endet mit dem Fitmachen für die großen Wettbewerbe. Bei großen Erfolgen muss er auch das massive öffentliche Interesse und die starke Inanspruchnahme durch die Medien koordinieren und fürsorglich darüber wachen, dass die schulischen Leistungen nicht zu sehr leiden. Dazwischen liegen Aufgaben wie Literatursammlung, Einführung in oder Vertiefung von theoretischem Hintergrundwissen, Chemikalien- und Materialbeschaffung, Einarbeiten in die themenrelevanten Forschungs-methoden, Kontrolle des Zeitmanagements, Navigieren aus Sackgassen und Redigieren der schriftlichen Arbeit.
- **Literaturrecherche:** Am Anfang des Projektes steht ein umfangreiches Literaturstudium, bei dem der Betreuungslehrer behilflich sein muss, weil der Schüler selten in der Lage ist, aus dem umfangreichen Angebot der Suchmaschinen eine sinnvolle Auswahl zu treffen. Immer wieder kommt es vor, dass Untersuchungsergebnisse, die man im Labor mühsam zusammenträgt, längst beschrieben sind. Deshalb lohnt es sich gerade am Anfang, mehr Zeit in eine gründliche Recherche zu investieren, als sich Hals über Kopf in die praktische Arbeit zu stürzen.

- **Außerschulische Partner:** Forschungsprojekte sollten zunächst auf der Grundlage einfachster schulischer Mittel entwickelt werden. Wenn es eine Schülergruppe gibt, die sich regelmäßig trifft, kann die Einarbeitung in neue Arbeitsmethoden auch innerhalb der Gruppe geleistet werden, wobei erfahrene Schüler die Funktion von Tutoren übernehmen können. Wenn die schulischen Ressourcen ausgeschöpft sind, ist es durchaus legitim, die Unterstützung von außerschulischen Partnern aus dem Handwerk, dem Mittelstand, der Großindustrie sowie von Hochschulen und wissenschaftlichen Organisationen in Anspruch zu nehmen. Sie tragen dazu bei, dass die Arbeiten über schulisches Niveau hinaus reifen. Deshalb ist es von großem Vorteil, Kontakte zu außerschulischen Partnern zu pflegen.
- **„Bundesliga“ spielen:** In 30 Jahren habe ich bei 16 Bundeswettbewerben nicht nur eine zunehmende Perfektionierung der Arbeiten, sondern auch eine massive Steigerung des Betreuungsaufwandes registriert. Nicht nur die Leistung der Jungforscher, sondern auch die Qualität und der Umfang des Coachings entscheiden darüber, ob man Bundesliga oder Kreisklasse spielt. Und wenn man nicht vorher resigniert und sich für die „Bundesliga“ entscheidet, aber nicht die Mittel von „Bayern München“ zur Verfügung hat, dann bleibt einem nichts anderes übrig, als sich zumindest an der Spitze zu orientieren, vor allem wenn man weiß, dass es irgendwann zum Aufeinandertreffen kommt.
- **Hohe Hürden:** Von Jahr zu Jahr wurde mir deutlicher, dass ein einzelner Betreuungslehrer aus einer Schule nicht mehr mit der Betreuungs-Power von Eliteschulen, Universitäten, Forschungseinrichtungen und Schülerforschungszentren mithalten kann. Da hilft kein Jammern: Man hat die Wahl Schritt zu halten oder auszusteigen, weil die Richtung nicht mehr stimmt, oder man begnügt sich nur mit der Teilnahme und hinteren Plätzen.
- **Einbußen:** Engagierte und ambitionierte Schüler, die ihr Projekt und die Teilnahme an Wettbewerben ernst nehmen, müssen gelegentlich Einbußen bei Bewertungen im Pflichtunterricht hinnehmen. Nach meiner Erfahrung ist eine entsprechende Bemerkung im Abiturzeugnis oder ein zusätzliches Zertifikat als Beleg für das außerunterrichtliche Engagement mehr wert als die Mathe-1. Bei den Personalabteilungen vieler Firmen ist das ein Alleinstellungsmerkmal, das über die Einstellung entscheidet.
- **Musterarbeiten:** Zum Schluss möchte ich noch darauf hinweisen, dass die im Folgenden beschriebenen Jugend forscht-Projekte aus der Zeit von 2001 bis 2017 stammen und unter anderen als den heute gültigen Prämissen entstanden sind. Viele von ihnen ließen sich unter Berücksichtigung der verordneten Sicherheitsregularien heute nicht mehr in der vorliegenden Form durchführen. Trotzdem oder gerade deshalb halte ich sie für mitteilenswert. Einige mögen sehr anspruchsvoll erscheinen, weil sie schon Züge einer Bachelor- oder Master-Arbeit tragen. Das ist das Ergebnis einer langen Entwicklung mit einer kontinuierlichen Steigerung des Niveaus. Aber auch wir haben mal ganz klein und bescheiden angefangen. Ich habe die 15-seitigen schriftlichen Arbeiten, deren Entstehung z. T. lange zurückliegt, komprimiert und redigiert. Deshalb erscheine auch ich als Mitglied des Autorenteams. Meine ehemaligen Schüler, von denen viele heute professionelle wissenschaftliche Arbeiten publizieren, lassen den Einblick in ihre „Kinderstube“ zu, weil sie auch sagen wollen: „So ging’s bei mir mal los!“



### 3. Forschen als Schule fürs Leben: Die ehemaligen Jungforscher stellen sich vor

**Linda Friedel**  
(geb. Kersting)



**Jahrgang:** 1984  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2003  
**Teilnahme Jugend forscht:** 2. Platz Bundeswettbewerb 2001 (Fachgebiet Chemie)  
**Studium/Ausbildung:** Betriebswirtschaft Hochschule Aschaffenburg, Masterabschluss  
**Berufliche Tätigkeit:** Lehrauftrag Hochschule Aschaffenburg

**Annelot Krediet**




**Jahrgang:** 1983  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2003  
**Teilnahme Jugend forscht:** 2 x teilgenommen, 2. Platz Bundeswettbewerb 2001 (Fachgebiet Chemie)  
**Studium/Ausbildung:** Medizin (Universität Freiburg und Universität Utrecht/NL), Promotion 2016  
**Berufliche Tätigkeit:** Assistenzärztin im Fachbereich Anästhesiologie Universität Utrecht

