

Fragen zu den Gittergestützten Kernreaktionen: Mechanismen und Materialien



Infinite Energy (Ausgabe 118, November-Dezember 2014) 15-28

Questions About Lattice Enabled Nuclear Reactions: Mechanisms and Materials

David J. Nagel

nagel@gwu.edu, nucat-energy@gmail.com

Zusammenfassung

Fragen dienen dazu, die Diskussionen zu bestimmten Problemen im Bereich der Forschung sowie zu konkreten technischen Herausforderungen zusammenzufassen. Dieser Artikel ist der erste von drei Artikeln, in denen technische Fragen zu den Lattice Enabled Nuclear Reactions (LENR) (Gittergestützte Nuklearreaktionen) gestellt und diskutiert werden. Er befasst sich mit den theoretischen Zusammenhängen und den Schlüsselmaterialien im Zusammenhang mit LENR-Experimenten und möglichen Stromerzeugern.

1. Einleitung

Im Grunde erfüllen Wissenschaftler zwei Aufgaben: Zum einen müssen sie ständig neue Dinge lernen, und zum anderen müssen sie diese vermitteln. Die Wissenschaft ist ohne das Lernen nicht möglich. Doch was nützt das Lernen ohne die Weitergabe? Der Wunsch, etwas zu lernen, wird im Allgemeinen durch Neugierde angetrieben. Daneben gibt es für die Forschung aber auch noch andere Motivationen für den Wissenserwerb. Manchmal macht es Wissenschaftlern einfach nur Spaß, ihre Forschung zu betreiben. Dies ist häufig der Fall, wenn sie einfach nur ein Thema erforschen und dabei nicht unbedingt von irgendwelchen konkreten Fragen geleitet werden. Dennoch gehört die Beantwortung von Fragen zu den grundlegenden Beweggründen, Forschung zu betreiben – ganz gleich, woher die Fragen rühren.

Die Fähigkeit, wissenschaftliche Fragen zu formulieren und sich mit diesen zu befassen, erfordert ein hohes Maß an Ausgewogenheit. Die Beschäftigung mit Fragen, die viel zu einfach sind, verschlingt Zeit und Ressourcen. Und die Antworten auf solche Fragen bringen das Fachgebiet kaum voran. Auf der anderen Seite kann es sich als unklug erweisen, an Fragen zu arbeiten, die tatsächlich kompliziert sind. Diese Fragen und der Ruhm, der mit ihrer Beantwortung verbunden ist, sind mitunter äußerst reizvoll. Das hat aber auch seine Nachteile. Die Beantwortung schwieriger Fragen erfordert in der Regel einen relativ hohen Aufwand an Zeit und Geld. Und dabei ist der Erfolg alles andere als garantiert. Diese Überlegungen treffen auf die gesamte Wissenschaft zu. So auch auf die Erforschung der Gittergestützten Kernreaktionen, denn es handelt sich hierbei um einen Bereich der Wissenschaft.

Die Zusammenstellung und die Kommentierung von wissenschaftlichen und angrenzenden Fragen zum Thema LENR erfolgt aus zwei Beweggründen. Erstens scheint es sinnvoll, derartige Fragen an einer zentralen Stelle zusammenzufassen. Viele von ihnen stehen miteinander im Zusammenhang. Zweitens wird es, sobald LENR einmal als legitimes wissenschaftliches Forschungsgebiet anerkannt ist, von Regierungsbehörden als auch von großen Unternehmen finanzierte Programme geben, die darauf abzielen, das Verständnis von LENR sowohl aus wissenschaftlichen als auch aus ganz praktischen Gründen zu erweitern. Dieses Dokument soll als ein erstes Instrument zur Programmplanung dienen, um es hoffentlich in nicht allzu ferner Zukunft zum Einsatz zu bringen.

Die vorliegende Zusammenstellung und die entsprechenden Kommentare weisen zwangsläufig eine gewisse Begrenztheit auf, da es sich um die Ansichten einer einzelnen Person handelt. Eine Liste mit Fragen und Kommentaren, die von anderen Wissenschaftlern erstellt werden könnte, würde sicherlich einige Gemeinsamkeiten, aber auch gravierende Unterschiede aufweisen. Es sei darauf hingewiesen, dass

in der von Haiko Lietz moderierten CMNS-GoogleGroup^[1] eine kontinuierliche E-Mail-Diskussion zu grundlegenden Fragen bezüglich LENR geführt wird. Diese Diskussionen sind sehr hilfreich, in das übergeordnete Gesamtbild von Themen rund um LENR aber nicht integriert, so wie es mit dieser Arbeit angestrebt wird. Wir hoffen, dass es gelingt, mit dieser Zusammenfassung andere dazu anzuregen, weitere Fragen und Standpunkte einzubringen, die die Wissenschaft und die Anwendungen von LENR betreffen.

Im Mittelpunkt dieser ersten Arbeit stehen ein Dutzend grundlegender Fragen zu den Wirkungsmechanismen von LENR sowie zu den entsprechenden Werkstoffen. Dabei handelt es sich um einige der wirklich grundlegenden ungelösten Fragen, die das Studium von LENR sowohl erschweren als auch beleben. Die zweite Arbeit wird sich mit denjenigen experimentellen und rechnerischen Fragen befassen, die für den Fortschritt von LENR als Wissenschaft von Bedeutung sind. Viele dieser Fragen stehen in engem Zusammenhang mit den Fragen, die in dieser Arbeit behandelt werden. Die letzte Gruppe von Fragen zu LENR, die in der dritten Arbeit behandelt wird, beschäftigt sich überwiegend mit der Technik, den Anwendungen und der Kommerzialisierung von LENR-Generatoren zur Erzeugung von thermischer oder elektrischer Leistung bzw. Energie. Diese praktischen Fragen sind untrennbar mit der Wissenschaft zu LENR verbunden, da ein grundlegendes Verständnis von LENR die Antworten auf diese Fragen maßgeblich beeinflussen würde. Und in dem Maße, wie es gelingt, die eher praktischen Fragen zur LENR zu beantworten, sollten die daraus resultierenden Erkenntnisse auch in die Wissenschaft zu diesem Thema eingehen.

Im Jahr 2002 veröffentlichte Beaudette eine Broschüre mit Fragen und Antworten zu LENR.^[2] Im Jahr 2009 wurden von diesem Autor viele weitere technische und nichttechnische Fragen zu LENR gestellt und beantwortet.^[3] Die meisten dieser Antworten gelten auch heute noch. In einem kürzlich erschienenen Aufsatz haben McKubre und zwei Kollegen wichtige Fragen, die über die Wissenschaft zu LENR hinausgehen, aufgelistet und diskutiert.^[4]

Die Nummerierung der nachfolgenden Fragen dient lediglich zu ihrer Identifizierung. Das bedeutet, dass die Nummerierung keinen Hinweis auf eine relative Bedeutung gibt. Es besteht die Hoffnung, dass diese Fragen in Zukunft noch viel ausführlicher diskutiert werden, so dass eine Identifikationsnummer nützlich sein wird. Die beiden größten technischen Problembereiche bei der Untersuchung von LENR betreffen die Theorie und die in den Experimenten zu verwendenden Materialien. Aus diesem Grund befasst sich diese erste Arbeit mit ihnen. Die nachfolgenden beiden Abschnitte sind den Themen der Wirkungsmechanismen und der Werkstoffe gewidmet. Zu jeder Frage wird erklärt, warum sie gestellt wird, und es wird dargelegt, was zur Beantwortung dieser Frage unternommen werden könnte. Im abschließenden Abschnitt werden einige weitere Perspektiven aufgezeigt. Darin werden auch die Beweise für die nukleare Natur von LENR zusammengefasst.

2. Fragen zu den Wirkungsmechanismen

Die dringendsten Fragen bezüglich LENR beschäftigen sich damit, was bei derartigen Reaktionen vor sich geht. Wie kommt es zu LENR? Wenn dies bekannt wäre, dann könnte es relativ einfach sein, solche Bedingungen zu schaffen, die zu einer [reproduzierbaren](#), steuerbaren und zuverlässigen [Energieerzeugung](#) mit Hilfe von LENR führen. Darüber hinaus ließe sich möglicherweise sogar beeinflussen, welche spezifischen Reaktionen im Einzelnen zur Ausführung kommen, und somit die Erzeugung von Wärme oder anderen gewünschten Produkten optimieren.

Frage 1. Existiert da nur ein einziger grundlegender physikalischer Mechanismus oder handelt es sich um mehrere Mechanismen, die in den LENR-Experimenten zum Tragen kommen und zu den verschiedenen Messergebnissen führen?

Diese Frage ergibt sich aus der Vielfalt der bei LENR-Experimenten erzielten Ergebnisse sowie aus dem Bestreben nach einem grundlegenden Verständnis. So wurden große Mengen an [Wärmeenergie](#) und hohe Energiegewinne^[5], mikrosekundenschnelle Ausstoßprozesse^[6], Nuklearprodukte von [Tritium](#) und [Helium](#) über Elemente mittlerer Masse bis hin zu schweren Elementen^[7], schnelle Elementarteilchen – insbesondere [Neutronen](#)^{[8][9][10]}, aufgeladene Partikel^[11] und energiereiche [Photonen](#)^{[12][13]} – sowie

weitere Effekte wie die Emission von Hochfrequenz-^[14] und Infrarotstrahlung^{[15][16]} als auch von Schall^[17] gemessen. Darüber hinaus liegen empirische Belege dafür vor, dass es bei LENR-Experimenten zur Spaltung schwerer Elemente gekommen ist^[18].

Es ist vorstellbar, dass alle diese Ergebnisse durch einen einzigen grundlegenden LENR-Mechanismus erklärt werden können, oder aber durch einen einzelnen Mechanismus, dem weitere Reaktionen folgen. Es ist allerdings ebenso möglich, dass verschiedene Experimente auf unterschiedliche Bereiche eines allgemeinen Parameterraums zugreifen, wodurch das Wirken verschiedener Mechanismen befördert wird. Das Fehlen zahlreicher Korrelationen zwischen den verschiedenen experimentellen Ergebnissen aus den LENR-Experimenten deutet darauf hin, dass hier zwei oder mehr Mechanismen entweder gleichzeitig oder nacheinander am Werk sind. Es bestehen jedoch weitaus mehr potenzielle Korrelationen zwischen verschiedenen LENR-Produkten, als bisher experimentell ermittelt wurden. Diese besitzen eine Relevanz für die weiter unten folgende Frage 7, in der weitere mögliche Korrelationen diskutiert werden.

Zu den eher bemerkenswerten Beobachtungen, die bei vielen LENR-Experimenten gemacht werden, gehören die sehr geringen Mengen an Sofort- und Reststrahlungen. Bei der Frage nach den LENR-Mechanismen besteht eine zentrale Herausforderung darin, eine Erklärung sowohl für die geringen Mengen an energiereicher (Gamma-)Strahlung bei den Experimenten (wie sie z. B. bei der Heißen Fusion auftritt) als auch für die sehr geringen Mengen an Radioaktivität in den Materialien nach den Experimenten (ganz im Gegensatz zur Kernspaltung) zu finden.

Bei der Frage nach den Mechanismen geht es im Wesentlichen um die Frage, wie die elektrostatische Abstoßung (Coulomb) zwischen zwei Kernen überwunden oder vermieden werden kann, so dass beide die für ihre Reaktion erforderliche Überlappung der Wellenfunktionen erfahren können. Diese Frage wird erst dann beantwortet werden können, wenn ein grundlegendes Verständnis dessen entwickelt wurde, was in derartigen Experimenten vor sich geht, und zwar in einer Verbindung aus Theorie und Experiment. Dieses Verständnis zu erlangen, gestaltet sich jedoch äußerst schwierig. Es sind mehrere Schritte erforderlich: (a) die Entwicklung von theoretischen Konzepten, (b) ihre Reduktion auf Gleichungen, (c) Berechnungen auf der Grundlage dieser Gleichungen und (d) der Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den experimentellen Daten. In einer Übersicht über die Theorien zur „Kalten Fusion“ aus dem Jahr 1994 wurden die zahlreichen Ansätze, die damals zur Diskussion standen, kritisch bewertet.^[19] Mehr als drei Dutzend Theoretiker hatten bereits ihre Vorstellungen zum Entstehungsmechanismus der „Kalten Fusion“ dargelegt, die von den Autoren in 20 Kategorien eingeteilt wurden, von denen einige miteinander im Zusammenhang standen. Viele dieser frühen Konzepte sind im Laufe der Jahre in Vergessenheit geraten oder verändert worden, andere Ideen sind hinzugekommen. Kürzlich hat Storms 23 LENR-Theorien in sieben Kategorien einer Überprüfung unterzogen.^[20] Die Aufdeckung des Mechanismus bzw. der Mechanismen, die zur Beantwortung dieser Frage erforderlich sind, wird von großer wissenschaftlicher und praktischer Bedeutung sein.

