



01/2023 • 65. Ausgabe

MARS

Mitteilungsblatt der Fachgruppe Magnetische Resonanz
der Gesellschaft Deutscher Chemiker

Liebe Kolleginnen und Kollegen,

in dieser Ausgabe möchten wir nun unser Versprechen einlösen, die Helium-Krise und ihre Auswirkungen näher zu beleuchten. Dies resultiert aus Diskussionen im Rahmen der FGMR-Mitgliederversammlung im vergangenen Jahr in Karlsruhe. Erica Brendler (TU Freiberg) und Karsten Seidel (BASF Ludwigshafen) haben dazu viele Informationen für uns zusammengetragen (Seite 6 und Seite 8).

Einschneidende Ereignisse haben uns jedoch dazu veranlasst, diese Ausgabe nicht nur, wie ursprünglich angedacht, als Helium-Sonderheft herauszubringen: Wir möchten gemeinsam mit Ihnen von Prof. Stefan Berger Abschied nehmen, indem wir an dieser Stelle seinem Leben und Wirken gedenken (Seite 2).

Weiterhin möchten wir über den Otto-Stern-Preis 2023 (Seite 3) und die PPNMR-Tagung mit einem Artikel von Andrea Porzel berichten (Seite 4). Außerdem geben wir einen Ausblick auf weitere interessante Tagungen und Schulungen geben, die in diesem Jahr noch vor uns liegen (Seite 5). Es grüßen Sie

jl, nes, mi

Inhalt

Nachruf auf Stefan Berger.....	2
Otto-Stern-Preis für Jean Jeener	3
Diskussionstagung „Praktische Probleme“ in Berlin-Buch.....	4
Termine 2023.....	5
2022 im Heliumrückblick	6
Heliumkrise 4.0 (?).	8
Zum Schluss... ..	14

Impressum

Herausgegeben vom Vorstand der Fachgruppe Magnetische Resonanz in der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), Varrentrappstr. 40-42, 60486 Frankfurt am Main, www.gdch.delfgmr.

Redaktion: Dr. Maik Icker (*mi*, Universität Leipzig, maik.icker@uni-leipzig.de), Dr. Johannes Liermann (*jl*, Universität Mainz, liermann@uni-mainz.de), Dr. Nils Schlörer (*nes*, Universität Jena, nils.schloerer@uni-jena.de).

Aus der Fachgruppe

Nachruf auf Stefan Berger

Am 2. April 2023 starb Prof. Stefan Berger, nach langer, mit Geduld ertragener Krankheit im Alter von 76 Jahren.

Vielen NMR-Spektroskopikern auf der ganzen Welt hat seine realitätsnahe und breit einsetzbare Enzyklopädie der NMR-Experimente (zuletzt erschienen in der Version „200 and More...“) unschätzbare Dienste erwiesen. Ebenso fehlen seine – stets im bewährten Autoren-Trio mit den Kollegen Braun und Kalinowski veröffentlichten – Standardwerke zu Kohlenstoff- und Heterokern-NMR in kaum einer

Bibliothek. Auch seine zahlreichen Beiträge zum experimentellen Repertoire der NMR-Spektroskopie offenbaren einen an den Entwicklungen rege teilhabenden Forschergeist.

Es würde der wissenschaftlichen und privaten Person Stefan Bergers nicht gerecht, seinen Einfluss und sein Wirken in einem Nachruf nur auf diese Fakten zu reduzieren. Vielmehr soll auch sein Charakter gewürdigt werden, als dessen wesentliche Merkmale Eigenschaften wie unbedingte Zugewandtheit, Bescheidenheit, Offenheit, Unbestechlichkeit, Humor und Willensstärke hervorzuheben sind – der bei den meisten Menschen, die ihn kennenlernten, einen bleibenden Eindruck hinterließ.

Als Humanist im besten Sinne in einem akademischen Elternhaus aufgewachsen, pflegte er den offenen, kritischen Dialog mit Mitarbeitern und Kollegen, ohne je auf andere herabzusehen. Trotz eines eher legeren Umgangstons und „outfits“ (legendär waren seine Nicki-Pullover) hielt er stets, auch als Zeichen des gegenseitigen Re-



spekts, selbst bei langjährigen Mitarbeitern am „Hamburger Sie“ fest. Trotzdem fühlte jeder, der mit ihm in den Dialog trat, eine besondere Nähe und bei jedem Gespräch das Wissen und den gebildeten Geist, die ohne jegliche Arroganz natürlich aus ihm sprachen.

Nach dem Chemie-Studium in Tübingen entdeckte er bereits während der Doktorarbeit die Faszination der jungen Disziplin NMR für sich, die sich durch einen Postdoc-Aufenthalt am California Institute of Technology (USA) noch vertiefte. Während seiner Zeit an der Marburger Uni-

versität als Leiter der NMR-Abteilung habilitierte er sich und wurde schließlich Lehrstuhlinhaber für Analytische Chemie an der Universität Leipzig. Stefan Bergers Lebenswerk wurde bereits an anderer Stelle (MARS 11/2006 und 1/2021) ausführlich gewürdigt, weshalb hier diesbezüglich nur einige Aspekte erwähnt werden. Neben den zuvor genannten Monographien wurde er durch eine Reihe von Publikationen zu experimentellen Entwicklungen bekannt. Zu nennen sind hier das ACCORD-HMBC, gsNOESY und diverse selektive ID-Experimente, sowie die Untersuchungen zu intermolekularen Wechselwirkungen mit Hilfe von DOSY- und heteronuklearen NOE-Experimenten. Auch Grundlagen-basierte Themen wie Quantencomputer oder der Haupt-Effekt wurden von ihm bearbeitet.

Eine wichtige Rolle spielte für StB (wie er seine Mails zu unterzeichnen pflegte) die Lehre auf verschiedenen Niveaus, die stets hohen didaktischen Ansprüchen genügte. Neben dem universitären Engagement waren besonders seine „GDCh-

Kurse“ zur NMR-Spektroskopie bekannt und geschätzt, durch die er unzähligen wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Mitarbeitern aus Industrie und akademischem Umfeld einen besseren Kenntnisstand und ein vertieftes Verständnis für den praktischen Umgang mit Spektrometer und Experiment vermittelte. Ebenso didaktisch, dabei aber auch als breit gefächerter Ausflug in die Allgemeinbildung bezüglich diverser Naturstoffe und der damit verbundenen, unterhaltsam eingestreuten spektroskopischen Strukturaufklärung zu verstehen ist sein mit Dieter Sicker kongenial verfasstes Werk „Classics in Spectroscopy“. Denselben Sujet ist auch die für eine allgemeinere Leserschaft verfasste Artikelserie in der Zeitschrift „Chemie in unserer Zeit“ gewidmet, die auch in ein Buch gemündet ist („Natural Products: Isolation, Structure Elucidation, History“). Sämtliche Beiträge basieren dabei auf Vertiefungs- und Abschlussarbeiten von Studierenden aus den Arbeitsgruppen von Sicker oder Berger.