**Julia Franz-Upmeyer**




**Jahrgang:** 1986  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2005  
**Teilnahme Jugend forscht:** Landessieg Bayern 2004 (Fachgebiet Chemie)  
**Studium/Ausbildung:** Architektur FH Würzburg, Arbeitsverhältnisse in Shanghai und Frankfurt  
**Berufliche Tätigkeit:** Architektin im Architekturbüro des Vaters

**Karin Ballmes**  
(geb. Krumbholz)



**Jahrgang:** 1986  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2005  
**Teilnahme Jugend forscht:** 2 x teilgenommen, Landessieg Bayern 2004 (Fachgebiet Chemie)  
**Studium/Ausbildung:** Werkstoffwissenschaften Universität Erlangen  
**Berufliche Tätigkeit:** Entwicklungsingenieurin bei Robert Bosch GmbH in Bamberg, seit 2018 Teilprojektleiterin im Bereich der Lambdasonden

**Veronika Kilzer**



**Jahrgang:** 1989  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2008  
**Teilnahme Jugend forscht:** 5. Platz Bundeswettbewerb 2007 (Fachgebiet Geo- und Raumwissenschaften)  
**Studium/Ausbildung:** Mathematische Physik, Universität Würzburg, Master in Mathematik  
**Berufliche Tätigkeit:** seit 2016 Business-Engineer beim IT-Dienstleister DB System GmbH

**Lisa Gutjahr**



**Jahrgang:** 1989; **Abi Gymn. Hösbach:** 2009  
**Teilnahme Jugend forscht:** 3-mal: 4. Platz Bundeswettbewerb 2006 (Fachgeb. Chemie), 5. Platz Bundeswettbewerb 2007 (Fachgeb. Geo- und Raumwissensch.)  
**Studium/Ausbildung:** Chemie und Biochemie, Universität Würzburg, Master  
**Berufliche Tätigkeit:** Junior Scientist bei Sika Technology AG/Schweiz, Associate Expert bei Merck im Bereich Analytical Development

**Thomas Gnadnt**



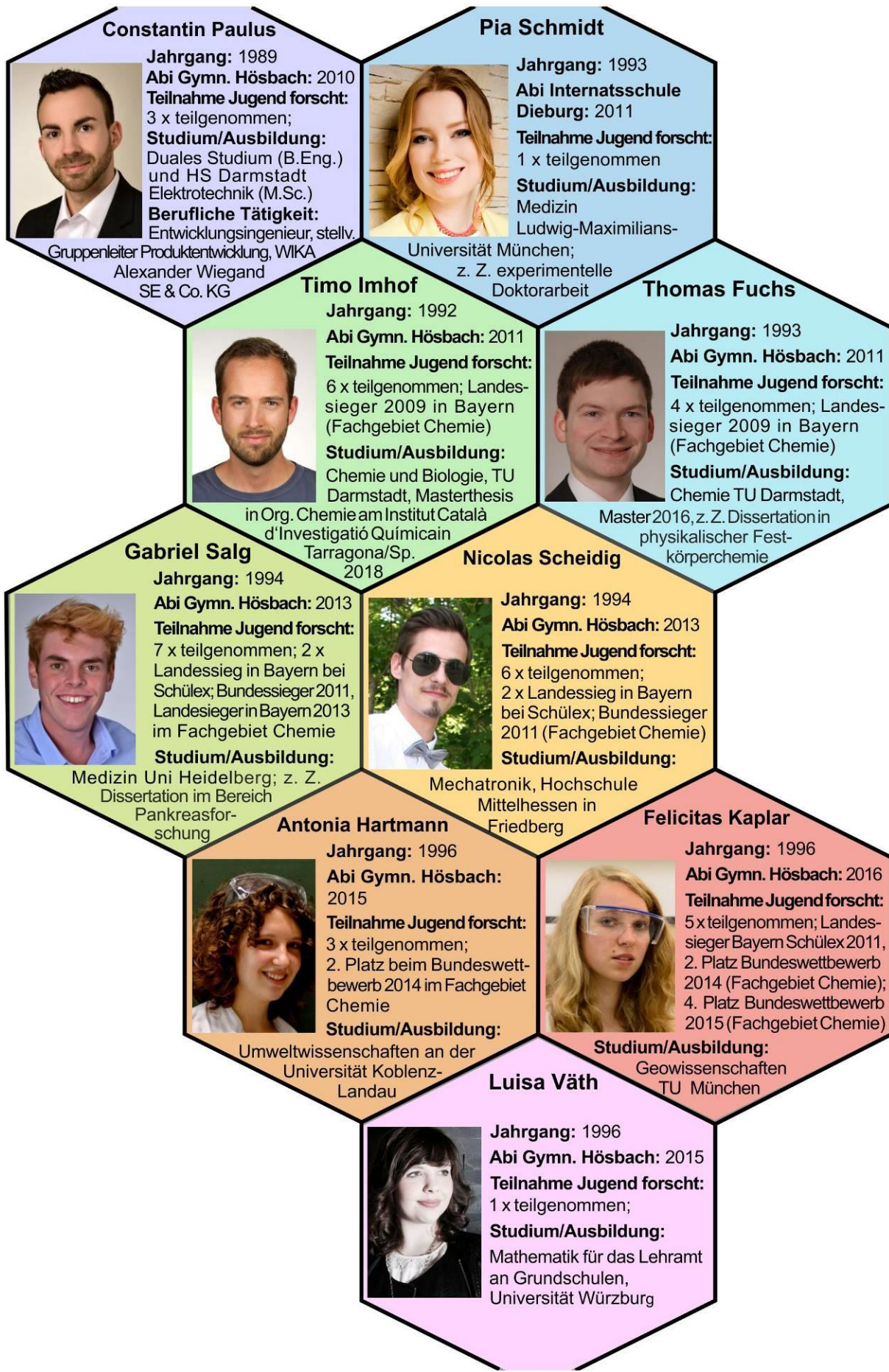
**Jahrgang:** 1987  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2006  
**Teilnahme Jugend forscht:** 3 x teilgenommen; 4. Platz beim Bundeswettbewerb 2006 (Fachgebiet Chemie)  
**Studium/Ausbildung:** Chemie Universität Würzburg Bachelor-Abschluss  
**Berufliche Tätigkeit:** Softwareentwickler

**Fabian Rodde**



**Jahrgang:** 1990  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2009  
**Teilnahme Jugend forscht:** 3 x teilgenommen;  
**Studium/Ausbildung:** duales Studium TU Braunschweig, Master in Wirtschaftsinformatik  
**Berufliche Tätigkeit:** Digital Consultant bei der Strategie- und Management-Beratung „zeb“