Frage 2. Beruht die Überschusswärme bei den Experimenten zur elektrochemischen Beladung und bei denen zur Gasbeladung auf demselben bzw. denselben grundlegenden Mechanismen?

Es bestehen vier grundlegende Ansätze zur Schaffung jener Voraussetzungen, die zu LENR führen, indem Wasserstoff oder Deuterium mit Festkörpern zusammengeführt werden. Dabei kommen elektrochemische, gasförmige, plasmatische und andere Methoden zum Einsatz, einschließlich der Strahlung und der chemischen Herstellung von Hydriden und Deuteriden. Die elektrochemische und die Gasbeladung haben dabei die meiste Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Es wird allgemein angenommen, dass elektrochemische Verfahren vor allem für wissenschaftliche Studien geeignet sind. Aufgrund ihrer relativen Einfachheit wird allerdings in den ersten kommerziellen LENR-Generatoren die Gasbeladung zum Einsatz kommen. Wie schon bei der ersten Frage ist es auch hier möglich, dass in diesen beiden wichtigen Zweigen des Forschungsgebietes unterschiedliche Mechanismen zum Tragen kommen. Die Versuchsaufbauten, Materialien, Protokolle und Ergebnisse fallen oft sehr unterschiedlich aus. Da wäre es doch einfacher, wenn in beiden Ansätzen derselbe Mechanismus bzw. dieselben Mechanismen zum Tragen kämen. Dies entspräche dem Prinzip von Ockhams Rasiermesser.^[21]

Diese Frage ließe sich möglicherweise dadurch klären, dass bei beiden Versuchsarten die gleichen Materialien zum Einsatz kommen. Stellen Sie sich zylindrische Stäbe aus einem bestimmten Material vor, die in derselben Anlage mit einem dünnen Film aus einem Material beschichtet werden, das für die

Erzielung von LENR förderlich ist und vielleicht [Pd](#) oder [Ni](#) enthält. Die Zusammensetzung, die Dicke, die Oberflächeneigenschaften und andere Optionen, wie z. B. die Einbettung von Nanopartikeln, könnten sehr unterschiedlich sein. Nachdem sie auf diese Weise vorbereitet und gekennzeichnet wurden, könnten einige der Stäbe als [Elektroden](#) in elektrochemischen Experimenten und andere in Experimenten zur Gasbeladung eingesetzt werden. Ein Vergleich der mit den beiden Beladungsmethoden erzielten Ergebnisse könnte eine Antwort auf diese Frage liefern, obwohl dies nicht das einzig mögliche Resultat sein muss. Nach wie vor besteht die Möglichkeit, dass bei beiden Beladungsmethoden derselbe Mechanismus bzw. dieselben Mechanismen wirken, doch würden Unterschiede in den beiden Techniken zu abweichenden Ergebnissen führen.

Frage 3. Sind Protonen und Deuteronen zumindest in einigen der wärmeerzeugenden Experimente gegeneinander austauschbar?

Aus Experimenten geht hervor, dass LENR entweder durch [Protonen](#) oder durch [Deuteronen](#) im Wasser und in anderen Flüssigkeiten, Gasen sowie in anderen Materialien, in denen sie enthalten sind, ausgelöst werden kann. Die Wasserstoffisotope, die bei LENR-Experimenten in den Prozess eingebracht wurden, können auf verschiedene Weise variiert werden. Bei einigen Experimenten kommen Wasser oder Gase zum Einsatz, die nur einen relativ geringen Anteil des unerwünschten Isotops, entweder Protonen oder Deuterium, enthalten. Bei diesen Experimenten ist das leichte oder [schwere Wasser](#) bzw. das verwendete Gas sehr rein. In anderen Fällen sind weniger reine Substanzen zum Einsatz gekommen. So sind beispielsweise die meisten Experimente, die auf der Basis von leichtem Wasser erfolgen, unter Verwendung von Wasser durchgeführt worden, das die natürliche Häufigkeit von Deuteronen aufwies (1 Deuteron auf 6420 Protonen in den Weltmeeren der Erde)^[22].

In vielen Experimenten, vor allem in der Anfangszeit, wurden zwei Zellen gleichzeitig (oft in Reihe) betrieben, eine mit leichtem Wasser und eine mit schwerem Wasser. Das Experiment mit leichtem Wasser diente der Kontrolle, da es keine Energie erzeugen würde. Die H_2O -Experimente haben nachgewiesen, dass die [Kalorimetrie](#) ordnungsgemäß durchgeführt wurde, denn die gemessene thermische Ausgangsleistung entsprach der zugeführten elektrischen Leistung.^[23]

Die meisten erfolgreichen elektrochemischen Experimente, also jene, bei denen es zur Erzeugung von Wärmeenergie gekommen war, wurden unter Verwendung von schwerem Wasser durchgeführt. Hierfür ließen sich Dutzende von Beispielen aufzählen. Wir wollen hier nur eines der bekanntesten anführen, bei dem das Verhältnis zwischen der thermischen Energie, die aus der elektrochemischen Zelle austrat, und der elektrischen Energie, die ihr zugeführt wurde, 26 betrug.^[24] Bei Experimenten, die von McKubre am [SRI International](#) durchgeführt und nicht veröffentlicht wurden, fügte er Zellen mit D_2O -Elektrolyten, die bereits Strom erzeugten, H_2O hinzu.^[25] Die Zellen waren mit [Pd](#)-Kathoden von 3 mm Durchmesser ausgestattet. Über mehrere Tage hinweg ging die Überschussleistung auf Null zurück – eine Zeitspanne, die viel größer war als der Zeitraum, der für ein diffusives Gleichgewicht von H im Pd erforderlich ist. Die Ursachen für diese langwierige Veränderung sind nicht bekannt.

Daneben gab es mehrere elektrochemische Experimente auf der Basis von leichtem Wasser, für die die Entstehung von Überschusswärme berichtet wurde. So veröffentlichten Mills und Kneizys 1991 die Ergebnisse eines Experiments, bei dem ein Elektrolyt aus H_2O und K_2CO_3 verwendet wurde.^[26] Dabei berichteten sie über einen Energiegewinn von 37, damals der bedeutendste Bericht dieser Art. In Japan wurde daraufhin ein ähnliches Experiment von Notoya und Enyo durchgeführt. Es wurde eine Überschussleistung beobachtet, die das 2,7- bis 3,4-fache der Eingangsleistung betrug und bis zu 2 W betrug.^[27] Im Rahmen des ICCF-3 veröffentlichte dasselbe Labor eine zweite Studie zur Leichtwasserelektrolyse.^[28] Dabei wurden vier verschiedene Kathodenmetalle ([Ni](#), [Au](#), [Ag](#) und [Sn](#)) zusammen mit zwei Carbonat- und zwei Sulfatelektrolyten verwendet. Nur das Sn in Verbindung mit dem K_2SO_4 erzeugte während eines 65-stündigen Durchlaufs einen Leistungsüberschuss (0,91 W). Eine dritte Studie von Notoya und seinen Kollegen, bei der leichtes Wasser als Elektrolyt zum Einsatz kam, lieferte weitere Belege für die Erzeugung einer Überschussleistung:^[29] Sie erzielten Überschussleistungen von bis zu 169 % der Eingangsleistung, die 0,54 W betrug.

Bei einigen elektrochemischen Experimenten wurde das Verhältnis von Protonen zu Deuteronen im Laufe des Versuchs variiert. Bush und Eagleton haben zwischen 1990 und 1994 zahlreiche LENR-Experimente auf Leichtwasserbasis durchgeführt. In einem der ersten Berichte führte Bush die

Ergebnisse mehrerer Versuche an, bei denen unterschiedliche Karbonatelektrolyte in leichtem Wasser zusammen mit Nickelkathoden verwendet wurden.^[30] Darin wurden eine LENR-Leistung von bis zu 5,9 W und eine Gesamtenergie von bis zu 0,75 MJ angegeben. Diese Leistung wurde 24 Stunden nach der Zugabe von 2 ml schweren Wassers in die Zelle erreicht, welche zuvor ausschließlich mit leichtem Wasser im Elektrolyten betrieben wurde. Die Mehrleistung von 5,9 W entsprach einem Leistungsgewinn von 27,3 %. Bei einem anderen Experiment mit leichtem Wasser und einer Nickelkathode, bei dem Swartz schweres Wasser hinzufügte, zeigte sich eine Steigerung bei der Stromerzeugung. In diesem Fall hatte sich die Stromerzeugung durch die Zugabe von 7,4 % D₂O auf 0,5 W verdoppelt.^[31]

Dem Autor sind keine elektrochemischen Experimente bekannt, bei denen für das gesamte Experiment sowohl leichtes als auch schweres Wasser in unterschiedlichen Anteilen zum Einsatz gekommen wäre. Angesichts der Ergebnisse mit den Elektrolytmischungen aus D₂O und H₂O erscheint es sinnvoll, Versuche durchzuführen, bei denen die relativen Mengen an schwerem und leichtem Wasser als Parameter zugrunde liegen. Sie sollten mit relativ kleinen Anteilen an leichtem Wasser durchgeführt werden. In einem Brief an Miles stellte Fleischmann fest, dass eine geringe Menge von H₂O im D₂O den Überhitzungseffekt stoppen würde. Das leichte Wasser wird bevorzugt elektrolisiert, so dass 1 % davon im D₂O dazu führt, dass sich in der Pd-Kathode 10 % der Wasserstoffisotope in Protonen umwandeln.^[32] Eine der Herausforderungen für eine solche Versuchsreihe bestünde darin, ausreichend viele Kathoden bereitzustellen, die in den verschiedenen elektrochemischen Zellen eine vergleichbare Leistung erbringen.

Die Gasbeladung von Protonen auf und in Nickel stellt eine wirtschaftlich attraktive Lösung dar. Wasser und protonenhaltige Gase sind wesentlich billiger als ähnliche deuterierte Materialien, und Nickel ist wesentlich billiger als Palladium. Daher ist allgemein damit zu rechnen, dass die ersten kommerziellen LENR-Generatoren mit einer Gasbeladung von Protonen auf Nickel arbeiten werden. Außerdem ist eine Gasbeladung experimentell viel einfacher durchzuführen als eine elektrochemische Beladung. Schon in der frühen Geschichte der LENR-Forschung hat Piantelli Experimente durchgeführt, bei denen Nickel und andere Materialien mit Gas beladen wurden.^[33] Seitdem sind zahlreiche derartige Experimente durchgeführt worden.

Auch die Gasbeladung von Pd mit Deuteronen war schon frühzeitig auf großes Interesse gestoßen. Arata und Zhang gelang die Erzeugung einer Überschussleistung dadurch, dass sie Deuteronen in Nanopartikel aus Pd einbrachten, die mit Zirkoniumdioxid beschichtet waren.^[34] Sie arbeiteten dabei innerhalb der elektrochemischen Zellen mit ihren sogenannten „Doppelstruktur“-Kathoden. Die Deuteronen wurden an der Außenseite von Hohlkathoden erzeugt und diffundierten dann in deren Inneres, wodurch im zentralen Hohlraum ein hoher Druck zur Gasbeladung der Pd-Materialien entstand. Im Jahr 1998 berichteten die beiden Forscher über die Erzeugung einer LENR-Leistung von bis zu 10 W, und zwar während eines Experiments, das 8500 Stunden oder fast ein Jahr andauerte. Ihre Doppelstrukturkathode war dabei in einen Elektrolyten getaucht, der aus zwei Gewichtsteilen D₂O und einem Teil H₂O bestand.