Stefan Berger war trotz einer an Selbstaubeutung grenzenden Arbeitswut ein mit seiner Zeit diszipliniert umgehender Wissenschaftler, dem zwischenmenschliche und außerberufliche Aspekte des Lebens wichtig waren. Hierzu gehörten neben der Teilnahme am Kulturleben seiner Wahl-Heimatstadt Leipzig auch unvergessliche „soziale Events“ mit den Mitgliedern der Arbeitsgruppe. Als Doktorvater (mit der Betonung auf der zweiten Worthälfte) verfolgte er die Bemühungen seiner Schützlinge stets aufmerksam und mit hohem persönlichen Interesse. Die NMR-Spektroskopie verliert mit ihm nicht nur eine herausragende Persönlichkeit, sondern auch einen ganz besonderen Menschen.

mi, nes

Weitere Nachrufe

- *Nachrichten aus der Chemie* 5/2023:
DOI: [10.1002/nadc.20234136844](https://doi.org/10.1002/nadc.20234136844)
- *Appl. Magn. Reson.* **2003**, 54, 657–660
DOI: [10.1007/s00723-023-01550-x](https://doi.org/10.1007/s00723-023-01550-x)

Aus der Fachgruppe

Otto-Stern-Preis für Jean Jeener

Am 15. April wurde der diesjährige Otto-Stern-Preis der Fachgruppe an Jean Jeener verliehen. Da der Preisträger aufgrund seines hohen Alters nicht persönlich zur Preisverleihung anreisen konnte, wurde ihm der Preis von Jörg Matysik und Christian Griesinger in Brüssel überreicht:



The Otto-Stern Award is presented to Professor Jean Jeener in recognition of the invention of two-dimensional NMR spectroscopy.

Professor Jeener invented two-dimensional NMR spectroscopy and first formulated the two-pulse experiment which was named COSY by Richard Ernst later on. Together with Richard Ernst, he developed the NOESY and EXSY experiments both theoretically and experimentally.

After more than 50 years, polarization transfer via J couplings, as well as transfer via relaxation phenomena and exchange are still cornerstones of NMR spectroscopy for chemical analysis and for life and materials sciences.

Professor Jean Jeener's work shaped the NMR spectroscopy that we know today.

Jean Jeener ist am 10. Juni 2023 verstorben. Wir widmen den diesjährigen Otto-Stern-Preis daher besonders dem Gedenken eines Pioniers der Magnetresonanz!

jl



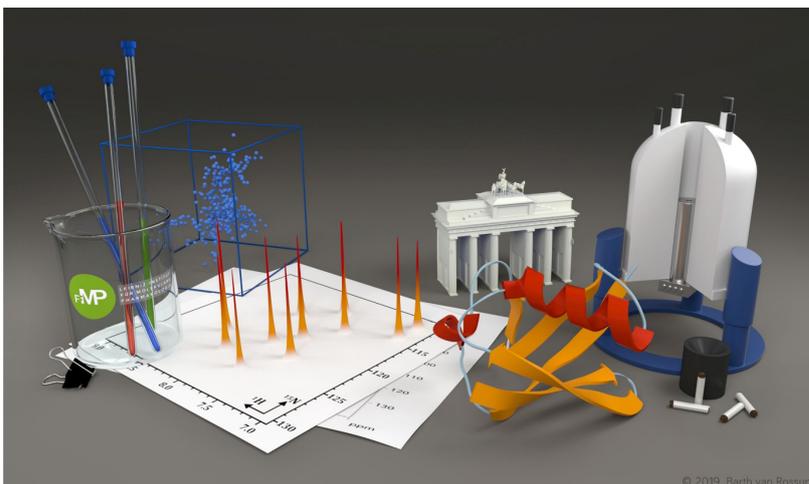
Aus der Fachgruppe

Diskussionstagung „Praktische Probleme“ in Berlin-Buch

Nachdem die Berliner Kollegen die schon fertig vorbereitete Tagung im März 2020 „dank“ Corona wenige Tage vor Beginn absagen mussten und die Tagung aus dem gleichen Grund 2021 und 2022 ausschließlich online stattfinden konnte, ist der vierte Versuch für eine Präsenz-Veranstaltung zur Freude aller Beteiligten dieses Mal geglückt: Am 21. und 22. März 2023 fand die 44. Tagung „Praktische Probleme der Kernresonanz-Spektroskopie“

2023 in Berlin-Buch statt. Gastgeber war diesmal Peter Schmieder mit seinem Team vom Leibniz-Forschungsinstitut für Molekulare Pharmakologie (FMP). Etwa 100 Kolleginnen und Kollegen aus Hochschulen, Forschungsinstituten, Industrie und Behörden kamen nach Berlin-Buch um an Tutorials, Vorträgen und Workshops teilzunehmen, vor allem aber auch um sich endlich wieder persönlich zu treffen, miteinander zu reden und Erfahrungen auszutauschen. Für diejenigen, die aus dem einen oder anderen Grund nicht selbst nach Berlin-Buch kommen konnten, gab es einen online-Zugang.

Die 18 Vorträge zu den Themengebieten Methoden, Praxis, Lehre, Daten, Software, Strukturklärung und Metabolomik/Umwelt spannten den Bogen – um beispielhaft drei zu nennen – von schnellen DOSY-Experimenten (Burkhard Luy, KIT) über FAIRe NMR Daten (Tillmann Fischer, IPB Halle) bis zur Charakterisierung von Honig mit ^{13}C -NMR (Svetlana Simova, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia). Großen Anklang fanden auch die beiden Tutorials „RF-Pulse für verschiedenste Anwendungen“ (Daniel Mathieu, Bruker) und „Unterdrückung von Lösungsmittelsignalen“ (Christian Richter, Uni Frankfurt). Am Nachmittag des zweiten Tages wurden in zwei parallelen Sitzungen vier Workshops angeboten. Bei der



großen thematischen Breite von Datenmanagement im NMR-Labor, Benchtop-NMR, High Power Diffusion & Micro Imaging und Heliumkrise 4.0 war für jeden etwas dabei.

Am Montag Nachmittag tagte der Arbeitskreis „Kleine Moleküle“ der GDCh-Fachgruppe Magnetische Resonanz und am Abend trafen sich alle im „Nolle“ unter den S-Bahn-Bögen des Bahnhofs Friedrichstraße. Während oben drüber die S-Bahnen donnerten, klang der Tag bei guten Gesprächen und ebensolchem Bier entspannt aus.

Dass die Tagung so erfolgreich war, lag auch an der großen Unterstützung durch das FMP und durch neun Firmen (ACD/Labs, Bruker, Jeol, Logs, Magritek, NMRtools, Oxford Instruments, Rototec/Spintec, Spin-Doc). Ein besonderer Dank gilt den Berliner Kollegen Peter Schmieder, Sebastian Kemper, Jan Dirk Epping und André Dallmann, die sich durch kein Virus entmutigen ließen, diese Tagung mehrfach zu organisieren.

Christian Richter von der Goethe-Universität Frankfurt wird der Gastgeber für die Tagung im Jahr 2024 sein – wir freuen uns schon auf ein Wiedersehen.