**Constantin Paulus**  
**Jahrgang:** 1989  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2010  
**Teilnahme Jugend forscht:** 3 x teilgenommen;  
**Studium/Ausbildung:** Duales Studium (B.Eng.) und HS Darmstadt Elektrotechnik (M.Sc.)  
**Berufliche Tätigkeit:** Entwicklungsingenieur, stellv. Gruppenleiter Produktentwicklung, WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG

**Pia Schmidt**  
**Jahrgang:** 1993  
**Abi Internatsschule Dieburg:** 2011  
**Teilnahme Jugend forscht:** 1 x teilgenommen  
**Studium/Ausbildung:** Medizin Ludwig-Maximilians-Universität München; z. Z. experimentelle Doktorarbeit

**Timo Imhof**  
**Jahrgang:** 1992  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2011  
**Teilnahme Jugend forscht:** 6 x teilgenommen; Landesieger 2009 in Bayern (Fachgebiet Chemie)  
**Studium/Ausbildung:** Chemie und Biologie, TU Darmstadt, Masterthesis in Org. Chemie am Institut Català d'Investigació Químicain Tarragona/Sp. 2018

**Thomas Fuchs**  
**Jahrgang:** 1993  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2011  
**Teilnahme Jugend forscht:** 4 x teilgenommen; Landesieger 2009 in Bayern (Fachgebiet Chemie)  
**Studium/Ausbildung:** Chemie TU Darmstadt, Master 2016, z. Z. Dissertation in physikalischer Festkörperchemie

**Gabriel Salg**  
**Jahrgang:** 1994  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2013  
**Teilnahme Jugend forscht:** 7 x teilgenommen; 2 x Landessieg in Bayern bei Schülex; Bundessieger 2011, Landesieger in Bayern 2013 im Fachgebiet Chemie  
**Studium/Ausbildung:** Medizin Uni Heidelberg; z. Z. Dissertation im Bereich Pankreasforschung

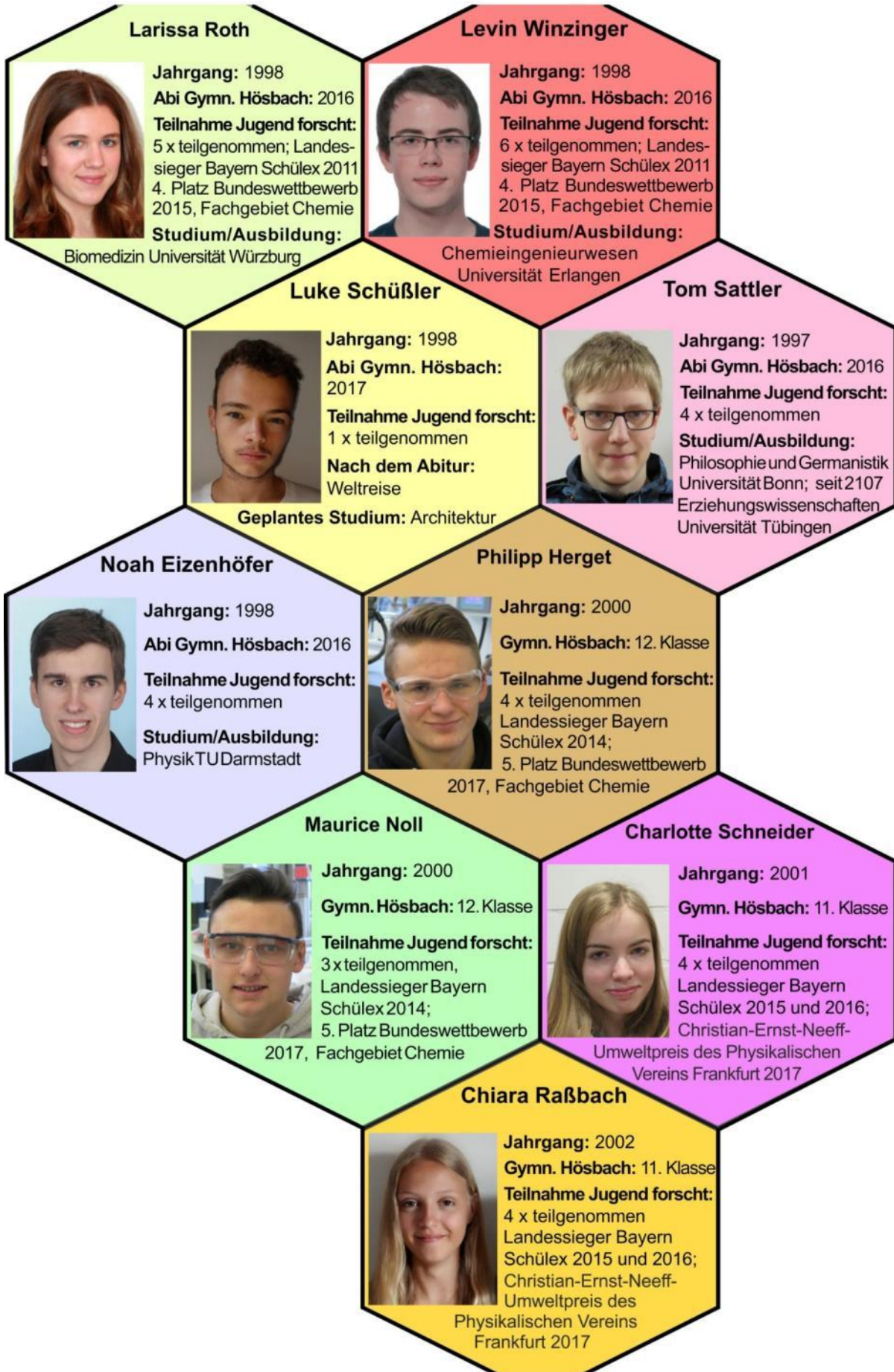
**Nicolas Scheidig**  
**Jahrgang:** 1994  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2013  
**Teilnahme Jugend forscht:** 6 x teilgenommen; 2 x Landessieg in Bayern bei Schülex; Bundessieger 2011 (Fachgebiet Chemie)  
**Studium/Ausbildung:** Mechatronik, Hochschule Mittelhessen in Friedberg

**Antonia Hartmann**  
**Jahrgang:** 1996  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2015  
**Teilnahme Jugend forscht:** 3 x teilgenommen; 2. Platz beim Bundeswettbewerb 2014 im Fachgebiet Chemie  
**Studium/Ausbildung:** Umweltwissenschaften an der Universität Koblenz-Landau