In den letzten Jahren hat ein Forscherteam von der Universität Kōbe und von Technova sowohl die H- als auch die D-Beladung aus Gasen in eine Vielzahl von Nanomaterialien untersucht. Bei einigen Materialien wurden für beide Wasserstoffisotope hohe Beladungsgrade (H oder D pro Metallatom) und starke Wärmeentwicklungen festgestellt.^[35] Bei anderen Versuchen wurden bei hohen Temperaturen Überschussleistungen von 5 W pro Gramm Ni gemessen, die dann einige Tage lang anhielten.^[36] Ein anderes Material lieferte für drei Tage 15 W und steigerte sich dann über einen Zeitraum von drei Wochen um weitere 10 W. Die Überschussenergie entsprach etwa 100 eV pro Ni-Atom. In ihrer jüngsten Veröffentlichung hat das Team davon berichtet, dass sie bei Experimenten oberhalb von 500 °C Überschussenergien von „mehreren Hundert eV/Ni-Atom“ beobachtet hätten^[37].

Wie schon bei den elektrochemischen Beladungsexperimenten, so scheint es auch hier keine Berichte darüber zu geben, dass die Zusammensetzung der Gasatmosphäre kontinuierlich von reinem Wasserstoff zu reinem Deuterium variiert wurde. Solche parametrischen Experimente, sowohl für die elektrochemische Beladung als auch für die Gasbeladung, könnten zu einer Antwort auf diese Frage führen. Möglicherweise kann LENR mit beiden Wasserstoffisotopen funktionieren, aber weniger effektiv, wenn sie als Gemisch zur Anwendung kommen, da hierzu eine Art Schwingungs- oder anderweitige Resonanz auf einer einheitlichen Frequenz hergestellt werden müsste.

Es sei darauf hingewiesen, dass einige der zahlreichen Theorien über die Mechanismen von LENR für beide Isotope gelten^[38], während andere entweder das eine oder das andere, also H oder D, voraussetzen, aber nicht beide einschließen können. Die Antwort auf diese Frage birgt somit das Potenzial, einige der Theorien zu LENR zu verwerfen oder zumindest den Rahmen ihrer Gültigkeit einzuschränken.

Frage 4. Über welche Zeiträume wird durch LENR Energie freigesetzt, wie sieht also der zeitliche Verlauf der Energieerzeugung bei LENR aus?

Die Zeiträume, über die bei LENR-Experimenten Energie freigesetzt wird, sind sowohl aus wissenschaftlichen als auch aus praktischen Gründen von Bedeutung. Der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzung kann zum Verständnis von den Vorgängen auf elementarer Ebene beitragen, sofern die experimentelle zeitliche Auflösung dafür ausreichend ist. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, Erkenntnisse darüber zu gewinnen, ob signifikante Energiefreisetzungen, die das nahezu gleichzeitige Auftreten zahlreicher LENR-Ereignisse voraussetzen, das Ergebnis unzähliger unkorrelierter Ereignisse sind oder auf eine Art von schneller Reaktionskaskade, möglicherweise eine Kettenreaktion, zurückzuführen sind. Das Konzept der LENR-Kettenreaktion wurde 1996 in einem Aufsatz von Arata und Zhang diskutiert^[39].

Die bei LENR-Experimenten und durch entsprechende Generatoren freigesetzte Energie weist auf atomarer Ebene zwangsläufig einen pulsierenden Charakter auf. Das liegt daran, dass während jedes LENR-Ereignisses zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Ort eine bestimmte Energiemenge freigesetzt wird. Finden viele LENR-Ereignisse zeitgleich statt, kann die Energieerzeugung auf mesoskopischer und makroskopischer Ebene in Form von Ausbrüchen erfolgen. Ereignen sich hingegen zahlreiche LENR-Ereignisse nacheinander, kann die Energieerzeugung einen scheinbar kontinuierlichen und dabei nahezu gleichmäßigen zeitlichen Verlauf zeigen. Somit lassen sich vier grundlegende Arten der unkontrollierten Energiefreisetzung unterscheiden: (a) eine gleichbleibende Rate (abgesehen vom Schrotrauschen), (b) eine sich langsam verändernde (pseudostationäre) Rate, (c) Ausbrüche von unterschiedlicher Dauer und Größe und (d) eine Mischung aus einer mehr oder weniger gleichbleibenden Energieabgabe nebst dem Auftreten von einigen Ausbrüchen.

Zu den zeitlichen Verläufen der Energiefreisetzung durch LENR liegen zahlreiche experimentelle Erkenntnisse vor. Man unterscheidet dabei zwei Kategorien: die direkte Wärmemessung mit Hilfe von Kalorimetern sowie andere Arten von Messungen. Bei den Kalorimetern kann es sich um äußerst empfindliche Geräte handeln, die in der Regel jedoch über lange Zeitkonstanten verfügen^[40], so dass es in der Regel nicht möglich ist, den zeitlichen Verlauf solcher Ereignisse zu verfolgen, die im Minutenbereich oder schneller ablaufen. Die Reaktionszeiten der meisten Kalorimeter, die im Rahmen von LENR-Studien zum Einsatz kommen, liegen im Bereich von mehreren Minuten bis hin zu Stunden. Man bedenke, wie lange eine Tasse mit heißem Kaffee braucht, um sich der Umgebungstemperatur anzugleichen. Sehr schnelle, also leistungsstarke Energiefreisetzungen werden von den Kalorimetern zusammengefasst, so dass man nur die in kurzer Zeit freigesetzte Gesamtenergie erhält.

Es liegen zahlreiche Berichte vor, nach denen es bei LENR-Experimenten zu stark schwankenden Energieüberschüssen gekommen ist, deren Ausgangsleistung sich über einen Zeitraum von Stunden oder mehr verändert hat. Eine der interessantesten Beobachtungen stammt von Kozima und seinen Kollegen, die festgestellt haben, dass die Häufigkeit von Leistungsüberschüssen in umgekehrt proportionalem Verhältnis zu ihrer Größe steht.^[41] Miles stellte fest, dass die Leistungserzeugung im elektrochemischen Pd-D-System bei Temperaturen unterhalb von etwa 60 °C relativ stetig und gleichmäßig variiert.^[42] Oberhalb dieser Temperatur treten Leistungsüberschüsse häufiger auf, da es hier zu einer erheblichen positiven Rückkopplung kommt. Relativ geringe Schwankungen der Ausgangsleistung könnten für die Nutzung der LENR-Energie von größerer Bedeutung sein als für ihr wissenschaftliches Verständnis.

Die Kraterbildung auf der Oberfläche von Kathoden im Zuge von elektrochemischen LENR-Experimenten liefert Indizien einer schnellen Energiefreisetzung. Die Krater weisen Anzeichen von Schmelzvorgängen auf, was darauf hindeutet, dass bei der Bildung der Krater hohe Temperaturen geherrscht haben. Bislang sind keine Methoden bekannt, mit denen sich die Zeitspannen bestimmen lassen, über die die Energie freigesetzt wird, die zur Kraterbildung führt. Weder die Orte noch die Zeitpunkte der Kraterbildung sind im Voraus erkennbar. Erst wenn der Ort eines zu erwartenden Kraters feststünde, könnte ein bestimmter Bereich auf einer Kathode in Augenschein genommen werden, um die

Kraterbildung zu verfolgen. Somit sind dynamische Messungen der Kraterbildung nicht realisierbar. Man kann jedoch die Kratergrößen und die geschätzten Bildungsenergien mit Hilfe von thermischen Analysen oder Simulationen ermitteln, um Schätzungen zu den Energiefreisetzungszeiten vorzunehmen.

Die Krater, die bei elektrochemischen LENR-Experimenten entstehen, besitzen im Allgemeinen einen Durchmesser von 1 bis 100 Mikrometern. Zur Abschätzung der Energien, die für die Entstehung der beobachteten Krater erforderlich sind, kamen zwei Methoden zum Einsatz: einfache Berechnungen sowie die Skalierung von Kratergrößen und -energien.^[43] Beide Techniken lieferten weitgehend übereinstimmende Ergebnisse. Sie ergaben, dass die Kraterenergien zwischen etwa 1 nJ (für 1 µm Durchmesser) und etwa 1 mJ (für 100 µm Durchmesser) liegen. Geht man davon aus, dass bei jedem einzelnen LENR-Ereignis eine Energie von etwa 20 MeV Energie freigesetzt wird, dann bedeuten diese Energiewerte, dass sich in einem sehr kleinen räumlichen Bereich zwischen 1200 (Durchmesser 1 µm) und 1200 Millionen (Durchmesser 100 µm) Reaktionen ereignet haben. Die Emissionszeiten für die Freisetzung solcher Energien wurden mit Hilfe eines analytischen Modells der Kraterbildung geschätzt^[44] und lagen in der Größenordnung von Nanosekunden bis Mikrosekunden.

Andere Messverfahren, die unter Einsatz solcher Instrumente durchgeführt werden, die schneller ansprechen als Kalorimeter, erweisen sich als nützlich, um bei der Messung der durch LENR freigesetzten Energie zumindest empirische Grenzwerte festzulegen. In einer kürzlich durchgeführten Studie wurden die bislang veröffentlichten Daten von Messungen hinsichtlich Schall, Hochfrequenz-, Infrarot- und Röntgenstrahlung sowie der Erzeugung von Neutronen und energiereichen Ionen zusammengefasst^[45]. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse für die schnellsten der in jeder Kategorie gefundenen Messwerte zusammengefasst. Es wäre von großem Nutzen, für die Schall-, HF-, IR- und Röntgendaten zeitaufgelöste Spektralinformationen zu erhalten. Entsprechende Messungen sind durch die Gesamtintensität, die für jeden dieser Werte ermittelt werden kann, jedoch begrenzt.

Tabelle 1. Die kürzesten Zeitangaben aus empirischen Daten für jede der aufgeführten Messgrößen.

Messungen	Kürzeste Zeit	Forschungsbedarf
Schall	Etwa 20 ms	Zusätzliche Messungen mit schnellerem Akustiksystem
HF-Strahlung	Einige Sekunden	Zusätzliche Messungen mit schnellerem HF-System
Infrarotstrahlung	<< 1 Sekunde	Zusätzliche Messungen mit schnellerem IR-System
Röntgenstrahlung	Etwa 2 µs	Zusätzliche Messungen mit schnellerem Röntgensystem
Neutronen	< 64 µs	Weitere schnelle Messungen mit stärkeren Neutronenquellen
Energetische Ionen	Einige Minuten	Neue Konstruktionen, die es Ionen ermöglichen, schnelle Detektoren zu erreichen

In der letzten Spalte sind Maßnahmen angeführt, die zur Verbesserung derartiger Daten beitragen könnten. Von großem wissenschaftlichem Nutzen dürften Hochgeschwindigkeitsdaten zu den Emissionen aus LENR-Experimenten sein. Sie könnten dazu dienen, die Theorien über die Mechanismen, welche zu LENR führen, zu untermauern bzw. einzuschränken. Dies gilt insbesondere für die schnellsten unter den Energiefreisetzungen, da diese die Obergrenze für die Dauer von Energiefreisetzungsereignissen bilden. Schnelle Aufzeichnungen könnten einen Hinweis darauf geben, worin der Unterschied zwischen nahezu gleichzeitigen Reaktionen und kaskadierten Reaktionen (Kettenreaktionen?) besteht. Wahrscheinlich werden auch solche Energiestöße von Bedeutung sein, die über viel größere Zeiträume auftreten, einschließlich derer, die mittels Kalorimetrie auflösbar sind. Die Leistungsschwankungen, die über längere Zeiträume auftreten, haben einen großen Einfluss auf eine Vielzahl der Anwendungen von LENR-Generatoren. Schon jetzt ist klar, dass die letztendliche Verteilung der durch LENR aus nuklearen Bindungsenergien freigesetzten Energie (als Wärme, Schall, Strahlung usw.) zumindest in wissenschaftlicher und wahrscheinlich auch in praktischer Hinsicht von Bedeutung sein wird. Daher benötigen wir die entsprechenden Energieverzweungsverhältnisse.

Frage 5. Eignet sich LENR ausschließlich als ein individuelles alleinstehendes Ereignis, oder besteht die Möglichkeit, dass es zu LENR-Kaskaden kommt, bei

denen durch eine einzelne Reaktion das Auftreten weiterer LENR-Ereignisse an Wahrscheinlichkeit gewinnt?