Andrea Porzel
Halle (Saale)

Vorschau

Termine 2023

Tagungen

-
- **ISMAR**
 20.–25. 8. 2023
 Brisbane, Australien

International Society of Magnetic Resonance
<https://ismar2023.org>

 - **Alpine Conference on Magnetic Resonance in Solids**
 10.–14. 9. 2023
 Chamonix Mont-Blanc, Frankreich
<https://alpine-conference.org>

 - **SMASH 2023**
 17.–20. 9. 2023
 Baveno, Italien
<https://smashnmr.org>

 - **FGMR Annual Discussion Meeting 2023**
 18.–21. 9. 2023 (Konstanz)
<https://www.uni-konstanz.de/fgmr-annual-discussion-meeting-2023/>

 - **HYP23 – International Hyperpolarization Conference**
 24.–28. 9. 2023
 Leipzig
<https://hyp23.org>

 - **The PANIC 2023 NMR Conference**
 17. 10. 2023
 Online
<https://panicnmr.com>

Schulungen und Kurse

-
- **Aufbaustudium Analytik & Spektroskopie**
 ab Oktober 2023
 Leipzig

Zusatzqualifikation zum Fachchemiker (Fachingenieur) für Analytik und Spektroskopie. Das Aufbaustudium ist für Teilnehmer mit Hoch- oder Fachhochschulabschluss in Chemie konzipiert, Absolventen einer anderen naturwissenschaftlich-technischen Fachrichtung können jedoch ebenfalls teilnehmen.
<https://www.chemie.uni-leipzig.de/studium/vor-dem-studium/studienangebot/aufbaustudium-analytik-und-spektroskopie>

 - **GDCh-Kurs NMR-Spektrenauswertung und Strukturaufklärung (Fortgeschrittenenkurs)**
 6., 13., 20. und 29. 9. 2023 (mittwochs)
 Online
<https://gdch.academy/course/nmr-spektrenauswertung-und-strukturaufklaerung-50623>

 - **GDCh-Kurs Fortgeschrittene praktische NMR-Spektroskopie für technische Beschäftigte**
 17.-19.10.2023
 Mainz
<https://gdch.academy/course/fortgeschrittene-praktische-nmr-spektroskopie-33523>



Sonderthema Helium

2022 im Heliumrückblick

Es ist der 24. Februar 2022. Die Medien berichten den Einmarsch Russlands in die Ukraine.

Und unser Heliumlieferant meldet *force majeure*, kann uns nur noch die Lieferung von 65 % des Heliumbedarfs zusichern, bei einer Preiserhöhung um 16%.

Ist die Liefersituation wirklich kritisch oder die Meldung eher eine Vorsichtsmaßnahme? Ein Anruf beim Vertreter: ja, es ist wirklich problematisch wie noch nie. Man hat sehr in den Osten vertraut und investiert, aber die Anlagen sind explodiert und die politische Situation wird eine schnelle Wiederherstellung verhindern.

Was tun? Zum Glück hatten wir auf Grund der schon eher angekündigten Preiserhöhung alle Geräte noch einmal gefüllt. Das verschafft uns etwas Luft. Unterstützt von Kollegen aus der zentralen Beschaffung fragen wir bei alternativen Lieferanten an. Überall das gleiche Problem, es reicht kaum für die Vertragskunden. Neue Kunden? Fehlanzeige.

Wir fragen bei den umliegenden Verflüssigungsanlagen an. Zum Glück ist Sachsen gut aufgestellt, alle großen Universitäten und die Forschungseinrichtungen in Dresden verfügen über solche Anlagen. Die Kollegen in Dresden und Leipzig signalisieren die Bereitschaft uns im Falle einer Ausnahmesituation mit einer kleinen Menge zur Geräterettung auszuhelfen. (Aber auch dies wird bald schwieriger, da die Verflüssiger nicht mehr ausreichend beliefert werden und Probleme haben den Eigenbedarf zu decken.)

Dafür brauchen wir eine eigene Kanne. Wir informieren die Fakultät und die Universitätsleitung über die Situation und bitten um Unterstützung. Alle sehen die Brisanz der Situation und mit den Beiträgen aller kann eine Kanne erworben werden. Die Lieferzeit ist coronabedingt beachtlich.

Wir schreiben an den Lieferanten um auf die Analogie zu MRT Geräten hinzuweisen und über den irreversiblen Verlust der Magnete aufzuklären, wenn nicht rechtzeitig Helium nachgefüllt werden kann. Halten Vorträge und wenden uns

an Politiker, um auf das Problem und die Ursachen aufmerksam zu machen und für die Schaffung einer Lösung zu werben. Das jährliche Wissenschaftskolloquium der Fakultät wird dem Element Helium gewidmet.

Wir informieren uns bei der DFG inwiefern der Aufbau einer Rückgewinnung unterstützt werden kann und erfahren, dass dies in das Hoheitsgebiet der Universität fällt.

Ein Workshop von IVAN NMR bringt uns die globale Dimension des Problems näher. Vorsichtig hofft man auf eine Verbesserung der Lage im zweiten Halbjahr. Wir recherchieren Ursachen und Alternativen.

Es hilft nichts – wir sollten unseren Heliumbedarf senken um längerfristig die Geräte absichern zu können, uns in den Regenerationskreislauf einzuklinken. Im Resultat entsteht eine Übersicht, die eine Entscheidungshilfe sein kann (s. Abb. 3 auf Seite 12).

Wir haben 4 Magnete in der zentralen NMR, die 2 l He (l) pro Tag abdampfen.

Ein eigener Verflüssiger? Selbst die kleineren Anlagen von Quantum Design u.a. sind für unseren Anfall überdimensioniert. Wir könnten sie zwar diskontinuierlich betreiben, haben aber weder den Platz im Gebäudebestand noch die erforderlichen Medien und das Personal zur Verfügung und auch nicht die Möglichkeit irgendetwas davon zu erweitern.

Aber die Recherche zu den Kleinverflüssigungsanlagen bringt uns in Kontakt zur Firma Bauer.

Sie bieten Kompressoren zur Verdichtung von Helium auf Flaschenbündel an, um es beim Gaslieferanten oder einer Großverflüssigungsanlage zu verflüssigen. Eine Vertreterin besucht uns und sie kann uns zwei Varianten anbieten, die in unserem Gebäude realisierbar wären. Ein Kompaktvariante – ein Kompressor mit eingebauter 0.5 m³ Blase, der das während des Gerätebetriebs abdampfende Helium auffängt und auf Flaschen presst. Oder einen Kompressor samt größerer, externer Blase, die bei ausreichender Dimensionierung zusätzlich

das bei den Nachfülloperationen anfallende Helium mit auffangen und verdichten würde. Eine Heliumblase im hohen Flur vor der NMR Abteilung an der Decke zu hängen wäre zwar cool und spacig, der Brandschutz sah das jedoch anders.

Also entscheiden wir uns für die Kompaktvariante. Den Anschluss der Geräte NMR übernimmt Bauer nicht, aber wir erhalten den Hinweis, dass Bruker diesen Kompressor angepasst für NMR Labors demnächst als Komplettpaket anbieten wird. Eine entsprechende Anfrage geht an Bruker. Wir müssen uns noch ein klein wenig gedulden, weil die Markteinführung unmittelbar bevorsteht, erhalten dann aber im Frühsommer ein Angebot, das Datenblatt und eine Application Note zur He-Rückgewinnung.

Für die Lieferung und den Anschluss der Flaschenbündel kann eine lokale Firma gefunden werden.

Bleiben noch einige essentielle Fragen – das liebe Geld, wer verflüssigt uns das aufgefangene Helium? Und wo können wir die Flaschenbündel aufstellen? Einfach im Labor wie im Heliosmart Flyer (Schweiz) geht in Deutschland nicht. Der Standort, den wir optisch und platztechnisch ideal finden, lässt sich bauseitig nicht realisieren. Hier gehen leider noch einige Monate ins Land, bis eine Lösung gefunden wird.

Ein Finanzierungsplan wird erstellt und mit dem Kanzler über die Realisierung gesprochen. Er sichert uns Unterstützung zu – wenn die offenen Fragen geklärt werden können.

Im August wird *force majeure* auf 50 % gesenkt und der Preis um weitere 22 % erhöht. Wir ändern die Füllstrategie von möglichst effizient auf möglichst sicher und bangen bei jeder Bestellung ob geliefert werden kann und wie voll die Kannen sind. Und wir sind den Disponenten des Lieferanten unendlich dankbar, dass sie es irgendwie geschafft haben uns ausreichend He zu liefern.