**Felicita Kaplar**  
**Jahrgang:** 1996  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2016  
**Teilnahme Jugend forscht:** 5 x teilgenommen; Landesieger Bayern Schülex 2011, 2. Platz Bundeswettbewerb 2014 (Fachgebiet Chemie); 4. Platz Bundeswettbewerb 2015 (Fachgebiet Chemie)  
**Studium/Ausbildung:** Geowissenschaften TU München

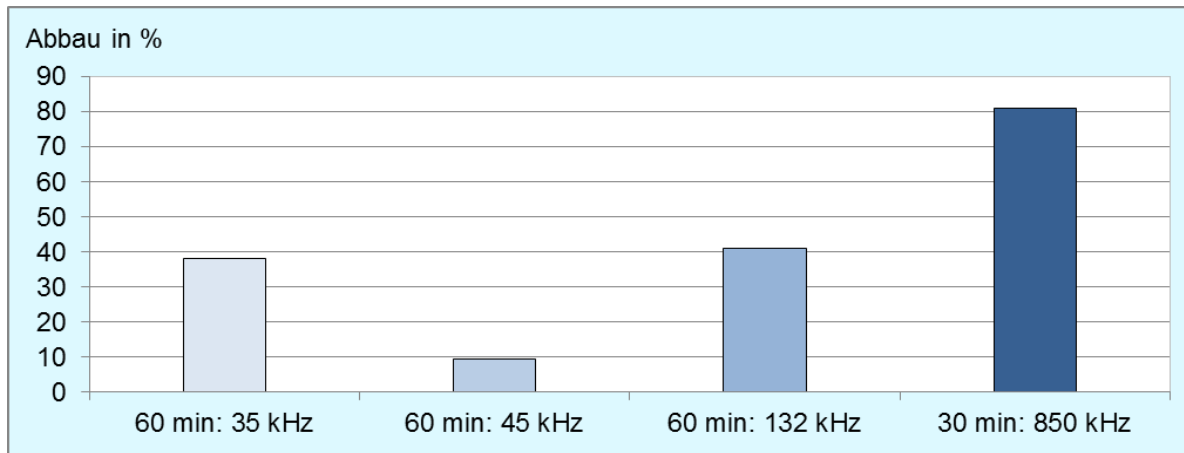
**Luisa Väh**  
**Jahrgang:** 1996  
**Abi Gymn. Hösbach:** 2015  
**Teilnahme Jugend forscht:** 1 x teilgenommen;  
**Studium/Ausbildung:** Mathematik für das Lehramt an Grundschulen, Universität Würzburg



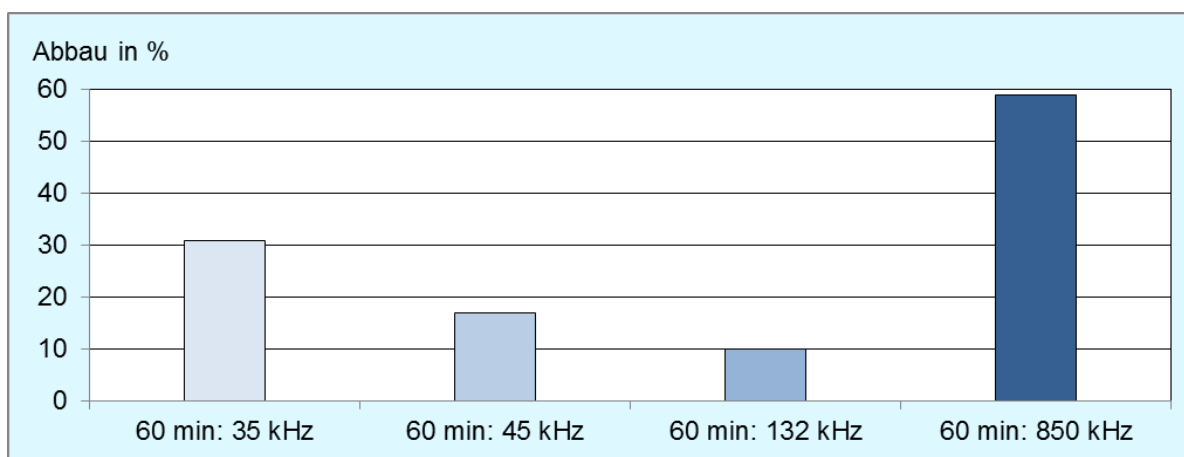




das 35 kHz-Ultraschallbad besser abschneidet als das mit einer 45 kHz-Schallquelle. Wahrscheinlich hat das damit zu tun, dass die größeren Kavitationsblasen für eine bessere Zerstörung der Chloroform-Moleküle in den Dämpfen in der Zone 1 sorgen. Man sieht aber auch, dass die verstärkte Bildung von OH-Radikalen bei hohen Frequenzen zu sehr guten Abbauleistungen führt.



**Abb.10:** Chloroform-Abbau in Abhängigkeit von der Ultraschallfrequenz (Headspace GC)



**Abb.11:** Toluol-Abbau in Abhängigkeit von der Ultraschallfrequenz (Headspace GC)

Mit der gleichen Methode haben wir auch den Abbau von Toluol als einen Vertreter aus der Gruppe der Aromaten untersucht. Das Ergebnis zeigt Abbildung 11. Hier liefern die Ultraschallquellen mit 35 kHz und 850 kHz die besten Ergebnisse, wobei der Ultraschallgeber mit den hohen Frequenzen mit einer Abbaurrate von 59 % deutlich vorne liegt.