Zur Freisetzung einer erheblichen Menge an Energie muss es zu einer Vielzahl von LENR-Reaktionen kommen. Die Energie eines MeV mag als ein hoher Wert erscheinen, entspricht aber lediglich $1,6 \times 10^{-13}$ J. Selbst wenn eine einzige LENR-Reaktion also 20 MeV freisetzt, sind für die Freisetzung einer Überschussenergie von nur 1 Joule etwa 3×10^{11} derartige Reaktionen erforderlich. Die Freisetzung dieser Energie liefert in einer Sekunde eine Leistung von 1 W. Eine so geringe Leistung kann viele Anwendungen finden, je nach Größe und Kosten der für ihre Erzeugung erforderlichen Ausrüstung. Die meisten der Anwendungen, die im Zusammenhang mit LENR in Betracht gezogen werden, erfordern jedoch Leistungen im Bereich von kW. Die Beheizung eines Wohnhauses ist eine solche Anwendung. Von daher sind LENR-Raten um die 10^{14} Hz von großem Interesse.

Es besteht die Möglichkeit, dass alle LENR-Reaktionen für sich allein ablaufen und nicht durch gleichartige Reaktionen in ihrer Umgebung beeinflusst werden. Denkbar ist aber auch, dass das Eintreten einer Reaktion die Wahrscheinlichkeit weiterer gleichartiger Reaktionen verringert oder erhöht. Diese Möglichkeiten werden in den folgenden Abschnitten untersucht.

Wenn alle LENR-Reaktionen getrennt voneinander erfolgen, wäre es aufschlussreich, ihren durchschnittlichen räumlichen Abstand zu ermitteln. Aus LENR-Experimenten sind Leistungsdichten von über 1 kW/cm^3 bekannt.^{[46][47]} Ein kW entspricht 3×10^{14} Reaktionen pro Sekunde, die ihrerseits mit 20 MeV pro Reaktion erfolgen. Geht man davon aus, dass die Reaktionen in einem kubischen Gitter mit der Größe von 1 cm^3 innerhalb einer aktiven Kernregion gleichmäßig verteilt sind, dann weisen sie untereinander einen Abstand von etwa 100 nm auf. Würden alle diese Reaktionen im zweidimensionalen Bereich, d. h. auf einer Oberfläche, ablaufen, betrüge der Abstand zwischen den Reaktionsstellen weniger als 1 nm. Im Grunde genommen würde sich an jeder Position eines Oberflächenatoms in jeder Sekunde ein LENR-Ereignis vollziehen. Sowohl im 2D- als auch im 3D-Fall würden die LENR-Produkte, d. h. die aus LENR hervorgehenden Kerne, in jeder Sekunde mit vergleichbaren Abständen erzeugt werden. Die Reaktionsprodukte könnten über Energie verfügen, die es ihnen ermöglicht, sich vom Ort ihrer Entstehung zu entfernen. Das ändert jedoch nichts an dem potenziellen Problem, dass sich die Reaktionsprodukte anhäufen können und damit möglicherweise nachteilige Auswirkungen auf das Zustandekommen weiterer LENR-Reaktionen haben. Daher kann die Wärmeerzeugung durch LENR in einer räumlich begrenzten Region die Wahrscheinlichkeit einer weiteren Energieerzeugung verringern. Dies könnte zu der Notwendigkeit führen, die aktiven Materialien eines LENR-Generators zu rekonstituieren^[48].

Bei der Energieerzeugung mittels Kernspaltung ist es erforderlich, dass sich die Kerne des Brennstoffs in unmittelbarer Nähe zueinander befinden, um so auf effiziente Weise die Neutronen einfangen zu können, die durch vorangegangene Reaktionen freigesetzt wurden – und um so weitere Spaltungen möglich zu machen. Dies führt zu der Frage, ob vergleichbare Effekte auch im Rahmen der Energieerzeugung mit LENR zum Tragen kommen könnten. Können sich also bei LENR im Zuge der Wärmeerzeugung Kaskaden- oder Kettenreaktionen ereignen?^{[39][49]} Die Antwort auf diese Frage hängt letztlich vom Verständnis der grundlegenden LENR-Mechanismen ab, wie sie bereits diskutiert wurden. Sollten einzelne LENR-Ereignisse dazu führen, dass die Effizienz der angrenzenden Region zur Auslösung nachfolgender LENR-Ereignisse eingeschränkt oder gänzlich aufgehoben wird, wären praktische Maßnahmen erforderlich, die eine Erneuerung oder den Ersatz aktiver Materialien sicherstellen. In gewissem Sinne könnte man dies mit einem großen Feuer vergleichen, das den in einer Region verfügbaren Sauerstoff verbraucht hat und deshalb nicht mehr weiterbrennen kann, obwohl noch Brennstoff zur Verfügung steht.

Es liegen indirekte experimentelle Beweise dafür vor, dass zahlreiche LENR-Ereignisse innerhalb kleinräumiger Regionen nahezu zeitgleich auftreten. Wie bereits erwähnt, wurden im Ergebnis etlicher elektrochemischer LENR-Experimente auf der Oberfläche von Kathodenmaterialien Krater festgestellt. Die Schätzungen der Energiefreisetzung, wie sie zur Erzeugung der gemessenen Kraterdurchmesser erforderlich sind, reichen von 1 nJ bis 1 mJ.^[43] Ferner bewegen sich die analytischen Berechnungen zu den Kraterbildungszeiten im Bereich von Nanosekunden bis Mikrosekunden.^[44] Diese Werte deuten darauf hin, dass sich im Bereich von MeV zahlreiche Reaktionen sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Nähe zueinander vollziehen. Dies allein sagt jedoch noch nichts darüber aus, ob die Reaktionen voneinander unabhängig ablaufen oder ob sie sich in einer kausalen Folge ereignen.

Für die Beantwortung der Frage, ob es sich bei LENR um voneinander unabhängige Ereignisse handelt oder um solche, die miteinander verknüpft sind, als auch der damit verbundenen Frage, ob sie die Wahrscheinlichkeit von Folgeereignissen erhöhen oder verringern, scheint es keine eindeutige experimentelle Vorgehensweise zu geben. Möglicherweise könnte die Verwendung von Schichtmaterialien mit einer Dicke im Nanometerbereich Aufschluss geben. Diese Fragen werden jedoch wahrscheinlich erst dann geklärt werden können, wenn die grundlegenden Mechanismen von LENR verstanden sind. Die Antwort auf die Frage nach möglichen Kaskaden bei LENR und deren möglichen negativen Auswirkungen auf die weitere Erzeugung von Energie und von [Transmutations](#)produkten spielt für die Kommerzialisierung von LENR eine sehr zentrale Rolle.

Frage 6. Ist die Überschusswärme vollständig oder nur teilweise auf Kernreaktionen zurückzuführen, und wenn nur teilweise, welcher andere Mechanismus trägt zur Wärmeabgabe bei?

Fleischmann und Pons war klar, dass die Überschusswärme, die sie in den 1980er Jahren gemessen hatten, nicht auf chemische Reaktionen zurückzuführen sein konnte. Wie andere auch, waren sie der Meinung, dass die einzige alternative Erklärung darin bestehen könne, dass es sich um [Kernreaktionen](#) handelt. Es bestand allerdings auch die Möglichkeit, und diese besteht nach wie vor, dass zwischen Kernen und Atomen eine gewisse Entität bezüglich Größe und Energie existiert, die sich unter Freisetzung von Energie herausbilden kann – d. h., ohne dass Kernreaktionen erforderlich sind.

Zu Anfang der 1990er Jahre postulierte Randell Mills die Existenz einer stark gebundenen Form von Wasserstoff, die er als Hydrino bezeichnete.^[50] Die kleinstmögliche Bindungsenergie und damit die Energie, die bei der Bildung dieser Entität freigesetzt werden könnte, wurde mit 41 eV angegeben. Noch stärker gebundene Niveaus sollten über höhere Energien verfügen. Wenn solche gebundenen Energieniveaus existierten, müssten sie in Spektren und möglicherweise in Experimenten zur [Elektronenstreuung](#) nachgewiesen werden können. Der spektrale Nachweis für diese hypothetischen Niveaus fällt allerdings nicht überzeugend aus^[51], und Streuexperimente scheinen nicht durchgeführt worden zu sein. Daher bleibt die Existenz der von Mills angedachten stark gebundenen Energieniveaus im Wasserstoff eine offene Frage.

Seither haben andere Theoretiker sogenannte „kompakte Objekte“ vorgeschlagen, bei deren Bildung Energien im keV-Bereich und nicht im MeV-Bereich freigesetzt werden würden. Derartige Gebilde würden eines der Wasserstoffisotope als Kern aufweisen und darüber hinaus auch Elektronen im Orbit. Sie wären viel kleiner als Atome. Die Idee dahinter besteht darin, dass zumindest ein Teil der Wärme, die durch LENR freigesetzt wird, nicht auf Kernreaktionen zurückzuführen ist, sondern aus der Bildung dieser kompakten Objekte stammt. Aufgrund ihrer geringen Größe und der Elektronenabschirmung können sich die Protonen oder Deuteronen im Zentrum dieser Objekte in den Materialien näher an andere Kerne heranbewegen, was die Wahrscheinlichkeit für nachfolgende echte Kernreaktionen erhöht. Dieser Effekt ähnelt der myonenkatalysierten Fusion^[52], doch im Detail unterscheidet sich der Mechanismus. In diesem LENR-Szenario laufen die Kernreaktionen, die zu Transmutationsprodukten und energetischen Teilchenemissionen führen, ausnahmslos erst im Anschluss an den Hauptmechanismus der Wärmeerzeugung ab. Man geht davon aus, dass die nuklearen Nebenreaktionen von exothermer Natur sind, so dass sie einen noch nicht genauer bestimmten Anteil an der gemessenen Überschusswärme ausmachen. In diesem Fall könnten zwischen der Wärmeerzeugung und den konventionellen Kernreaktionsprodukten Korrelationen bestehen, was jedoch nicht notwendigerweise der Fall sein muss.

Zu den kompakten Objekten existieren verschiedene Theorien. Jede dieser Theorien wird im Folgenden kurz erläutert. Zur Orientierung sei angemerkt, dass der Radius eines Wasserstoffatoms, bei dem das normale [Elektron](#) durch ein Myon ersetzt wurde, 285 fm beträgt^[53]. Dieser kleine Radius führt zu höheren Fusionsraten, da die Distanz, über die getunnelt werden muss, um eine Kernreaktion auszulösen, sehr viel kürzer ist als bei normalen Atomen. Daher sind die Wahrscheinlichkeiten für eine Tunnelung und die damit einhergehenden Kernreaktionsraten stark erhöht (katalysiert). Aus zweierlei Gründen ist es praktisch nicht möglich, mit Hilfe der myonenkatalysierten Fusion Strom zu erzeugen. Die Energie, die zur Erzeugung von Myonen benötigt wird, übersteigt die Energie, die während ihrer kurzen Lebensdauer von lediglich 2,2 Mikrosekunden durch die Fusion erzeugt werden kann.^[54] Außerdem besitzt jedes Myon nur eine Chance von 1 %, an einem Alphateilchen zu verbleiben, das bei einer Fusionsreaktion entstanden ist, sodass es keine weiteren Reaktionen katalysieren kann.

Angeregt durch die Kalte Fusion, haben Maly und Vavra in den 1990er Jahren zwei Arbeiten über kompakte Objekte veröffentlicht^[55], in denen sie sich anhand verschiedener Atome mit den „Deep Dirac Levels“ befassen. Diese Niveaus stellen Lösungen der Dirac-Gleichung dar, dem relativistischen Analogon zur Schrödingergleichung in der [Quantenmechanik](#). In den Arbeiten werden deren Energien und Ladungsverteilungen angegeben. Die Bindungsenergien liegen in einem Bereich zwischen 300 und 500 keV, und die Orbitalradien bewegen sich in der Größenordnung von Femtometern. Um die Existenz dieser Niveaus nachzuweisen, haben die Autoren entsprechende Experimente in Betracht gezogen. So verweisen sie als (indirekten) Beweis für die von ihnen berechneten Niveaus auf kalorimetrische Nachweise aus LENR-Experimenten.