Kurz vor Weihnachten gibt es zwei entscheidende Durchbrüche – ein Vertrag zur Rückverflüssigung mit der TU Dresden steht vor der

Unterzeichnung und ein technisch und baulich realisierbarer Stellplatz scheint gefunden zu sein.

Nachdem alle wichtigen technischen Details geklärt sind haben wir ein neues Jahr und damit deutlich gestiegene Preise. Leider auch für Helium. Der Finanzierungsplan musste überarbeitet werden. Der Heliosmart ist bestellt, aber es bleibt spannend, denn noch sind nicht alle Fragen geklärt. Aber wir sind optimistisch, dass wir im 4. Quartal die Rückgewinnung realisieren können, um die kontinuierliche Arbeit der NMR Abteilung abzusichern, langfristig Kosten zu sparen und einen kleinen Beitrag zur Nachhaltigkeit für einen nicht regenerativen Rohstoffes zu liefern.

Ich habe im letzten Jahr viel über Helium, Wirtschaft und Politik gelernt. Die angekündigte leichte Entspannung für Ende 2022 ist auf die zweite Hälfte 2023 verschoben worden. Hoffen wir, dass in diesem Jahr keine neuen Havarien hinzukommen und wir weiter genug Helium erhalten können.

Erica Brendler
TU Freiberg



Sonderthema Helium

Heliumkrise 4.0 (?)

Helium, das zweithäufigste Element im Universum, mag auf den ersten Blick wie eine unerschöpfliche Ressource erscheinen, doch die Realität sieht anders aus. In den letzten Jahren hat sich die Knappheit von Helium zu einem zunehmend besorgniserregenden Problem entwickelt, das sowohl die wissenschaftliche Gemeinschaft als auch verschiedene Industriezweige betrifft. Die steigende Nachfrage und die begrenzte Verfügbarkeit dieses Edelgases haben zu Preisanstiegen und Engpässen geführt, die ernsthafte Auswirkungen auf Forschungseinrichtungen, medizinische Diagnoseverfahren und industrielle Anwendungen haben können.

In diesem Artikel werden wir uns eingehender mit der Knappheit von Helium befassen, die Auswirkungen auf verschiedene Bereiche beleuchten und potenzielle Lösungen diskutieren. Es ist von entscheidender Bedeutung, dass wir uns der Dringlichkeit dieses Problems bewusst sind und gemeinsam auf nachhaltige Strategien aufmerksam machen, um die zukünftige Verfügbarkeit von Helium zu gewährleisten und die Auswirkungen auf Forschung, Medizin und Industrie zu minimieren.

Helium ist für uns eine begrenzt verfügbare Ressource. In unserem Fachgebiet wird flüssiges Helium unter anderem zur Kühlung supraleitender Magnete für MRT, NMR-Spektroskopie und Hochfeld-EPR benötigt, aber auch angrenzenden Anwendungen wie SQUID-Magnetometrie, gaschromatographische analytische Verfahren, analytische Probenvorbehandlung oder Synchrotron-Röntgen. Wir hängen gesellschaftlich von Helium in vielerlei Hinsicht auch durch Teilchenphysik, Klimaforschung, oder Helium als technisches Schutzgas ab.

Preise für Helium waren bereits in der Vergangenheit lange volatil und steigend. Technische Trends führen eher mittelfristig zu Nachfrageänderungen, das Angebot schwankt jedoch kurzfristig stark. Zuletzt kam es aufgrund von Angebotsengpässen zur Verdoppelung und Verdreifachung

von Preisen innerhalb weniger Jahre. Dies führte in uns bekannten Fällen zu annualisierten Preissteigerungen in der Größenordnung von 100%, während Steigerungen von Etats, Gehältern beziehungsweise andere Anpassungen an die zuletzt hohe durchschnittliche allgemeine Preisinflation im selben Bemessungszeitraum deutlich unter 10% lagen.

Darüber hinaus zwingt inzwischen die begrenzte physische Verfügbarkeit die Betreiber, vorübergehende kostspielige Abschaltungen mit teuren Ausfallzeiten anzustoßen, um Schäden in noch größerer Höhe abzuwehren. Dauerhafte Stilllegungen wertvoller funktionierender Instrumente werden ebenfalls ernsthaft erwogen.

Als Betroffene stehen wir immer häufiger vor der Notwendigkeit, uns in dieser Situation erklären zu müssen. So obliegt die Entscheidung über finanzielle Mittel für die Beschaffung oder Alternativen oft Personen, die mit der Materie nicht eingehend vertraut sind. Auch müssen wir immer häufiger bei Kollegen anderer Fachrichtungen um Verständnis bitten, dass wir knappe finanzielle wie materielle Ressourcen in Anspruch nehmen.

Um dies besser vermitteln zu können, wollen wir uns hier in Erinnerung rufen, warum Helium eine begrenzt verfügbare wertvolle Ressource ist, und im Anschluss Handlungsmöglichkeiten aufzeigen.

Helium ist begrenzt verfügbar

Helium ist nach Wasserstoff das zweithäufigste Element im Universum. Es entstand in großem Anteil allgemeiner Theorie zufolge bereits beim Urknall in hohem Anteil und bildet sich fortwährend in Sternen durch Kernfusion nach. [Wikipedia]. So gesehen ist es im Universum alles andere als knapp. Auch hier bei uns direkt auf der Erde wird es durch natürliche Kernzerfälle schwerer Elemente¹ stetig gebildet.