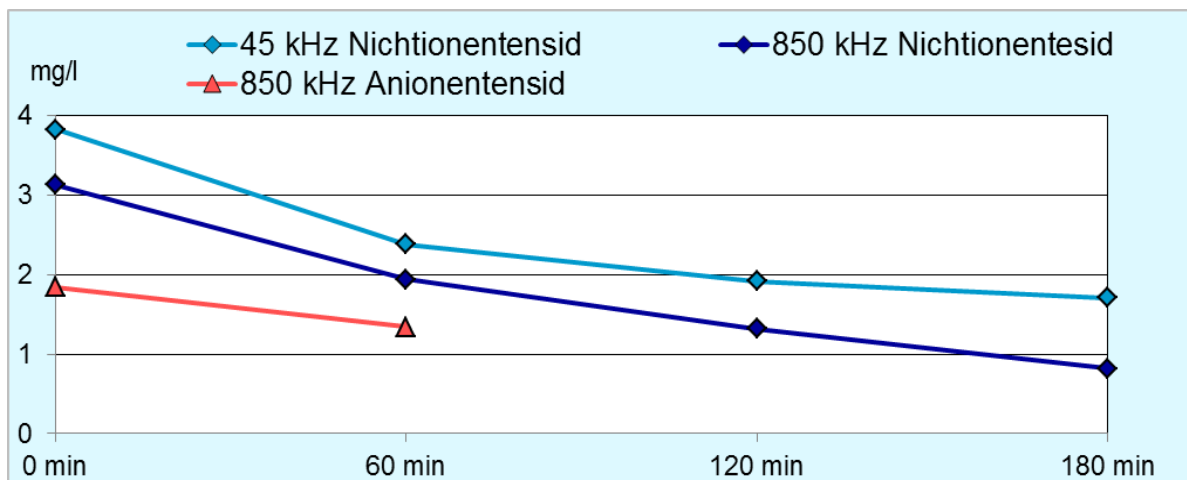
### Abbau von Tensiden im Umlaufbetrieb

Mit Blick auf praktische Anwendungen in der Abwasserreinigung sollte noch ein Experiment gestartet werden, bei dem die Wasserprobe nicht stehend, sondern in einem Kreislaufverfahren beschallt wird. Als Verunreinigung nahmen wir wieder Tenside und ließen die Lösung mithilfe einer Aquarium-Tauchpumpe in einem Kreislauf zirkulieren, der aus Schläuchen und Glasrohren zusammengebaut war. Der eigentliche Beschallungsreaktor war ein Glasrohr (L = 20 cm; Ø = 2 cm), das waagrecht im Ultraschallbad montiert wurde.



Es wurde von der Pumpe in einem offenen Becherglas mit der Lösung nichtionischer Tenside bekannter Konzentration versorgt. Beim dreistündigen Beschallungsversuch im 45 kHz-Ultraschallbad haben wir im 60 min-Abstand die Tensid-Konzentration von Proben bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 13 dargestellt. Immerhin ist der Gehalt an nichtionischen Tensiden nach 2 Stunden Beschallung im 45 kHz-Ultraschallbad auf über die Hälfte gesunken. Der 850 kHz-Ultraschallgeber schafft es in 3 h, Nichtionentenside um fast 75 % abzubauen, während die Anionentenside in 1 Stunde „nur“ um 27 % abnehmen.

**Abb.12:** Umlaufbetrieb mit Aquariumtauchpumpe



**Abb.13:** Tensidabbau in einem beschallten Abwasserkreislauf

## Zusammenfassung

Zwei junge Forscherinnen im Alter von 13 und 14 Jahren untersuchten den Abbau von Schadstoffen mithilfe der Aquasonolyse. Dabei nutzten sie zur Zerstörung von Schadstoffen im Wasser die enorme Energie, die durch Implosion von Kavitationsblasen im Ultraschallbad frei wird, die hohen Scherkräfte und die sonolytische Bildung von Radikalen aus Wassermolekülen. Anhand von vier verschiedenen Ultraschallquellen zeigten sie, dass die Ultraschallfrequenz und die zugeführte Ultraschallleistung die entscheidenden Faktoren für den Abbau des Modellfarbstoffes Rhodamin B sind. Die Abbaurate kann durch Absenken der Temperatur und durch Additive wie Eisen-Ionen, Titandioxid,  $H_2O_2$  und deren

Kombination nochmals enorm gesteigert werden. Experimente im Ultraschallbad mit Phenol und Tensiden ergaben einen 90 - 100 %igen Abbau bei Beschallung mit 850 kHz im Zeitraum von 30 - 90 Minuten. Am Beispiel von Rhodamin B und von Kaliumhydrogenphthalat konnte gezeigt werden, dass 1 Stunde Beschallung mit 45 kHz bzw. 850 kHz zu einer 30 - 50 %igen Beseitigung des gesamten organischen Kohlenstoffs mit einer Umwandlung in harmloses CO<sub>2</sub> führt. Über die Headspace-GC-Methode konnte auch der Abbau von flüchtigen organischen Verbindungen im Wasser, wie Chlorform und Toluol nachgewiesen werden. Hier erwies sich der 850 kHz-Schallgeber als besonders wirkungsvoll. Ein Höhepunkt dieser Arbeit war der Versuch, den Abbau von Tensiden durch Ultraschall nicht in einem Erlenmeyerkolben im stationären Betrieb zu realisieren, sondern in einem Umlaufverfahren. Mithilfe einer Aquariumtauchpumpe zirkulierten Tensidlösungen in einem Kreislauf, wobei sie im Ultraschallbad eine Ultraschallstrecke in einem Glasrohr durchlaufen mussten. In zwei Stunden konnte die Tensidkonzentration empfindlich reduziert werden, so dass der Tensid-Anteil nur noch ca. 50 % betrug.

## **Summary**

Two young female researchers aged 13 and 14 are studying the degradation of pollutants by means of aquasonolysis. To destroy pollutants in the water they use the enormous energy that is released by implosion of cavitation bubbles in the ultrasonic bath, the high shear forces and the sonolytic formation of radicals from water molecules. Using four different ultrasound sources, they show that the ultrasound frequency and the delivered ultrasound power are the deciding factors for the degradation of the model dye rhodamine B. The rate of degradation can be increased enormously by lowering the temperature and by using additives such as iron ions, titanium dioxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and their combination. Experiments in an ultrasonic bath with phenol and surfactants show a 90 - 100 % degradation in sonication at 850 kHz over a period of 30 - 90 minutes. Using rhodamine B and potassium hydrogen phthalate as an example, it was shown that 1 hour of 45 kHz and 850 kHz irradiation leads to a 30 - 50 % elimination of all organic carbon with a conversion to harmless CO<sub>2</sub>. The headspace GC method has also been used to detect the decomposition of volatile organic compounds in water, such as chloroform and toluene. Here, the 850 kHz sounder proves to be particularly effective. A highlight of this work is the attempt to realize the degradation of surfactants by ultrasound not in an Erlenmeyer flask in stationary operation, but in a circulation process. Using an aquarium submersible pump surfactant solutions were moving in a circuit, where they had to go through an ultrasound path in a glass tube in the ultrasonic bath. In two hours, the surfactant concentration can be sensitively reduced, so that the proportion of surfactant is only about 50 %.