Mitte der 1990er Jahre schlug Dufour die Existenz von gebundenen Zuständen vor, die aus dem Gleichgewicht zwischen der anziehenden elektrostatischen Kraft und der abstoßenden elektroschwachen Kraft resultieren.^[56] Er nannte die Entitäten Hydrex und Deutex, je nachdem, ob ein Proton oder ein Deuteron beteiligt war. Die Radien der verschiedenen Energieniveaus der Hydrex lagen in einem Bereich von 1,78 bis 3,47 fm. Die Bindungsenergien variierten stark von etwa 393 keV für das niedrigste ($n = 1$) Quantenniveau bis hin zu 36 keV für $n = 20$ und darüber hinaus zu kleinen Energien für höhere Quantenzahlen. Dufour stellte sich die Hydrex als einen Verbundstoff mit oszillierendem Verhalten vor, der zwischen einem Proton mit einem sehr nahen Elektron und einem Neutron-Neutrino-Paar angesiedelt ist.

Eine andere Theorie zu kompakten Objekten wurde von Heffner 2007 im Internet diskutiert und im darauffolgenden Jahr veröffentlicht.^[57] Er beschrieb schwach gebundene Paare von Elektronen, die sich im gleichen Zustand mit entgegengesetzten Spins befinden. In seinem Konzept erhöht die Existenz dieser Elektronenpaare die Wahrscheinlichkeit der Entstehung eines „deflationären gepaarten Zustands“. In diesem Zustand haben die beiden Elektronen ausreichend kleine Wellenlängen, um „im Kern“ existieren zu können.

Im Jahr 2011 veröffentlichten Mayer und Reitz einen Artikel mit dem Titel „Electromagnetic Composites on the Compton Scale“^[38] (Elektromagnetische Verbundwerkstoffe auf der Compton-Skala), in dem sie ein dreiteiliges Gebilde, ein sogenanntes Tresino, postulierten. Solche Teilchen würden aus einem zentralen Proton oder Deuteron und zwei Orbitalelektronen mit gleichgerichteten Spins bestehen. Berechnungen auf der Grundlage einer einfachen Schrödingergleichung ergaben für die Bindungsenergie eines Tresinos 3,7 keV und für den Orbitalradius der beiden Elektronen 386 fm. Unter der Annahme, dass es zur Bildung von Tresinos kommen kann, behaupteten Mayer und Reitz, sie könnten zwei bedeutende aktuelle wissenschaftliche Rätsel lösen, nämlich das der Erderwärmung im Bereich der Geologie^[58] und das der Dunkle Materie in der Astronomie.^[59] Um bestimmte Aspekte von LENR zu erklären, wandten die beiden Forscher das Konzept der [Verbundteilchen](#) an. Die in kalorimetrischen Experimenten beobachtete Wärme wird auf die Bildung von Tresinos zurückgeführt. Dabei ist zu beachten, dass der Tresino-Mechanismus für die Energieerzeugung keine Kernreaktionen erfordert.

Auch Meulenberg und Sinha haben sich mit dem Mechanismus von LENR befasst und dabei auch kompakte Objekte in Betracht gezogen. Ihr Ansatz beinhaltet ebenfalls einen kurzlebigen Verbund aus zwei Elektronen und entweder einem Proton oder einem Deuteron nebst einem blanken Proton oder Deuteron^[60]. Bei ihrem Mechanismus handelt es sich jedoch um die Bildung eines solchen Objektes, gefolgt von einer D-D-Fusion. Das heißt, der Ansatz beinhaltet zwingend Kernreaktionen. Sie gehen davon aus, dass die ungleichmäßigen Gitter im stark aufgeladenen Pd lokale und hochfrequente Phononenmodi aufweisen. Diese Schwingungen erzeugen dynamische elektrostatische Felder, die mit den Elektronen im Material eine starke Wechselwirkung eingehen. Die daraus resultierende „Potenzialumkehr“ führt zur Bildung von „Lochons“, also von lokal geladenen Bosonen-Elektronen-Paaren, die den Deuteronen eine kompakte Abschirmung bieten und sie mit einer negativen Nettoladung versehen. Auf diese Weise wird die Coulombbarriere aufgehoben, was zur D-D-Fusion führt. In einem kürzlich erschienenen Aufsatz^[61] fasste Meulenberg die diesbezüglichen Arbeiten von Naudts zusammen.^[62] Er kam auf eine Energie in Höhe der Ruhemasse des Elektrons mal der [Feinstrukturkonstante](#), nämlich $511 \text{ keV}/137 = 3,7 \text{ keV}$, sowie auf einen Radius von etwa 390 fm.^[63] Diese Werte sind im Wesentlichen identisch mit denen der Tresino-Bildung.

Als Reaktion auf die Berichte über die hohen LENR-Leistungen des Ni-H-Systems hat Dufour vor Kurzem die Hypothese aufgestellt, nach der ein neues Verbundsystem existiert, das er als Hypol bezeichnet.^[64] Er stellt sich dabei einen Ni-Kern vor, der etwa 1,9 [Pikometer](#) von einem Proton entfernt ist, und ein Elektron, das diesen Verbund umkreist. Sowohl das Proton als auch das Elektron bewegen

sich innerhalb der Elektronenschalen des Ni-Atoms. Dufour gibt die Bildungsenergie des Hypols mit 10,5 keV an. In Anlehnung an den Pikometerabstand zwischen dem Ni-Atomkern und dem Proton spricht Dufour von einer „Piko-Chemie“ für LENR-Reaktionen, welche sich der Bildung von Hypolen anschließen.

Bei den zuvor untersuchten Theorien zu kompakten Objekten handelt es sich im Wesentlichen um Konzepte, zu denen einige Berechnungen vorliegen. Es stellt sich natürlich die Frage, weshalb solche kompakten Objekte bisher noch nie beobachtet worden sind. Die Antwort könnte darin liegen, dass zu ihrer Bildung in wahrnehmbarer Zahl sehr spezielle Bedingungen erforderlich sind. Beispielsweise denken Mayer und Reitz dabei an die Spinausrichtung der beiden Elektronen in einem Tresino. Dazu müssen zwei Elektronen, die aufeinander ausgerichtet sind, sich gleichzeitig nahe beieinander befinden und entweder über ein Proton oder über ein Deuteron verfügen. Aufgrund von chemischen und thermischen Effekten dürfte dieser Fall jedoch nur sehr selten eintreten.

Sollte dieser Fall jedoch wirklich eintreten, könnte ein zweistufiger Prozess sowohl die relativ geringe Produktion von Tritium und Neutronen als auch das Zustandekommen von Transmutationen erklären. Sind die sekundären Kernreaktionen nämlich aus irgendeinem Grund selten (geringe Tunnelwahrscheinlichkeit oder Mangel an Reaktionspartnern in der Nähe), könnten sich nur sehr wenige Kernprodukte bilden. Ein zweistufiges Szenario könnte auch im Zusammenhang mit den Schwierigkeiten bei der Erzeugung von Wärme und ihrem unberechenbaren Verhalten stehen, sofern für die Bildung der kompakten Objekte sehr spezifische Bedingungen erforderlich sind.

Es ist recht einfach, die Auswirkungen der Bildung kompakter Objekte zu berechnen, ebenso wie die nachfolgender Kernreaktionen, die zwar denkbar sind, aber nicht mit Sicherheit eintreten werden.^[65] Ist die Bildung kompakter Objekte tatsächlich der erste Schritt bei der Erzeugung von Überschusswärme, so hängt die Gesamtmenge der Überschussenergie E_T von der Anzahl N_C der Reaktionen ab, bei denen es zur Bildung von kompakten Objekten kommt, von der Energie E_C , die bei der Bildung eines kompakten Objekts freigesetzt wird, vom Anteil f_N der Ereignisse bei der Bildung kompakter Objekte, die zu nachfolgenden Kernreaktionen führen, und von der Energie E_N , die pro Kernreaktion freigesetzt wird: $E_T = N_C \{E_C + \Sigma f_N E_N\}$. Die Summenbildung erfolgt über die Anzahl der nachfolgenden exothermen Kernreaktionen. Die Werte von f_N können zwischen Null (keine sekundären Kernreaktionen) und Eins liegen (wenn auf jedes Ereignis der Bildung eines kompakten Objekts eine besonders energiereiche Kernreaktion folgt). Der Anteil der auf Kernreaktionen zurückzuführenden Überschusswärme, d. h. $(\Sigma f_N E_N / E_T)$, kann zwischen Null und nahezu Eins liegen. Die erzeugte Energie kann also vollständig auf nichtnukleare Ereignisse zurückzuführen sein oder aber von Kernreaktionen dominiert werden.

Storms hat die Existenz einer „nuklear aktiven Umgebung“ von noch unbekannter Zusammensetzung und Struktur postuliert, in der sich LENR ereignet.^[66] Sollten die anfänglichen Reaktionen nicht auf nuklearer Basis ablaufen, sondern stattdessen auf der exothermen Bildung eines kompakten Objekts beruhen, wäre eine nuklear aktive Umgebung hierfür nicht erforderlich. In diesem Fall dürfte jedoch immer noch eine bestimmte Kombination von Material (Zusammensetzung und Struktur) und Umgebungsbedingungen (Schall, magnetische oder andere Felder) erforderlich sein, die die Bildung von kompakten Objekten begünstigen.

Die Frage nach der Herkunft der Überschusswärme lässt sich wahrscheinlich nicht durch ein Experiment klären, das ein eindeutiges Ja oder Nein liefert. Es ist denkbar, dass unter bestimmten Bedingungen tatsächlich die gesamte Überschussenergie auf Kernreaktionen zurückzuführen ist, während unter anderen Bedingungen nur ein kleiner Teil nuklearen Ursprungs ist. Genauso gut sind aber auch Zwischenformen denkbar. Es wird noch eine Menge zusätzlicher quantitativer experimenteller und theoretischer Arbeit erforderlich sein, um herauszufinden, was unter den verschiedenen Bedingungen tatsächlich vor sich geht.

Frage 7. Sind die anderen LENR-Ergebnisse wie etwa die Transmutationsprodukte, die schnellen Teilchen, die Photonen und die Krater auf die wärmeproduzierenden Reaktionen zurückzuführen?

Diese Frage steht in engem Zusammenhang mit der Frage zur Herkunft jener Reaktionsprodukte, die aus solchen LENR-Experimenten stammen, wie sie gerade diskutiert wurden. Sie umfasst zwei Aspekte, die einander ähneln: zum einen die Transmutationsprodukte und zum anderen die schnellen Teilchen. Beide werden im Folgenden nacheinander behandelt. In beiden Fällen geht es um die zeitliche Korrelation zwischen verschiedenen Effekten, wie sie im Zuge von LENR-Experimenten auftreten, bzw. um die Nachkorrelation quantitativer Aspekte der Messergebnisse.

Möglicherweise stammen alle verkündeten Transmutationsprodukte aus solchen Kernreaktionen, die sich durch eine Wärmeerzeugung auszeichnen. Folglich wäre zwischen den Wärmemengen, gemessen in Joule, und den Mengen an Transmutationsprodukten, d. h. ihrer Anzahl von Atomen, eine quantitative Korrelation zu erwarten. In den meisten Fällen erfolgten die chemischen Analysen der Transmutationsprodukte vor oder nach den LENR-Experimenten. Das bedeutet, dass keine zeitlichen Informationen darüber vorliegen, wann die Produkte erzeugt wurden. Allerdings besteht die Möglichkeit, auch noch nach einem Experiment entsprechende quantitative Korrelationen festzustellen.

Im Rahmen von Elektrolyseexperimenten ist es möglich, einen Teil des Elektrolyten während des laufenden Experiments zu entnehmen und einer Analyse zu unterziehen. Dies wurde jedoch nur selten praktiziert. Da die Konzentration der neuen Elemente im Vergleich zu den bereits vorhandenen Mengen womöglich recht gering ist, bietet eine solche Vorgehensweise keine Gewähr für eine aufschlussreiche Analyse. Die Transmutationsprodukte könnten sich zudem auf oder in der Kathode befinden und für eine Analyse nicht zugänglich sein.^[67] Bei Gasbeladungsexperimenten könnten Echtzeitanalysen vorgenommen werden, indem an die Experimente ein differenziell gepumptes Massenspektrometer angeschlossen wird. Doch auch hier besteht die Gefahr, dass sich die Transmutationsprodukte gar nicht in der beprobten Atmosphäre befinden. Experimente dieser Art sind dem Autor nicht bekannt.