¹ Die schweren Elemente unseres Planeten entstanden in Supernovae

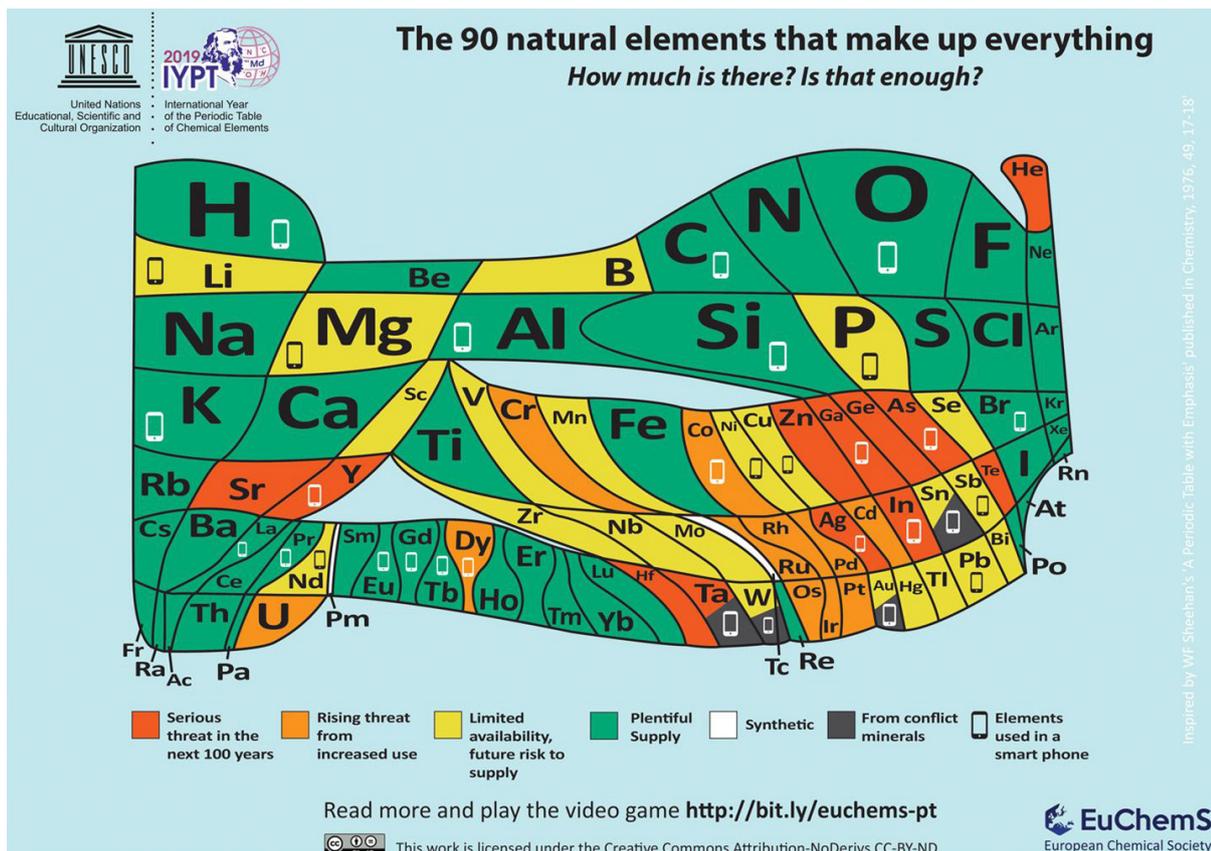


Abb. 1: Visualisierung der Verfügbarkeit der Elemente. (Quelle, abgerufen am 29. Mai 2023)

Dennoch zählt Helium zu einer kleinen Gruppe an Elementen, deren Versorgung noch in diesem Jahrhundert als kritisch eingestuft wird [Elements in Danger].

Aufgrund der geringen Masse des Heliumatoms überschreitet ein Teil des gasförmigen Heliums stets die Fluchtgeschwindigkeit der Erde (Maxwell-Boltzmann-Verteilung). Die Atmosphäre der Erde erfährt dadurch einen kontinuierlichen, unaufhaltsamen Abfluss von Helium.

Die technische Gewinnung von Helium ist schwierig, weil es nirgendwo besonders hoch konzentriert ist. Die bodennahe Erdatmosphäre enthält relativ wenig Helium, nur einige wenige Millionstel (ppm). [ACS, US Geological Survey] Die großtechnische Gewinnung von Helium erfolgt durch Abtrennung aus Erdgas. Im Erdgas hat sich Helium zur Konzentration von einigen Promille, im günstigen Fall einigen Prozent, also einige tausend Mal höher als in der oberflächennahen Erdatmosphäre, angereichert.

Über die größten zurzeit technisch erschlossenen Heliumreserven verfügen die USA, Katar sowie Algerien und diese stellen auch die größten Lieferanten dar [ACS]. Prinzipiell könnte auch Russland mit der neuen Abscheidung bei Blagoweschtschensk (Amur) dazu zählen. Bereits vor

dem Angriff Russlands auf die Ukraine, der handelsrechtliche Schranken nach sich zog, fiel diese Quelle jedoch technisch bedingt aus [Kornbluth 2023].

In diesem Zusammenhang sei auch die viel zitierte Nationale Helium-Reserve der USA im Cliffside Feld bei Amarillo, Texas, erwähnt. Dabei handelt es sich um eine ursprünglich natürliche Lagerstätte mit sehr hoher Helium-Konzentration. Sie diente seit den 1960er Jahren als Speicher und wurde durch eine damit verbundene Einrichtung zur Abtrennung mit Helium aus den umliegenden Erdgasfeldern befüllt. Im Zuge der nahenden Stilllegung und des Abverkaufs des gespeicherten Heliums aus dieser Einrichtung kam es zu Verwerfungen am Helium-Markt. Infolgedessen wurde der Ausbau einer nationalen Helium-Versorgung im "Helium Stewardship Act" aus dem Jahr 2013 geregelt. Er sollte der besonderen strategischen Bedeutung einer gesicherten Helium-Versorgung für die USA Rechnung tragen, die zivile Nutzung ausdrücklich eingeschlossen. Dies war nicht zuletzt auch ein Erfolg der großen Wissenschaftsorganisationen ACS, APS und MRS. Grundsätzlich kann man die USA daher in diesem Punkt deutlich besser aufgestellt bezeichnen als z.B. die EU. Allerdings kam es aufgrund von technischen



Problemen zu Engpässen bei der Heliumversorgung, die die Lage auf dem Weltmarkt verschärfen. Die Wissenschaftsorganisationen bemängeln daher nach wie vor unzureichende Investitionen in Helium-Rückgewinnung selbst in Nordamerika.

Geplante Wartungen, Havarien und Brände, der Wegfall von Transportwegen und Lieferungen, Transportengpässen durch COVID bedingte Schließungen von Häfen sind einige Faktoren, die die Situation in 2022 wie noch nie verschärft haben. Sie sind auch 2023 noch nicht vollständig überwunden und können aus verschiedenen Gründen wieder auftreten. Aufgrund des verstärkten Transports von Erdgas aus Algerien durch Pipelines nach Europa wird die LNG Produktion darüber hinaus reduziert und damit weniger Helium gewonnen.

So oder so, es ist ohnehin wahrscheinlich, dass Engpässe immer wieder auftreten, selbst wenn die Technik mitmacht und der Mensch friedlich bleibt: "A for-profit utility, like helium is becoming, will always experience super disruptive cycles of funding, bankruptcy, and supply failures" [Kornbluth 2022] Mit anderen Worten, eine unzuverlässige Versorgung mit schwankenden Preisen ist so wahrscheinlich wie die Wellen auf dem Meer und ist insbesondere für akademische Einrichtungen problematisch.

Nachdem wir nun erklären können, warum Helium so begrenzt ist, sollten wir unsere Argumente schärfen, warum Helium nicht nur für uns Spektroskopiker, sondern auch für die Gesellschaft eine wertvolle Ressource darstellt.

Helium ist eine wertvolle Ressource

Laut [Wikipedia] findet Helium Anwendungen in der Tieftemperaturtechnik, besonders als Kühlmittel für supraleitende Magneten, in Tiefsee-Atemgeräten, bei der Altersbestimmung von Gesteinen, als Füllgas für Luftballons, als Traggas für Luftschiffe und als Schutzgas für verschiedene industrielle Anwendungen (zum Beispiel beim Metallschutzgasschweißen, als Trägergas bei der Kapillargaschromatographie und bei der Herstellung von Silizium-Wafern).

Dass sich hinter Begriffen wie "supraleitende Magnete" handfeste gesellschaftliche Fragen verbergen, ist Entscheidern wohlmöglich nicht bewusst.

Selbst eine so banale erscheinende Anwendung wie Helium als Gas für Ballone hat, über Freude



Abb. 2: Einige nachhaltige Entwicklungsziele der Vereinten Nationen, die unserer Einschätzung nach unmittelbar mit Helium in Zusammenhang gebracht werden können. (Bildquelle: Vereinte Nationen UN.org)

bei Kindern und Faszination bei Physikern hinaus, eine gesellschaftlich sehr wichtige Funktion: So werden täglich startende Wetterballons mit Messinstrumenten mit Helium befüllt, die der Verfeinerung von Wetterprognosen dienen. An diesen wiederum hängt unsere Landwirtschaft, also das Berufsleben der Landwirte genauso wie die knappe Kasse vieler Verbraucher, nicht zuletzt sogar auch der Katastrophenschutz, siehe Ahrtal.