## **Danksagung**

Wir danken dem Verkaufsleiter der Firma Martin Walter Ultraschalltechnik AG, Herrn Julian Wind, für die großzügige Überlassung von zwei Ultraschallbädern und Herrn Clemens Meinhardt von der Firma Meinhardt Ultrasonics in Leipzig für die spontane Unterstützung mit einem 850 kHz-Schallgeber. Herr Dr. Patrick Bräutigam von der Universität Jena stand



uns mit Rat und Tat zur Seite. Dank sagen wir auch Herrn Wolfgang Hensel für die Vermittlung und Herrn Peter Maier (beide TAKATA, Aschaffenburg) für die Aufnahme von UV-VIS-Spektren.

## Literatur

- [1] B. Ondruschka, J. Lifka, J. Hofmann, Einfluss der Frequenz und Leistung auf die Aquasonolyse von Ethern, Chemie Ingenieur Technik (71) 7199, S 729 – 732, 1999
- [2] J. Lifka, B. Ondruschka, J. Hofmann, Einsatz von Ultraschall zum Schadstoffabbau im Wasser: Aquasonolyse – Eine Übersicht, Chemie Ingenieur Technik (74) 41202, S 403 – 413, 2002
- [3] A. Thiem, U. Neis, TU Hamburg-Harburg, „Beeinflussung der Bioverfügbarkeit von kolloidaler, partikulärer und assoziierter organischer Substanz durch Ultraschall“, Abschlussbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Hamburg, 1999
- [4] A. Lühken, Ultraschall und Mikrowellenstrahlung im Chemieunterricht, Dissertation Universität Frankfurt, 2005
- [5] J. Hartmann, K. Neumann, E. Nietzsche, B. Kuhn, A. Meyer, Eliminierung von Pharmaka aus dem Wasser, [https://www.ufz.de/export/data/1/20324\\_07a\\_Hartmann.pdf](https://www.ufz.de/export/data/1/20324_07a_Hartmann.pdf); Zugriff am 16.12.2015
- [6] S.P. Meshram, D.T. Tayade, P.D. Ingle, P.D. Jolhe, B.B. Diwate und S.B. Biswas, „Ultrasonic cavitation induced degradation of congo red in aqueous solution“, Chemical Engineering Research Bulletin 14 (2010), 119 - 123
- [7] R-J. Lan, J-T Li, und B-H. Chen, “Ultrasonic Degradation of Fuchsin Basic in Aqueous Solution: Effects of Operating Parameters and Additives”, International Journal of Photoenergy Volume 2013, Article ID 893131, 7 pages
- [8] <https://de.wikipedia.org/wiki/Fenton-Reaktion>, Zugriff am 20.12.2015
- [9] <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/p/phenole.htm>, Zugriff am 06.01.2016
- [10] [https://de.wikipedia.org/wiki/Gesamter\\_organischer\\_Kohlenstoff](https://de.wikipedia.org/wiki/Gesamter_organischer_Kohlenstoff), Zugriff am 17.12.2015

## 5. Projekte aus der Sparte „Jugend forscht“

### 5.1 Wanted! Die Jagd auf freie Radikale (Jufo 2001)

von Annelot Krediet, Linda Friedel (geb. Kersting) und Roland Full

*Die „Freien Radikale“ bahnen sich ihren Weg nicht nur durch den menschlichen Stoffwechsel und durch tierische Zellen, sondern auch durch die seriöse aktuelle wissenschaftliche Diskussion und vor allem durch die Medien. Ein Modethema wie „Anti-Aging“ garantiert immer öffentliches Interesse. Alt werden und jung aussehen, davon träumen viele, ohne zu wissen, dass Altern eigentlich in der kleinsten funktionellen Einheit des Organismus, der Zelle, beginnt. Radikale sind es, die diesen Alterungsprozess vorantreiben. Angeregt durch Weinstudien, die glauben machen wollen, dass ein mäßiger Weingenuss der Gesundheit zuträglich sei [1], richtete sich das Interesse zweier Jungforscherinnen im Alter von 16 und 17 Jahren nicht nur auf die Radikalfänger im Wein. Sie suchten nach Methoden, um die Bildung und das Abfangen von physiologisch bedeutsamen und anderen Radikalen durch in-vitro-Experimente mit quantitativen Aussagen zu belegen. Als Radikalfänger waren neben Weinen auch alkoholfreie Alternativen wie Säfte und Extrakte von Obst und Gemüse von Interesse. Es wurde ein Prüfstand für Radikalfänger mit vier Tests eingerichtet, wobei zunächst erhebliche Entwicklungsarbeit in die Analytik mit quantitativer Detektion der Radikale investiert werden musste.*

#### **Einleitung und Problemstellung**

Nach Römpp [2] definiert man Radikale als meist sehr kurzlebige, valenzmäßig ungesättigte und daher reaktionsfähige Atome und Moleküle, die einsame Elektronen aufweisen. Das große Chemielexikon führt auch den Begriff „Freie Radikale“ und versteht darunter solche Radikale und Biradikale „deren einsame Elektronen nicht oder nur erschwert mit anderen Molekülresten, Doppelbindungssystemen oder Lösungsmitteln in Wechselwirkung treten können.“ Andere Standardwerke der chemischen Fachliteratur treffen allerdings eine solche Unterscheidung nicht [3, 4]. Für sie sind Radikale immer identisch mit freien Radikalen. Man darf wohl vermuten, dass der Begriff „Freie Radikale“ sich mehr im populärwissenschaftlichen Sprachgebrauch entwickelt und etabliert hat.

Als Radikalfänger bezeichnet man die Substanzen, die reaktive Radikale durch chemische Reaktionen „unschädlich“ machen. Eine Gruppe von Radikalfängern gehört selbst zu den Radikalen. Sie reagieren daher mit den abzufangenden Radikalen unter Bildung einer  $\sigma$ -Bindung (Radikalkombination) oder durch Disproportionierung. Andere Substanzen können an ein ungepaartes Außenelektron von freien Radikalen „andocken“. Radikalfänger werden so gewählt, dass die neu entstehenden Radikale reaktionsträge sind und sich nicht an Kettenfortpflanzungsreaktionen beteiligen. Der Begriff „Antioxidantien“ wird in der Regel synonym zur Bezeichnung Radikalfänger verwendet.