Man war schon frühzeitig davon ausgegangen, dass die gemessene Überschusswärme allein auf die Fusion zweier Deuteronen zurückzuführen sei und es hierbei zur Entstehung von 4He -Kernen kommen würde. Miles und seine Mitarbeiter waren die ersten, die sowohl die Wärme als auch das Helium gemessen haben. Dabei beobachteten sie eine Übereinstimmung mit der Energiemenge (etwa 24 MeV), die bekanntermaßen bei einer von zehn Millionen konventionellen (heißen) Fusionsreaktionen freigesetzt wird.^[68] Später führten McKubre und Kollegen umfangreiche Untersuchungen zur Erzeugung von Wärme und Helium in einem Gasbeladungsexperiment durch.^[69] Sie berichteten von einer Korrelation zwischen beiden Produkten bei einer Reaktionsenergie von 31 oder 32 \pm 13 MeV. Auch andere Forscher haben im Rahmen der gleichen Experimente Wärme- und Heliummessungen vorgenommen, worüber in zwei Artikeln berichtet wurde^[70].

Der Nachweis von Tritium und 3He wurde in zahlreichen LENR-Experimenten erbracht. Jedoch wurde bislang nichts über Korrelationen mit der Überschusswärme berichtet. Die leichten Elemente sind nicht die einzigen Transmutationsergebnisse, die im Zusammenhang mit LENR bekannt geworden sind. Es gibt eine Vielzahl von Berichten über die Erzeugung schwererer Elemente.^[71] Bis jetzt ist jedoch lediglich eine Korrelation zwischen erzeugter Wärme und der Anzahl neuer LENR-Atome bekannt geworden.^[72] In ihrer Arbeit berichteten Dufour und Kollegen über die Erzeugung von Mg-, Cu- und Zn-Atomen mittels einer Pd-Elektrode und von Lu-, Hf-, Yb- und Pb-Atomen mittels einer U-Elektrode. Für die verschiedenen Reaktionsprodukte wurden MeV-Werte pro erzeugtem Atom im Bereich zwischen 150 und 400 MeV ermittelt. Diese Reaktionsenergien decken sich mit den Energien, wie sie bei der neutroneninduzierten Spaltung von schweren Isotopen freigesetzt werden.^[73]

Wenn die schnellen Teilchen und die Photonen das Resultat von Kernreaktionen sind, durch die die gesamte Überschusswärme erzeugt wird, dann (a) sollten die Teilchen als diagnostischer Indikator für die wärmeerzeugenden Reaktionen dienen können und (b) sollte eine Korrelation zwischen der Anzahl der Teilchen und der Wärme bestehen. Sollten die Kernreaktionen, die zur Erzeugung der schnellen Teilchen führen, sich hingegen erst im Anschluss an die einleitenden und dominierenden wärmeproduzierenden Reaktionen vollziehen, könnte sich der Zusammenhang völlig anders darstellen. Wie bereits in der Antwort auf Frage 6 dargelegt, könnten es die Kernreaktionen sein, die einen kleinen bis hin zu einem großen Teil der gesamten Überschusswärme erzeugen.

In Einzelfällen wurde versucht, zeitliche und quantitative Korrelationen zwischen der Überschusswärme einerseits sowie schnellen Teilchen und Photonen andererseits zu ermitteln. Solche Experimente stellen eine besondere Herausforderung dar. Zunächst muss die Erzeugung von Überschussenergie zustande kommen, was nicht immer erreicht werden kann. Selbst wenn es zu einer Erzeugung von Überschussenergie kommt, zeigt sich diese in der Regel als unstetige Funktion der Zeit. Eine hochwertige

Ausrüstung zur Messung energiereicher Teilchen ist relativ teuer und zudem nicht überall erhältlich. Bekanntlich ist die Anzahl der bei LENR-Experimenten emittierten schnellen Neutronen oder geladenen Teilchen im Allgemeinen recht gering. Um angemessene statistische Daten zu erhalten, kann es sich daher als notwendig erweisen, die Zählung über relativ lange Zeiträume hinweg (Minuten bis Stunden) durchzuführen. Die zeitlichen Schwankungen bei der Energieerzeugung können sich über unterschiedliche Zeiträume erstrecken, was die Ausbildung von Korrelationen erschwert.

Die Abbildung 1 soll das Potenzial verdeutlichen, das sich aus den Korrelationen zwischen den verschiedenen Beobachtungsgrößen von LENR-Experimenten ergibt. Sie führt ein Dutzend Beobachtungsgrößen auf, die mindestens zweimal im Rahmen von LENR-Experimenten beschrieben worden sind. Nur der Schall wurde lediglich in einem einzigen Bericht über ein LENR-Experiment erwähnt.^[17] Zwischen diesen zwölf Größen sind insgesamt 66 paarweise Vergleiche möglich. In der Hoffnung, ein Verständnis für die grundlegenden Mechanismen zu erlangen, die zu LENR führen, bieten sich noch viele Möglichkeiten, nach Korrelationen zwischen Beobachtungsgrößen von Experimenten zu suchen.

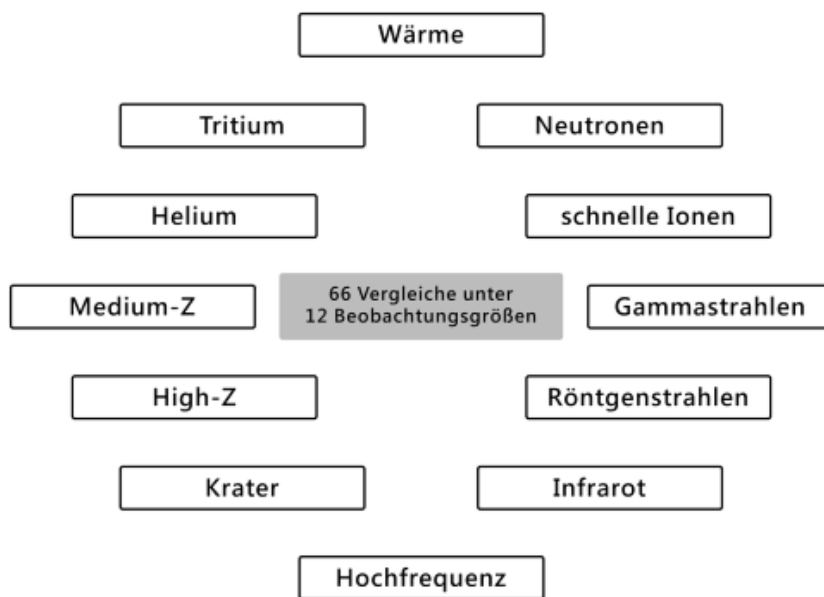


Abbildung 1. Mengen, die während und nach LENR-Experimenten gemessen wurden. Die Reaktionsprodukte reichen von Tritium und Helium bis hin zu schweren Elementen. Zu den gemessenen Teilchen gehören Neutronen und schnelle Ionen. Die beobachteten Photonen decken vier Bereiche des elektromagnetischen Spektrums ab, von den Gammastrahlen bis zu den Hochfrequenzemissionen. Krater sind ein Zeichen für eine örtlich begrenzte und schnelle Wärmeentwicklung.

Ein weiterer Fall, in dem sich die Frage nur mit Hilfe von Experimenten klären lässt. Für derartige Experimente wäre eine Quelle für Überschussenergie von großem Nutzen, die über längere Zeiträume hinweg relativ konstant läuft. Optimal wäre die Nutzung von Strahlungsdetektoren mit großen Akzeptanzraumwinkeln sowie einer hohen Stoppleistung für Strahlung, die auch Informationen zu den Energien (Spektren) der Teilchen liefern^[74].

3. Fragen zu den Materialien

Die Hauptschwierigkeit, bei LENR-Experimenten eine reproduzierbare und beherrschbare Wärmeerzeugung zu erreichen und weitere Produkte zu erlangen, beruht auf einigen Aspekten der bei den Experimenten verwendeten Materialien. In ihrer chemischen Zusammensetzung als auch in ihrer atomaren Struktur können sich diese Materialien stark voneinander unterscheiden. Die Quantifizierung von Anzahl und Position der Schlüsselatome in den Versuchsmaterialien ist anspruchsvoll und kostenintensiv. Dies gilt insbesondere für Verunreinigungen in geringen Konzentrationen. Diese Verunreinigungen könnten allerdings für die Entstehung von LENR eine entscheidende Rolle spielen. Von Bedeutung könnte ebenfalls sein, dass ein bestimmtes Stück Material, wie etwa die Kathode in einem

elektrochemischen LENR-Experiment, in seiner Zusammensetzung als auch in seiner atomaren Struktur keineswegs homogen ist. So können die Materialdetails im Nanometermaßstab räumlich variieren, was für die Erzeugung von LENR bedeutsam sein könnte. Außerdem ändern sich die Schlüsseleigenschaften von Materialien im Allgemeinen während eines Versuches oder im Laufe der Nutzung eines LENR-Stromgenerators.

Die Überprüfung und Kennzeichnung von Materialien bis hin zu ihrer Erprobung im LENR-Experiment erfordert eine langjährige Forschung durch ein qualifiziertes Team. Die italienische Forschergruppe unter der Leitung von Violante hat ein solches Programm in Zusammenarbeit mit Forschern in den USA verfolgt.^[75] Dabei haben sie festgestellt, dass in elektrochemischen Experimenten bestimmte Eigenschaften der Pd-Kathoden zu einer verstärkten Erzeugung von LENR-Energie führen. An solchen systematischen und gründlichen Forschungen besteht ein großer Bedarf. Die Liste der potenziell relevanten Materialparameter ist lang. Beispielsweise können die Zusatzstoffe in den bei LENR-Experimenten verwendeten Materialien sich in ihrer Beschaffenheit und ihrer Dosierung stark unterscheiden. Im Rahmen von LENR-Experimenten bieten sich zudem zahlreiche Möglichkeiten für die Anwendung von akustischen, magnetischen, elektromagnetischen und weiteren Feldern, die in unterschiedlichen Größenordnungen und Kombinationen eingesetzt werden können.

Frage 8. Was sind die entscheidenden Faktoren für die Herstellung und die Erhaltung von Materialien, die einen Wärmeüberschuss erzeugen, sowohl hinsichtlich ihrer Zusammensetzung (insbesondere Verunreinigungen) als auch ihrer Struktur (Leerstellen, Versetzungen, Risse und dergleichen)?

Für jedes LENR-Experiment werden fünf Dinge benötigt: (1) Einrichtungen zur Aufnahme und zur Versorgung des Experiments sowie zur Vermessung der Vorgänge, (2) Materialien, die im Experiment eingesetzt werden, (3) Protokolle, in denen festgelegt ist, was, wann und wie getan wird, (4) das Labor, in dem das Experiment aufgebaut und durchgeführt wird und (5) der Experimentator selbst. Jeder der genannten Punkte bietet zahlreiche Optionen. Jede von ihnen kann ziemlich genau definiert und bestimmt werden, außer einer. Und diese Ausnahme bilden die Materialien. Die Eigenschaften der Materialien, die für das Zustandekommen von LENR benötigt werden, müssen in engem Zusammenhang mit den Mechanismen stehen, durch die solche Reaktionen ausgelöst werden.

Wie bereits erwähnt, nimmt die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung und der atomaren Struktur von Materialien viel Zeit und Geld in Anspruch. Sie erfordert hochentwickelte und präzise kalibrierte Analysegeräte in den Händen von Fachkräften, die im Umgang mit diesen Geräten über die erforderliche Kompetenz verfügen. Selbst wenn eine derartige Materialcharakterisierung für die Kathode oder für andere Materialien vor einem elektrochemischen Experiment vorgenommen wird, verändern sich die Materialien auch im Laufe des Experiments. Für die Erzeugung von LENR können diese Veränderungen von entscheidender Bedeutung sein. So ist beispielsweise ein hohes Verhältnis von Deuteronen zu Metallatomen, also eine hohe Beladung, in elektrochemischen Experimenten erforderlich, um auf zuverlässige Weise Überschusswärme zu erzielen.^[76] In einigen Fällen ist es möglich, während des Experiments bestimmte Materialveränderungen zu ermitteln. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Nutzung des Widerstandsverhältnisses für die Bestimmung der Beladung.^[77] Es ist allerdings unmöglich, während eines LENR-Experiments die Veränderungen bei all jenen chemischen und strukturellen Eigenschaften zu verfolgen, die möglicherweise von Bedeutung sind.