Ebenso müssen wir denken und argumentieren, wenn es um Hochfeld-MR geht! Was ist der eigentliche Nutzen unserer Arbeit, die wir ohne Flüssighelium-Kühlung bis auf Weiteres einstellen müssten?

Weit oben auf der Liste, und vielleicht noch unmittelbarer nachvollziehbar als der Wetterballon, ist sicher die medizinische Bildung, die ein unmittelbares Ergebnis mit hoher persönlicher Relevanz für Patienten mit sich bringt.

Des Weiteren Arzneimittel: Unsere Forschung zu Strukturverständnis von Proteinen, Plaques, Nukleinsäuren und damit wechselwirkenden Substanzen trägt dazu bei, Pharmazeutika zu entwickeln. Darunter sind Krebs, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Demenz und Infektionskrankheiten. Die Bioverfügbarkeit dieser Mittel erfordern außerdem effektive Formulierungen, seien es neueste fluide Nanokolloid-Konzepte für mRNA, die durch COVID-19 die große Bühne betraten, oder Tablettierungen mit lang etablierten Polymeren wie dem Evergreen Polyvinylpyrrolidon von 1939. Die Herstellung erfordert Qualitätskontrolle in der Produktion, Freigabe und das Verständnis von Rückständen in Produktionsanlagen.

Generell sind Eingangskontrolle von Rohstoffen, Qualitätskontrolle, Freigabe und die Vermeidung

dung unnötiger Anlagenwartungen in praktisch jedem Wertstrom jeden Produktes vertreten, und Magnetresonanz ist eine bedeutsame Methode dafür. Insbesondere über Analytik an großtechnisch hergestellten Monomeren steckt etwas Hochfeld-Magnetresonanz in fast jedem Produkt. Weitere Analytik kommt bei Zwischenprodukten, zum Teil auch festem Halbzeug und Endprodukten hinzu. Entsprechende Produkte finden sich in jedem Lebensbereich wieder, von A wie Auto bis Z wie Zahnpasta.

Neue, energiesparende Waschmittel setzen stark auf die biokatalytische Leistung von Enzymen, um die Reinigungskraft bei geringeren Temperaturen zu gewährleisten und gleichzeitig Fasern zu schonen.

Die Untersuchung von aktiven Zentren und Komplexen in heterogenen Katalysatoren mithilfe von strukturgebenden Verfahren verbessert die energetisch optimierte Umwandlung von Rohstoffen.

Sie liefert auch neue Ansätze für das Schließen von Wertstoffkreisläufen ("Circular Economy"), z.B. mithilfe von Depolymerisations-Katalysatoren, oder der Analytik von Pyrolyseöl.

Zunehmend viele von uns sind im Bereich der Batterieforschung tätig und tragen durch ihre Veröffentlichungen indirekt oder direkt z.B. zur Entwicklung schnellerer Ladezyklen oder Langlebigkeit bei Batterien bei. Diese verbesserten Energiespeicher erhöhen die Akzeptanz und Effizienz von Elektromobilität, und erlaubt es somit nachhaltig erzeugtem Strom, fossile Brennstoffe aus dem Verkehr zu drängen.

Analog zur Medizin unterstützt unsere Forschung durch Strukturaufklärung und Qualitätskontrolle die Wirkstoffforschung und Formulierung für Agrochemikalien, womit sich auch der Kreis zur Landwirtschaft und damit zum Ballon schließt.

Konfrontiert man uns mit der Überlegung, dass es außer NMR ja auch andere Analytik gibt, erinnern wir daran, dass Helium in der Analytik nicht nur in der Magnetresonanzspektroskopie eine Rolle spielt. So nutzen zum Beispiel auch leistungsstarke Massenspektrometer Heliumkryostate, es ist ein wichtiges Trägergas in der Chromatographie (zum Teil durch Stickstoff ersetzbar, aber nicht immer), und für Strukturaufklärung durch Synchrotrons unabdingbar (wobei die Synchrotrons Helium bereits recyceln).

Diese Aufstellung ist nicht abschließend, doch es sollte bereits hier für fast jeden Gesprächszweck ein Argument dabei sein. Denken Sie über

Ihr eigenes Forschungsgebiet nach, und heben Endanwendungen für das eigene Forschungsgebiet hervor.

Es ist festzuhalten, dass Helium als Kühlmittel für supraleitende Magnete eine praktisch unsichtbare doch letztlich allgegenwärtige Relevanz für unsere moderne Gesellschaft hat.

Diesen Endnutzen für den einzelnen Verbraucher und die Gesellschaft als Ganzes zu betonen, betrachten wir als Schlüssel, um für unsere Anliegen zu werben, die ja auch die Anliegen der Gesellschaft sind!

Was können wir nun praktisch tun, um unsere Abhängigkeit von einer physisch und finanziell schlecht planbaren Ressource zu reduzieren?

Handlungsmöglichkeiten

Einer der Autoren dieses Artikels wurde tatsächlich von einer anderen Person mit naturwissenschaftlichem Hintergrund gefragt, ob man den Helium-Auslass am Cryostaten nicht mit einer Art „Korken“ verschließen und mit einem Dewar unter Druck arbeiten könne. Da heißt es professionell bleiben und erläutern: Selbst wenn der Dewar den Druck aushält, funktioniert der Supraleiter nur unterhalb der Temperatur, die das Flüssighelium am Siedepunkt bei Umgebungsdruck hat, und das verdampfende Helium führt die nachströmende Wärme ab.

Eine konzeptionell elegante und tatsächlich inzwischen auch kommerziell erhältliche Möglichkeit, Flüssighelium und auch gleich Flüssigstickstoff loszuwerden, ist, Magnete mit aktiver Kühlung zu beschaffen. Diese finden inzwischen insbesondere bei Magneten für DNP-Gyrotrons Anwendung, die gegenüber der NMR-Spektroskopie relativ geringe Feldhomogenität erfordern. Methoden zur Homogenisierung der Feldstärke für MAS-NMR Anwendungen bei 400 MHz wurden beschrieben [Kryukov 2020], und Feldstärken auch darüber hinaus werden bereits kommerziell angeboten. Ihre Anschaffungskosten stehen jedoch Magneten mit Supraleitertechnologie in nichts nach. Ihr hoher Stromverbrauch erfordert zudem geeignete Stromversorgung im Labor sowie die Bewertung der Stromquelle, finanziell wie auch im Hinblick auf den CO₂-Fußabdruck. Wir werden die Entwicklung mit Spannung verfolgen. Im Moment ist die Feldhomogenität aber im Vergleich zu einem supraleitenden Magneten noch nicht in allen Bereichen konkurrenzfähig [IMRIS].