Radikale können durch Autoxidation das Ranzigwerden von Fetten [5] hervorrufen, aber auch als Carcinogene, Mutagene und Teratogene Krebs oder genetische Defekte bewirken [6]. Der Körper verfügt über einige natürliche Radikalfänger, wie z.B. das Cystein oder Melanine. Auch in Pflanzen wurden viele antioxidative Stoffe gefunden. Was die Aus-

wirkung des Weingenusses auf die menschliche Gesundheit angeht, so kam es in jüngster Zeit zu überraschenden Erkenntnissen. Statistische und epidemiologische Studien belegen, dass in Regionen mit regelmäßigem Weinkonsum weniger Menschen an Herz-Kreislauf-Erkrankungen sterben [1], aber auch das Krebsrisiko wird deutlich minimiert. Auch von Soja [7] und Ascorbinsäure (Vitamin C) sind antioxidative Aktivitäten bekannt. In einem Artikel in der Zeitschrift „Nature“ werden Vitamin C und Äpfel bezüglich ihrer Eigenschaften als Radikalfänger verglichen. Dabei stellt sich heraus, dass Äpfel aufgrund ihrer phenolischen und flavonoiden Zusätze dreimal stärker antioxidativ wirken als die Ascorbinsäure. Außerdem weisen die Autoren eine deutliche Hemmung des Wachstums von bestimmten Krebszellen nach [8]. Wie wir von Ärzten im Bekanntenkreis erfuhren, wird auch die Mistel im Kampf gegen den Krebs eingesetzt, indem man Patienten Extrakte verabreicht. Es bleiben außer den genannten noch viele weitere Lebensmittel, die wir auf ihre Eignung als Radikalfänger untersuchen wollten. Die meisten davon sind als wirksame Mittel im Rahmen eines naturmedizinischen Ansatzes zur Krebsprophylaxe seit Langem im Gespräch.

Nach erheblichen Anfangsschwierigkeiten und monatelanger Suche nach einem experimentellen Einstieg fanden wir schließlich in der Literatur vier Methoden, die uns den Weg zur Erzeugung von Radikalen wiesen. Bei der Untersuchung der Radikalfänger-Effekte konzentrierten wir uns zunächst auf Obst und Gemüse, da sie eine Vielzahl von teilweise noch unbekanntem Inhalts- und Wirkstoffen enthalten, die als Radikalfänger in Frage kommen. Wegen möglicher Konservierungsstoffe und anderer Zusätze bei käuflichen Produkten entschieden wir uns, Frucht- und Gemüsesäfte selbst zu pressen und frisch einzusetzen, um sie auf ihre Eignung als Radikalfänger zu prüfen. Als wir italienischen Rotwein (Lambrusco, Chianti) mit einem pfälzischen Weißwein verglichen, waren die Ergebnisse so spannend, dass sie kurz vor Abschluss der Arbeit eine eigene Rotweinstudie mit Weinen aus verschiedenen Ländern und Abbaugebieten auf den Weg brachten. Weitere Testsubstanzen als Radikalfänger waren Traubensaft, grüner Tee, Früchtetee und Teegetränke. Hinzu kamen Misteltinktur aus der Apotheke und Knoblauch. Beiden wird ein antioxidatives Potential und eine krebsvorbeugende Wirkung nachgesagt. Von Soja wurde ein flüssiger Auszug hergestellt. Dazu wurden 2 g Soja-Stücke pulverisiert, mit 50 ml Wasser 30 Minuten gerührt und nach dem Filtrieren der Suspension als Sojaextrakt eingesetzt.

### **Generierung und Nachweis von Iod-Radikalen**

Bei der ersten Versuchsreihe verwendeten wir Tetraiodethen ( $C_2I_4$ ) als Radikalquelle [9]. Es spaltet schon bei Belichtung mit dem Dia- oder Overhead-Projektor Iod-Radikale ab, die anschließend zu Molekülen kombinieren, wenn sie nicht durch einen Radikalfänger gebunden werden. Iod ist für den Organismus ein Spurenelement, dessen Hauptteil als organisches Iod in den Schilddrüsenhormonen Tri- und Tetraiodthyronin gebunden ist. Iodradikale sind also physiologisch nicht von großem Interesse. Dennoch war uns das Tetraiodethen eine willkommene Modellsubstanz für einführende Untersuchungen zu Radikalprozessen, vor allem weil die Radikale einfach zu generieren sind. Blieb die Frage nach einer geeigneten Detektion.

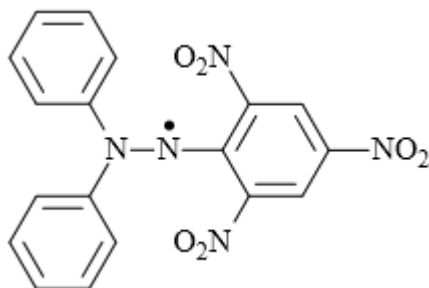


In einem 50 ml-Erlenmeyerkolben werden 0,1 g C<sub>2</sub>I<sub>4</sub> in 20 ml n-Heptan gelöst. Bestrahlt man die Probe unter Rühren mit der 350 W-Lampe eines Diaprojektors des Typs „Perkeo S 250“ der Firma Zeiss, so beginnt sich das Heptan innerhalb weniger Sekunden über schwach rosa nach violett als Folge der Iod-Ausscheidung zu verfärben. Durch Teile des sichtbaren Lichts ( $\lambda < 510$  nm) des Diaprojektors werden C – I- Bindungen (Bindungsenergie: 234 kJ/mol) photolytisch getrennt [9]. Unser Auge registriert eine kontinuierlich intensiver werdende Rosarot-Färbung, die Vergleiche mit quantitativen Aussagen – vor allem bei Radikal-Inhibition – nicht zulässt. Deutlicher verlief der Nachweis, als wir der Heptan-Lösung 5 ml einer 1 %igen Stärkelösung zusetzten. Durch intensives Rühren kommen die beiden Phasen trotz ihrer mangelnden Mischbarkeit miteinander innig in Kontakt. Nach etwa 5 Minuten nimmt die wässrige Phase plötzlich und reproduzierbar eine tiefblaue Farbe an. So lässt sich das Intervall vom Belichtungsbeginn zeitlich exakt eingrenzen. Weitere Untersuchungen zur theoretischen Fundierung dieses Befundes mit Heptan-Iod-Lösungen unterschiedlicher Konzentrationen, die durch Verdünnungsreihen hergestellt wurden, ergaben, dass die Iod-Stärke-Reaktion erst ab einem Mindestgehalt von 1,5 mg Iod in 20 ml der Heptan-Phase bei ca. fünfminütigem, intensiven Rühren anspringt. Iod-Gehalte, die darunter liegen, führen auch bei langem Rühren zu keiner Blaufärbung. Nach dem Nernstschen Verteilungsgesetz wird ein Teil des Iods aus der organischen Phase in die wässrige extrahiert:

$$K_N = \frac{c(I_2) \text{ in Petrolether}}{c(I_2) \text{ in Wasser}} = \text{ca. } 34$$

Legt man den in der Literatur für ein Petrolether/Wasser-Gemisch beschriebenen Wert zu Grunde [10], so sollte sich die wässrige Phase mit 11  $\mu$ g Iod anreichern. Dies scheint die Grenzkonzentration an Iod zu sein, die eine Blaufärbung mit Stärke auslöst. Der Einfluss von Radikalfängern ließe sich dann anhand der zeitlichen Verzögerung der Blaufärbung nach Verbrauch des Radikalfängers im Vergleich zur undotierten Probe ermitteln.