Viele Experten gehen davon aus, dass bei LENR-Experimenten schon geringfügige, aber dennoch bedeutsame Materialschwankungen dazu führen, dass die Erzeugung von Überschussenergie zu einer Herausforderung wird, und dass diese auch für die Schwankungen in der Reproduzierbarkeit und in der Ausgangsleistung verantwortlich sind. Schon vor mehr als 15 Jahren hat man erkannt, dass in LENR-Experimenten bereits geringfügige Verunreinigungen dazu führen können, dass die erzeugte Leistung bescheiden ausfällt, sofern es sich bei den Verunreinigungen um Reaktanten handelt.^[78] Nur selten ist der Gehalt an Verunreinigungen in den Materialien vor den Experimenten genau bekannt. Selbst wenn die Verunreinigungen nicht als Brennstoff dienen, könnte ihr Vorhandensein dennoch notwendig sein, um kernaktive Bereiche zu bilden, in denen LENR stattfinden kann. Falls sehr spezielle Kombinationen aus Zusammensetzung und Struktur erforderlich sind, um LENR hervorzurufen, und falls nur geringe Abweichungen von diesen Bedingungen zulässig sind, gestaltet sich die Suche nach den geeigneten Bedingungen im Multiparameterraum in der Regel schwierig. Derartige Herausforderungen sind bei

elektrochemischen Experimenten durchaus üblich. Auch bei den Experimenten zur Gasbeladung scheint dies der Fall zu sein, einschließlich der Experimente, die sich derzeit auf dem Weg zur Kommerzialisierung befinden.

Zur Vorbereitung der Substanz als auch der Außenfläche von Materialien, die für LENR-Experimente bestimmt waren, sind zahlreiche physikalische und chemische Verfahren zum Einsatz gekommen. Die meisten dieser Verfahren kamen zum Einsatz, bevor das Pd, das Ni oder andere Materialien in eine Experimentierkammer eingebracht wurden. Ein Beispiel: Arata und Zhang überzogen einen Nickelstab im Plasmaspritzverfahren mit einer Schicht aus Pd.^[79] Die so entstandene komplexe Oberfläche war übersät mit „Mikrodefekten“, die zu einem hochgradig reproduzierbaren LENR-Verhalten geführt haben. Es gibt gute Argumente, die dafür sprechen, die aktiven Materialien an Ort und Stelle zu präparieren, also in der Kammer, in der LENR hervorgerufen werden soll. Auf diese Weise wird eine Verunreinigung der Oberfläche durch die äußere Atmosphäre vermieden. In einer neueren Untersuchung verwendeten Mizuno und Kollegen in ihren Reaktionskammern zur Vorbereitung von Ni- und Pd-Oberflächen einen zyklischen Prozess:^[80] Zuerst wurden die Metalle im Vakuum erhitzt, dann einem Glimmentladungsplasma ausgesetzt, anschließend im Reaktantengas und schließlich wieder im Vakuum erhitzt. Dieser Zyklus wurde vor den Experimenten vier- oder fünfmal wiederholt. Bei etwa drei Vierteln der Experimente wurde eine Überschussleistung erzielt.

Es sind umfangreiche materialwissenschaftliche und technische Forschungsarbeiten erforderlich, um die Verfahren zu bestimmen und zu optimieren, mit denen Materialien für LENR-Experimente vorbereitet werden können. Mit der Entwicklung einer quantitativen und vorhersagenden Theorie zur Erzeugung kernaktiver Bereiche könnte diese Frage geklärt werden. Gleichwohl besteht die Möglichkeit, dass ausschließlich solche parametrischen Experimente zur Lösung des Materialrätsels ausreichen, die äußerst sorgfältig durchgeführt werden und bei denen die Schlüsselfaktoren gezielt variiert und im Detail charakterisiert werden.

Frage 9. Eignet sich LENR nur auf oder in der Nähe von Oberflächen oder auch im Inneren von Materialien oder überhaupt an beliebigen Stellen auf oder in einem Material?

Dies ist eine weitere Frage, die sich ganz unmittelbar damit beschäftigt, welche Mechanismen zur Entstehung von LENR führen. Sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus ganz praktischer Sicht ist es von großer Bedeutung, ob sich LENR auf der Materialoberfläche oder in ihrer unmittelbaren Nähe, im Inneren des Materials oder an beiden Orten ereignet. Oberflächen, einschließlich Risse, die sich bis zur Oberfläche erstrecken, sind für die umgebende flüssige oder gasförmige Atmosphäre leicht zugänglich. Daher weisen sie entweder keine oder nur kleine Diffusionslängen (und -zeiten) auf. Das Einbringen von Wasserstoffisotopen in hohen Konzentrationen in das Innere von Materialien ist zeitaufwändiger, vor allem dann, wenn die Abmessungen in der Größenordnung von Millimetern oder darüber liegen. Ebenso benötigen dickere Materialien mehr Zeit, um Reaktionsprodukte wie etwa He auszustoßen, was die weitere Energieerzeugung behindern kann.^[48] Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen hängt von der Größe und der Form der Materialteilchen ab.^[81] Daher sollte der Zugang der Wasserstoffisotope zu den Orten, an denen sich LENR vollzieht, die Geometrien jener Materialien beeinflussen, die in Experimenten und Generatoren benötigt werden. Die Beibehaltung der gewünschten Formen und Größen könnte die Lebensdauer von Brennstoffen in LENR-Generatoren in Abhängigkeit von der Diffusion und der Sinterung begrenzen.

Würde man die Formen der Atome und Moleküle, aus denen sich die Oberfläche zusammensetzt, außer Acht lassen, könnten manche sauberen Oberflächen durchaus als flach und glatt angesehen werden. In der Regel sind die Oberflächen jedoch durch eine Vielzahl von Geometrien von unterschiedlicher Größenordnung strukturiert. Oberflächen sind in der Regel mit verschiedenen Schichten überzogen, die im Allgemeinen sowohl von ihrer Zusammensetzung als auch von ihrer Struktur her eine hohe Komplexität aufweisen. Dies gilt insbesondere für die Umgebungen in elektrochemischen Zellen. Die Schichten auf Oberflächen können die gewünschten chemischen oder nuklearen Reaktionen begünstigen oder behindern. Das Innere eines Materials kann sogar noch komplizierter aufgebaut sein als seine Oberfläche, weil hier verschiedene Arten von Defekten und deren unterschiedliche Dimensionen möglich sind^[82].

Selbst die Definition einer Oberfläche oder eines oberflächennahen Bereichs kann sich als komplex erweisen, insbesondere bei konturierten Oberflächen. Elektronische Strukturberechnungen für Atomschichten, die parallel zur reinen Oberfläche eines Kristalls verlaufen, liefern nützliche Hinweise darauf, was eine Oberfläche ausmacht. Sie zeigen, dass sich die Bandstruktur und die Zustandsdichte für eine einzelne Oberflächenschicht aus Atomen deutlich von derjenigen einer Volumenschicht unterscheidet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Atome in der Oberflächenschicht auf einer Seite keine Bindungen aufweisen. Schon die zweite Schicht weist jedoch eine elektronische Struktur auf, die derjenigen von Volumenschichten sehr ähnlich ist. Die Oberfläche und die oberflächennahen Bereiche können also sinnvollerweise nur als das definiert werden, was die obersten ein oder zwei Atomschichten einer sauberen Oberfläche ausmacht. Das heißt, die Dicke der Oberfläche und des oberflächennahen Bereichs liegt in der Größenordnung von 1 Nanometer oder sogar noch darunter. Diffusions- und andere eher energiereiche Prozesse können sich jedoch bis in Tiefen von 1 Mikrometer oder mehr in das Innere eines Materials erstrecken.

Aus elektrochemischen Experimenten sowie aus LENR-Experimenten mit Gasbeladung und Permeation liegen Beweise dafür vor, dass die Reaktionen in unmittelbarer Nähe der Oberfläche der an den Experimenten beteiligten festen Materialien ablaufen, welche in der Regel eine geordnete Struktur aufweisen. Einige Forscher haben herausgefunden, dass sich die Überschussleistung proportional zur elektrischen Stromdichte verhält, die die Kathodenoberfläche passiert.^[83] Andere Forscher haben gezeigt, dass die Bestrahlung der Kathode einer elektrochemischen Zelle mit einem Laser zu einer gesteigerten Energieerzeugung führt.^[84] Die Skin-Tiefe für die Laser-Festkörper-Wechselwirkung liegt in der Größenordnung von 50 Nanometern.^[85] Arata und Zhang verwendeten in ihren Hohlkathoden (mit Doppelstruktur) Palladium black, das im Inneren der Kathoden einen hohen Druck des Deuteriumgases aufwies.^[34] In solch fein verteiltem Palladium finden sich die meisten Atome in der Nähe der Oberflächen der Nanopartikel. Die Experimente von Iwamura und seinen Kollegen zur Transmutation durch Gaspermeation haben gezeigt, dass die Reaktionsprodukte in einem Abstand von etwa 10 nm von der Oberfläche auftreten.^[86] In seinem ersten Buch hat Storms Beweise dafür angeführt, dass LENR an Oberflächen stattfindet.^[87] Dies schließt das Auftreten von Tritium im Gas oberhalb einer aktiven Zelle (und nicht in der Kathode) sowie die oberflächensensitive Leerlaufspannung in den energieerzeugenden Zellen ein. Die Erzeugung von LENR-Strom über Kathoden mit sehr dünnen Schichten aus aktiven Materialien weist darauf hin, dass LENR auf oder in der Nähe von Oberflächen zustande kommen kann^[88].

Celani und seine Kollegen vom italienischen INFN-LNF sowie von anderen Laboratorien haben viele Jahre damit verbracht, die Auswirkungen von Oberflächenbedingungen auf die elektrolytische Erzeugung von LENR-Strom zu untersuchen. Im Jahr 2003 schrieben sie: „Wir sind überzeugt, dass die meisten der beobachteten Effekte an der Grenzfläche zwischen der Lösung und der Pd-Masse eintreten.“^[89] Violante und seine Mitarbeiter an den italienischen ENEA-Laboratorien haben eine systematische Studie zu den Eigenschaften von Pd-Materialien in Bezug auf ihre Fähigkeit, Überschussenergie zu erzeugen, durchgeführt^[90] und dabei festgestellt, dass die Wahrscheinlichkeit für die Energieerzeugung umso größer ist, je mehr die Oberflächenkristallite eine (100)-Orientierung aufweisen und je größer die räumliche Häufigkeit einer Oberflächenrauigkeit im Bereich von 10^6 bis 10^7 m⁻¹ ist. Das heißt, Oberflächen mit Strukturen im Submikrometer-(Nanometer-)Bereich begünstigten die Erzeugung von LENR-Energie. Erwähnenswert ist, dass Materialien, die an Ort und Stelle durch eine gemeinsame Abscheidung von Pd und D präpariert wurden, einen Leistungsüberschuss aufweisen, der in keinem Verhältnis zu ihrer sehr großen Oberfläche steht^[91].

Neben den soeben besprochenen Beweisen für LENR auf Oberflächen gibt es auch Hinweise auf eine Skalierung der LENR-Leistung über das Volumen. Die erste lange Abhandlung von Fleischmann und Pons hatte aufgezeigt, dass die Überschussleistung mit dem Volumen der Kathode variiert.^[92] Frühe Arbeiten von Miles stimmten mit dieser Veröffentlichung überein.^[93] Es bleibt auch die Frage, ob LENR an Oberflächen auftritt, die im Volumen der Kathode und anderer Materialien eingebettet sind. Sollte dies der Fall sein, dann bestünde die Möglichkeit einer wahrnehmbaren Skalierung über das Volumen – selbst dann, wenn sich LENR ausschließlich an inneren Oberflächen ereignet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es umfangreiche empirische Belege unterschiedlicher Qualität gibt, die darauf hindeuten, dass LENR auf oder nahe der Oberfläche von Festkörpern stattfindet. Allerdings ist noch nicht geklärt, wo sich LENR ereignet. Dazu bedarf es zusätzlicher Daten, und das sowohl aus der Reproduktion bereits durchgeführter Experimente als auch aus neuartigen Messungen, wie beispielsweise der Raman-Streuung. Es ist gut möglich, dass parametrische Experimente, bei denen

die Oberfläche und das Volumen separat variiert werden, die wichtige Frage nach dem Ort der LENR-Entstehung klären können. Ein etwas einfacheres Experiment für den Nachweis, dass LENR an Oberflächen stattfindet, wäre die Einbringung der Lösung eines bestimmten Materials in eine Zelle, in der es zur Erzeugung von Überschussenergie kommt, die sich dann auf der Kathodenoberfläche abgelagert. Würden sich sämtliche LENR-Ereignisse auf der Oberfläche abspielen, könnte die neue Lösung den aktiven Kernbereich wirksam und schnell vergiften und die Produktion von Überschussenergie umgehend verringern. Findet LENR jedoch im Inneren der Kathode statt, würde sich die Überschussenergie nur langsam oder überhaupt nicht verringern.