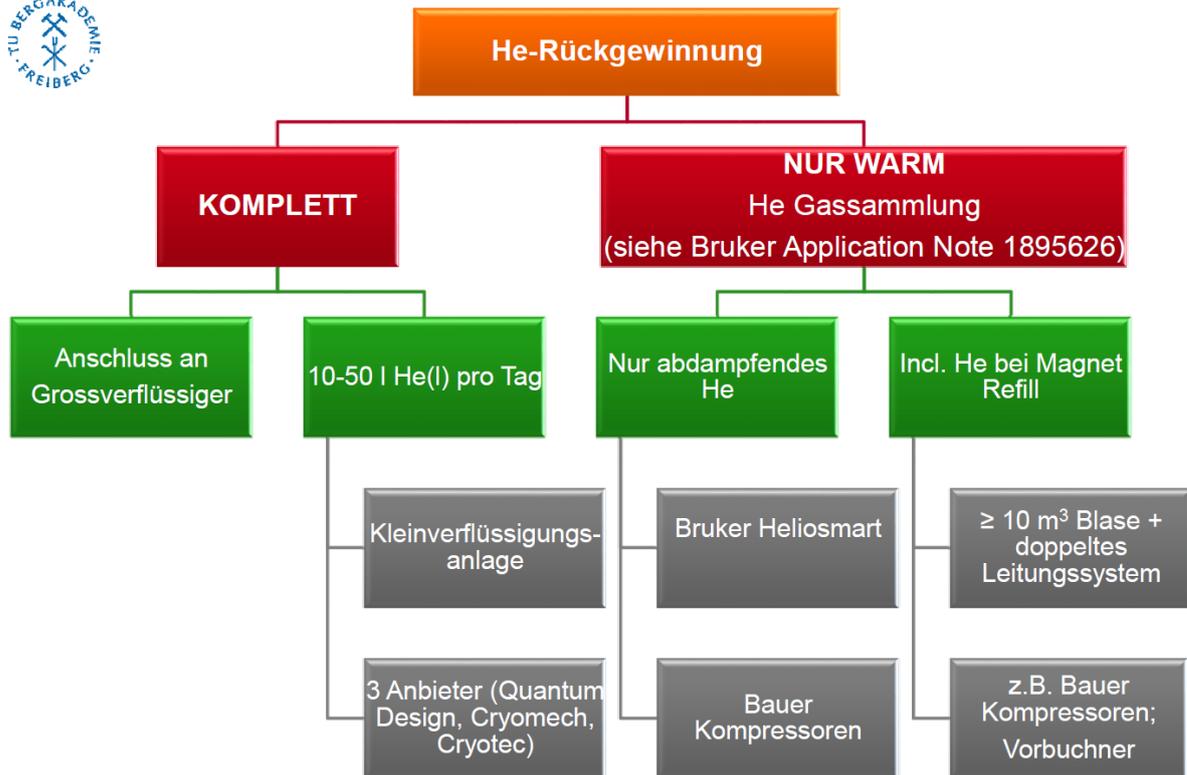


Abb. 3: Entscheidungsbaum für Helium-Rückgewinnung (Brendler, 2022)

Einige Labors, die eine besonders hohe Variati- on an Feldstärken wünschen, finden bei solchen Magneten einen wertvollen Zusatznutzen.

Zur Verbesserung der Laboreffizienz kann bei solchen Magneten die frei werdende Zeit aus dem wöchentlichen Stickstoff-Cryoservice beitragen. Kleine Labors könnten durch solche Magnete auch auf Handhabung "laborunüblicher" Mengen von Kryogenika gänzlich verzichten, und somit Anforderungen an Infrastruktur und Arbeitssi- cherheit verringern.

Schaut man sich allerdings in typischen Labors um, und behält im Kopf, dass die übliche Lebens- dauer eines Magnets einige Jahrzehnte betragen kann, ist vermutlich leicht nachvollziehbar, dass kühlmittelfreie Magnete keine kurzfristige Lösung für das Gros des Maschinenparks darstellen. Bei Neuanschaffungen können sie einen Blick wert sein.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Helium nur als internes Kühlmittel eines Magnetsystems mit Rückverflüssigung zu betrachten, analog zu einem gewöhnlichen Kühlschranks. Dies kann man pro Gerät oder für eine Einrichtung als Ganzes betrachten. Man kann es nachrüsten, auch relativ kurzfristig.

Dieser Ansatz erfordert also das Abfangen des Heliums, idealerweise in einem absolut geschlos- senen Kreislauf, um es rein zu halten, und die

anschließende Rückverflüssigung. Die Rückver- flüssigung kann im eigenen Labor vorgenommen werden, oder nach Verpressung auf Flaschen bei Dritten.

In der Regel befinden sich sehr starke Magne- te vor allem in größeren Einrichtungen mit vielen Instrumenten. Dort bestehen besonders hohe Synergien, weil die Rückverflüssigungskapazität in einer zentralen Anlage gebündelt werden kann. Insbesondere Einrichtungen, die in Nachbarschaft andere Flüssighelium-Nutzer haben, wie z.B. Be- schleuniger oder Tieftemperatur-physikalische Forschung, haben dies bereits vor Jahren etab- liert. Ein gutes Beispiel ist das BMRZ der Uni- versität Frankfurt mit über 20 Instrumenten. Der Kreislauf kann dort als näherungsweise geschlos- sen betrachtet werden: gasförmiges Helium wird per Leitung zur Rückverflüssigung transportiert, und verflüssigtes Helium per Kanne zum Magnet, wo es klassisch verfüllt wird. Die Rückgewin- nungsquoten liegen bei solchen Einrichtungen in der Regel über 80%, und erreichen bis zu 95 %, wenn das beim Nachfüllen freigesetzte Helium mit aufgefangen wird. Bei der Umsetzung kann grundsätzlich auch entschieden werden, auch den Quench- bzw. Installationsfall abzudecken, was für Hersteller der Magnete und Forschungs- einrichtungen mit Magnetentwicklung besonders relevant ist.

Angesichts der hohen Heliumpreise reichten sich inzwischen auch bei mittelgroßen Einrichtungen die Ausarbeitung kundenspezifischer Lösungen. Dazu zählen wir in diesem Zusammenhang Universitäten mit vielleicht einem halben Dutzend Spektrometern für analytische Dienstleistungen und Lehre, oder große Pharma- und Chemieunternehmen mit zentraler Analytik. Räumliche Nähe ist für eine Lösung mit zentraler Kompression natürlich von großem Vorteil.

Die Installation kann dabei selbst geplant werden, "Scrubber" zur Aufreinigung und Kompressoren für Helium gibt es von verschiedenen Herstellern. Es gibt auch Hersteller, die die Gesamtlösung bereitstellen können.

Zu den Unternehmen, die derzeit mit Nachdruck an einer Lösung arbeiten, zählt auch BASF. Zur Orientierung: das Unternehmen verfügt zwar „nur“ über mittelstarke Magnete von 300 (Wide-Bore) bis 700 MHz (Standard-Bore), dafür aber über mehr als zehn Geräte allein am Standort Ludwigshafen. Sie befinden sich aufgrund räumlicher Konsolidierung inzwischen alle in direkt benachbarten Gebäuden, weswegen eine zentrale Kompression und eventuell auch eine lokale Rückverflüssigung des verdampften Heliums inzwischen möglich wäre. Größere pharmazeutische Unternehmen dürften zumindest an ihren Hauptstandorten ebenfalls in der Größenordnung liegen, dass Heliumzyklisierung in Frage kommt.

Zu den Kostentreibern zählen bei diesem Weg vor allem die Rückverflüssigung mit ihren hohen Investitionskosten und ihren nicht zu vernachlässigenden Kosten für Wartung (externe und ggf. interne Betreuung zu Vollkosten). Daher kann es sich bei relativ kleinem Heliumbedarf besser darstellen, das Heliumgas vor Ort lediglich sauber in einen Zwischenspeicher (Ballon, Festbehälter) zu führen, und anschließend mit einem Kompressor auf Druckgasflaschen zu verpressen. Solche räumlich getrennten Prozesse erfordern geringere Investitionen beim Laborbetreiber, weniger Platz und erzeugen geringe Wartungskosten. Die externe Dienstleistung inklusive Transport muss dem natürlich entgegengerechnet werden. Da Rückverflüssigung (noch) nicht zum typischen Geschäftsmodell der großen Gase-Versorger zählt, ist es notwendig, Forschungseinrichtungen zu identifizieren, die ihre eventuell noch nicht vollständig ausgelasteten Anlagen für die Auftragsverflüssigung öffnen.