### Abfangen von Iod-Radikalen

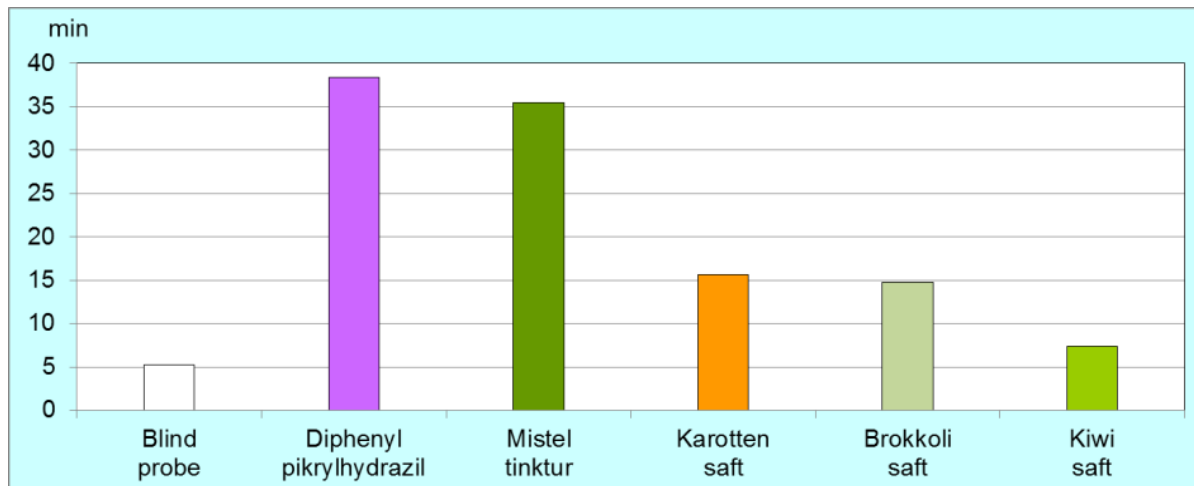


Wie die Abbildung 2 zeigt, bewirkt Diphenylpicrylhydrazyl die längste Verzögerung. Das überrascht nicht, wenn man bedenkt, dass es sich um ein im Handel erhältliches, stabiles Radikal handelt, das laut Römpps Chemielexikon auch zur quantitativen Bestimmung von Radikalen eingesetzt wird [2].

**Abb.1:** Strukturformel von Diphenylpicrylhydrazyl

Mistel schneidet besser ab als Karottensaft mit dem Farbstoff  $\beta$ -Carotin, das nach Lit. [9] in der Lage ist, Iodradikale durch Addition an seine Doppelbindungen abzufangen, bevor sich Iodmoleküle bilden. Brokkolisaft erreicht ebenfalls ein gutes Ergebnis, da die Induktionsphase für die Blaufärbung gegenüber dem Kontrollansatz um etwa das Dreifache verzögert wird. Die Kiwi liegt, trotz ihres hohen Vitamin C-Gehalts, eindeutig hinten. Ein Problem bei diesen Untersuchungen ist sicherlich die Dosierung des Wirkstoffes. Man kann Obst- und

Gemüsesaft oder auch Extrakte zwar in definierten Mengen zugeben, kennt aber nicht die Konzentration der enthaltenen Radikalfänger. So gesehen lassen die dargestellten Ergebnisse keinen streng quantitativen Vergleich zu. Gerne hätten wir in diese Messreihe auch Rotwein, Apfelsaft und andere Naturprodukte aufgenommen. Leider kommt es aber bei diesen Tests zu Trübungen und Ausflockungen, die irreguläre Bedingungen für die Belichtung schaffen. Gelegentlich tritt die Blaufärbung, wie bei der Blindprobe, nach 5 Minuten ein, was man als Ausbleiben des Radikalfänger-Effektes deuten kann. Es können aber auch andere, sich überlagernde Effekte eine Rolle spielen.



**Abb. 2:** Radikalfänger-Effekte bei Iod-Radikalen

### Generierung und Nachweis von Hydroxyl-Radikalen

Hydroxyl-Radikale verdienen aus physiologischer Sicht besondere Beachtung, weil die Zelle zum größten Teil aus dem Ausgangsstoff Wasser besteht und neben biochemischen Prozessen auch ionisierende Strahlung ihre Bildung initiieren kann. Ihre DNA-verändernde Wirkung ist unbestritten. Die Generierung gelingt auch durch UV-Bestrahlung von Wasserstoffperoxid. Beide Methoden scheiden für die Arbeit im Schülerlabor aus. Wir stießen auf einen Artikel [12], in dem „sonochemische“ Experimente für den Chemieunterricht aufbereitet werden. Er beschreibt, wie mit Ultraschall chemische Reaktionen ausgelöst oder stark beschleunigt werden können. Uns interessierte vor allem ein Versuch, der die Entstehung von OH-Radikalen in einem Ultraschall-Reinigungsbad beschreibt. Die Wirkungen von niederfrequentem Ultraschall (35 kHz) mit hoher Leistung (120 W) in Flüssigkeiten beruhen auf Kavitation. Im beschallten Wasser bilden sich kleine Bläschen, die durch Resonanz in lokalen Unterdruckbereichen wachsen, bis sie instabil werden und kollabieren und dabei in Mikrobereichen so drastische Bedingungen (500 bar, 5000 Kelvin) schaffen, dass die Energie zum Bruch von OH-Bindungen (437 kJ/mol) unter Bildung von Wasserstoff- und Hydroxyl-Radikalen führt. Diese Technologie bot sich auch für unsere Untersuchungen an.

In einem 100 ml Erlenmeyerkolben werden 25 ml Kaliumiodid-Lösung ( $c = 0,1 \text{ mol/l}$ ) in einem 0,1 molaren Phosphatpuffer,  $\text{pH} = 7$ , unter Eiskühlung (die Radikalbildung läuft bevorzugt bei tieferen Temperaturen ab) beschallt. Die gebildeten Hydroxyl-Radikale