So lässt zum Beispiel die TU Darmstadt komprimiertes Helium ihrer NMR-Spektrometer zur Verflüssigung zur physikalischen Fakultät fahren,

und da sie das schon vor den letzten großen Preissprüngen taten und nur geringe Differenzen zukaufen müssen, konnten sie die jüngere Entwicklung relativ entspannt betrachten. Als Industrienutzer geht Merck mit einem HelioSmart-R an ihrem Standort Darmstadt seit Kurzem einen vergleichbaren Weg [Bruker].

In diesem Zusammenhang sollte auch geklärt werden, wer die LHe-Kanne bereitstellt, wobei man hierbei an die Wartungspflichten bei Druckgasbehältern denken sollte.

So eine Lösung kann besonders für Betreiber kleiner Einrichtungen ab einem Spektrometer eine Lösung darstellen.

In Zukunft erwarten wir als weiteren, allerdings finanziell vermutlich eher kleineren, Beitrag, dass die Berechnung von sogenannten Scope 2 und 3 Emissionen für Flüssighelium Einzug hält und einen positiven Beitrag für die Investition in Heliumrezyklisierung darstellen wird, denn Heliumabtrennung und Transport erzeugen CO₂-(-äquivalente) Kosten. Geeignete und belastbare Zahlen, die die derzeitige Gewinnung aus entfernten fossilen Quellen mit lokaler Rezyklisierung unter Berücksichtigung der dafür genutzten Energiequellen vergleichen, liegen uns allerdings noch nicht vor.

Während wir diesen Artikel nicht als Werbefläche nutzen wollen, möchten wir dennoch als Ansatzpunkte für weitere Recherche die in der folgenden Abbildung genannten Stichworte und Anbieter nennen. Möglicher Weise gibt es weitere Anbieter. Als Anbieter für Rückverflüssigungs-Dienstleistungen bieten sich physikalische Einrichtungen mit Beschleunigern sowie große NMR-Einrichtungen an.

Verpreisen des Ausfallrisikos!

Es mag überraschen, aber selbst wenn man sich an derzeitigen Flüssighelium-Beschaffungskosten orientiert, rechnet sich der Betrieb einer eigenen Rückverflüssigung bei einer Abschreibung der Investition über übliche 5 Jahre und des Vollkostenaufwands für Wartung und Betreuung kaum. Verflüssigung mit externer Verflüssigung kann sich – je nach Größe und Lage der Nutzer – etwas schneller bezahlt machen. Man kann hier noch argumentieren, dass die Anlage in aller Regel deutlich länger als 5 Jahre betriebsbereit sein wird.

Allerdings greift die Betrachtung der reinen Beschaffungskosten viel zu kurz: Wir befinden uns inzwischen in einer Situation, in der die tatsächliche, physische Verfügbarkeit von flüssigem Helium nicht mehr durchgängig gegeben ist – zumindest



nicht auf der Zeitskala der Helium-Haltdauer gängiger Kryomagnete. Das zwingt uns bzw. erlaubt uns, auch das Risiko des Ausfalls eines Magneten mit in die Rechnung einzubeziehen! Hierbei ist sowohl der Schaden zu betrachten, den ein Quench des Magnetfeldes insbesondere bei zu wenig Flüssigheliumreserve auf Magnete haben kann, als auch die Ausfallzeit des Instruments und die hohen Kosten für die Wiederinbetriebnahme. Gerade dort, wo der Ausfall eines Instruments bewirkt, dass Freigabeanalytik und Auftragsanalytik nicht mehr erfolgen kann oder man quasi blind forscht, können sehr hohe Folgekosten entstehen. Wir regen daher an, bei Gesprächen mit Entscheidern auch dringend auf diese Umstände hinzuweisen. Selbst wenn Sie, hier lediglich als Veranschaulichung genanntes Beispiel, nur 10% des Wiederbeschaffungswerts des Magnets und 10% der Einnahmeverluste ansetzen, kann das, zusammen mit geringerem Zukauf von Flüssighelium, die Wirtschaftlichkeit einer nachhaltigen Heliumversorgung leicht rechtfertigen.

Wir hoffen, mit unserem Beitrag Anregungen liefern zu können, dass Handlungsmöglichkeiten bestehen und begründet werden können. Über Zuschriften von "Best Practices", die wir sammeln und an Interessierte weitergeben dürfen, würden wir uns sehr freuen. Im Resultat der letzten PPN-MR-Tagung hat Sebastian Kemper ein Wiki² für Informationen zum Helium und zur Rückgewinnung angelegt. Dort werden interessante und wichtige Informationen, wie z.B. Datenblätter und Installa-

tionshinweise, gesammelt und zur Verfügung gestellt. Wir bieten auch an, uns mit interessierten Kollegen zum Beispiel auf der kommenden Fachgruppentagung in Konstanz auszutauschen.

Karsten Seidel
BASF SE

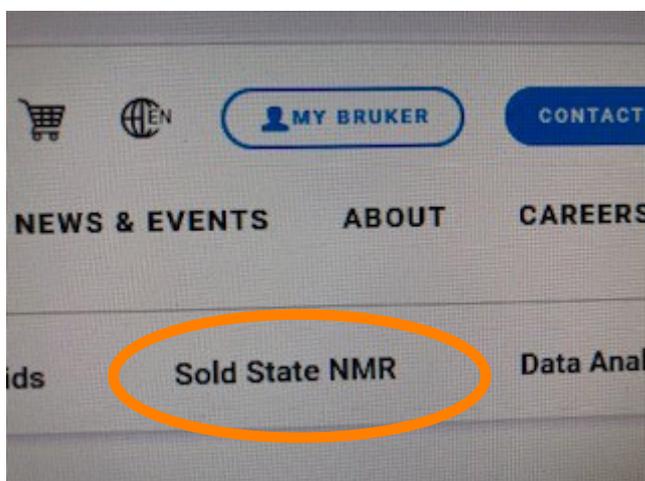
Erica Brendler
TU Freiberg

Referenzen

- [Elements in Danger]
[Link](#)
- [Wikipedia]
[Link](#)
- [ACS] C. Bettenhausen, *Helium is in short supply again*, *C&EN* **2022**, 100(6), [Link](#)
- [Whitepaper]
Gemeinsames [Whitepaper](#) von ACS, MRS und APS
- [Kornbluth 2022]
P. Kornbluth, *Latest Amur fire tightens helium supply for 2022*, *Gasworld* **2022**
- [Kornbluth 2023] Kornbluth, The Innovation Platform, ISSUE 13, 2023
- [Kryukov]
E. Kryukov et al., *Solid State Nucl. Magn.* **2020**, 109, 101684, DOI: [10.1016/j.ssnmr.2020.101684](https://doi.org/10.1016/j.ssnmr.2020.101684)
- [IMRIS]
[Link](#) abgerufen 2.6.2023
- [US Geological Survey]
[Link](#) abgerufen am 1.6.2023
- [Bruker]
[Link](#) abgerufen am 12.7.2023

² Username und Password zum lesen: *guest*

Zum Schluss...



... erreichte uns folgender Screenshot von der Bruker-Homepage.
Vielen Dank an Sebastian Kemper (TU Berlin)!