Der genaue Ort, an dem sich LENR ereignet, hat nicht nur wissenschaftliche, sondern auch ganz praktische Bedeutung. Findet LENR auf Oberflächen statt, dann lassen sich die Reaktanten wesentlich leichter zusammenbringen und die Reaktionsprodukte wesentlich leichter entfernen als bei Reaktionen, die im Inneren von Materialien ablaufen. Auch die Wiederherstellung kernaktiver Reaktionen an der Materialoberfläche ist dann einfacher zu realisieren.

Frage 10. Sind für das Zustandekommen von LENR nanoskalige Strukturen oder Teilchengrößen erforderlich?

Diese Frage stützt sich auf umfangreiche experimentelle Daten und einige theoretische Überlegungen. Weiter oben haben wir einige Hinweise darauf angeführt, dass sich LENR vorwiegend auf oder in der Nähe von Materialoberflächen abspielt. Sollte dies die vorherrschende Situation darstellen, dann könnten nanometergroße Strukturen für die Entstehung von LENR von grundlegender Bedeutung sein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Materialoberflächen und deren angrenzende Bereiche in der Regel eine Dicke von 1 Nanometer oder noch weniger aufweisen. Wenn die Größe der Materialteilchen sich nun bis in den Nanometerbereich verringert, nimmt das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen zu^[81] und der Anteil der innenliegenden Atome (Bulk-Atome) in der Nähe einer Oberfläche wächst ebenfalls. Dies verringert die Dauer, die Protonen oder Deuteronen benötigen, um per Diffusion alle anderen Atome im Material zu erreichen.

Die in einer Theorie aufgestellte Behauptung, wonach LENR sich auf der Oberfläche in mikrometergroßen Arealen ereignet^[94], würde, wenn sie denn zuträfe, bedeuten, dass sich LENR in Strukturen abspielt, die zumindest in einer Dimension im Nanometerbereich liegen. Diese Dimension ist durch die Dicke der Oberfläche begrenzt. Eine neuere Theorie besagt, dass LENR durch eine ganz andere eindimensionale Struktur zustande kommt, nämlich durch Linien aus Protonen oder Deuteronen in den Materialrissen.^[95] Diese Theorien müssen noch bestätigt werden. Möglicherweise sind für die Entstehung von LENR zwei- oder dreidimensionale Strukturen im Nanometerbereich erforderlich.

Die Präparation von mit Deuteronen beladenem Pd mittels Kodepositionstechniken führt zu Materialien, die sich durch Merkmale im Millimeter-, Mikrometer- und Nanometerbereich auszeichnen. Unklar ist bislang, ob die Effektivität dieser Materialien bei der Erzeugung von Überschussenergie auf ihr drastisch erhöhtes Oberflächen-Volumen-Verhältnis oder auf das Vorhandensein von Partikeln im Nanometerbereich zurückzuführen ist. Die Planung von Experimenten zur Unterscheidung beider Variablen stellt eine Herausforderung dar.

Es existiert ein beachtlicher Bestand an Forschungsarbeiten zu LENR, die sich mit nanometergroßen Teilchen befassen. Begonnen hat dies mit der Arbeit von Arata und Zhang^[34], die, wie bereits erwähnt, bei elektrochemischen Experimenten Pd-Nanopartikel in einer Doppelstrukturkathode eingesetzt haben. Bei der Elektrolyse wurden Protonen und Deuteronen erzeugt, die durch die Wände der Kathode wanderten und den Bereich mit den Pd-Nanopartikeln (Pd black) unter Druck gesetzt haben (bis zu 10 Atmosphären). Die Effektivität dieser Experimente bei der Erzeugung von Überschusswärme und 3He -Reaktionsprodukten hat dazu geführt, dass man den Nanopartikeln bei LENR-Experimenten mit Gasbeladung große Aufmerksamkeit geschenkt hat.

Die Verwendung von Nanopartikeln bei erhöhten Temperaturen ist problematisch, da die Diffusion und das Sintern der Partikel zu ihrem Wachstum und damit zum Verlust ihrer nanometrischen Eigenschaften führen. Um der Agglomeration entgegenzuwirken, haben Arata und Zhang Nanopartikel aus Pd eingesetzt, die mit ZrO_2 beschichtet sind.^[96] Über einen Zeitraum von Hunderten von Stunden wurden Überschussleistungen von bis zu 10 W gemessen. Auch in einer anderen japanischen Forschungsgruppe wurden bei Gasbeladungsexperimenten oxidbeschichtete Nanopartikel genutzt.^{[35][36]} Für verschiedene

Materialien wurden dabei erhebliche Überschussleistungen gemessen. In anderen Experimenten wurden Pd-Partikel mit einer Größe von nur 1 Nanometer in Zeolithe eingebettet und dann im zyklischen Wechsel unter einer H₂-Atmosphäre, einer D₂-Atmosphäre und einem Vakuum gehalten.^[97] Bei der Verwendung von D₂ wurde offenbar Überschusswärme erzeugt, obgleich auch die Möglichkeit bestand, dass diese einen chemischen Ursprung hat. Ein allgemeines Problem bei Experimenten, die neben den aktiven Metallen (z. B. Pd oder Ni) auch eine große Anzahl anderer Atome und Moleküle aufweisen, ist die Bilanzierung der energetischen Vorgänge. Durch chemische Wechselwirkungen, an denen zahlreiche nichtaktive Materialien beteiligt sind, können Energien freigesetzt werden, welche an jene Energien heranreichen oder diese sogar übersteigen, die durch eine vergleichsweise geringe Anzahl von LENR-Atomen auf oder in den aktiven Metallen freigesetzt werden.

Es wurden bereits einige Arbeiten veröffentlicht, die sich mit der Herstellung und dem Einsatz von solchen Oberflächen befassen, die vor den Experimenten mit nanometrischen Strukturen versehen wurden oder diese in sie eingebettet wurden. Solche Oberflächen lassen sich durch eine Vielzahl von physikalischen und chemischen Techniken erzeugen. So führt beispielsweise der Ionenbeschuss zu einer Aufräuhung glatter Materialoberflächen. Die Art und die Größenordnung der Rauheit hängen vom Zielmaterial und seiner Kristallorientierung sowie von den verwendeten Ionen, ihrem Einfallswinkel, ihren Energien, der Dosierung und der Atmosphäre ab, in der der Beschuss erfolgt. Möglich ist auch, raue Oberflächen durch physikalische oder chemische Verfahren der Materialabscheidung zu erzeugen. Ebenso können physikalische oder chemische Ätzverfahren (Materialabtrag) zur Erzeugung rauer Oberflächen eingesetzt werden. Wie schon beim Ionenbeschuss gibt es mehrere wichtige Parameter, deren Werte über die endgültigen Strukturen und Größenordnungen der Oberflächenrauigkeit entscheiden.

In jüngster Zeit wurden mehrere Studien durchgeführt, bei denen physikalische oder chemische Verfahren eingesetzt wurden, um auf den Oberflächen von Materialien, wie sie in LENR-Experimenten zur Gasbeladung verwendet werden, Strukturen im Mikrometerbereich und darunter zu erzeugen.^[98] Begonnen wurde damit, sehr kurz gepulste Laser dafür einzusetzen, auf den Oberflächen von Materialien, die als Kathoden in LENR-Experimenten zum Einsatz kommen, Strukturen sowohl im Mikro- als auch im Nanometerbereich zu erzeugen.^[99] Wichtige Arbeiten zur Präparierung der Kathodenoberflächen mittels Schablonieren und anderen Verfahren wurden bereits durchgeführt, aber nicht dokumentiert.^[100] Mizuno und Kollegen berichteten kürzlich über den Einsatz von Glimmentladungsplasmen zur Erzeugung feiner Strukturen auf den Oberflächen von Metallen.^[80]

Allerdings ist zu beachten, dass Partikel mit Außenabmessungen im Nanometerbereich oft stark beschädigt sind. Das heißt, sie enthalten möglicherweise viele Leerstellen, Versetzungen und flächige Defekte. Darüber hinaus weisen die kleinsten Nanometerteilchen Abmaße auf, die denen gewöhnlicher Materialdefekte entsprechen. Sollten also Defekte bei der Verursachung von LENR eine Rolle spielen, könnte die nachgewiesene Wirksamkeit von Nanopartikeln eher auf ihre äußerst schadhafte Struktur zurückzuführen sein als auf ihre äußeren Abmessungen. Miley hat erklärt, dass die Größe der Defekte wichtiger sei als die Größe der Teilchen. Eine Zusammenfassung vieler seiner Ansichten ist in dieser Zeitschrift erschienen.^[101]

Zur Beantwortung der Frage, inwiefern zur Auslösung von LENR nanoskalige Strukturen notwendig sind und welche Auswirkungen diese haben, bieten sich drei mögliche, wenn auch problematische Ansätze an. Alle Verfahren setzen die Fähigkeit voraus, bestimmte Arten von Materialien zu fertigen und zu charakterisieren, ganz egal, ob es sich um Pd, Ni oder um irgendeine Zusammensetzung handelt. Der Ausgangspunkt bestünde in der Fähigkeit, Oberflächen herzustellen, die über eine ähnliche Dichte von Partikeln mit gleicher Größe und geometrischer Form verfügen. Variiert man zunächst die Abstände zwischen diesen Strukturen, könnten Experimente zeigen, welche Abstandsgröße für das Zustandekommen von LENR am besten geeignet ist. Der zweite Ansatz ist ähnlich, sieht aber Partikel mit gleichem Abstand und gleicher Form, aber von unterschiedlicher Größe vor. Und schließlich könnte man die Abstände und Größen der Teilchen konstant halten und ihre Formen variieren. Eine Serie von Experimenten, die bis auf die Teilchendichte, -größe und -form weitestgehend identisch angelegt sind, könnte Hinweise auf die Rolle von Nanostrukturen bei LENR liefern.

Frage 11. Welche Rolle spielen in LENR-Experimenten die Grenzflächen zwischen Oxid und Metall sowie andere Grenzflächen?

Es hat sich bereits gezeigt, dass das Vorhandensein von Oxiden oder anderen Verbindungen auf der Oberfläche oder im Inneren von Materialien bei LENR-Experimenten erhebliche Auswirkungen hat. Diese sind in der Lage, die Diffusion von Wasserstoffisotopen durch die Materialien hindurch zu behindern. Der Grund für die langsamere Diffusion von Wasserstoff oder Deuterium durch Verbindungen und insbesondere durch ionische Verbindungen hindurch im Vergleich zur Diffusion in Metallen liegt auf der Hand. Protonen oder Deuteronen sind im Vergleich zur Größe der Atome und zu den Abständen zwischen den Atomen sehr klein. Im Gegensatz zu allen anderen Elementen müssen die Wasserstoffisotope in den meisten Festkörpern keine gebundenen Elektronen mit sich führen. Das heißt, sie liegen eher in der Größenordnung von Kernen (von Femtometern) als in der Größenordnung von Atomen (fast von Nanometern). Daher sind die Diffusionskoeffizienten von Wasserstoffisotopen in Materialien relativ hoch.^[102] Im Inneren eines Metalls werden die positiven Ladungen von Protonen und Deuteronen durch die verfügbaren Elektronen abgeschirmt (Ladungsneutralisierung), von denen einige sehr mobil sind. In den meisten Verbindungen sind die Bindungselektronen jedoch nicht frei beweglich. In Festkörpern mit Ionenbindung, wie z. B. in Oxiden, sind sie an den Anionen gebunden, in Materialien mit kovalenter Bindung, vor allem in organischen Materialien, zwischen den Atomen. Lokalisierte (gebundene) Elektronen können sich weder mit den Protonen noch mit den Deuteronen frei bewegen, da diese durch ihre Nichtverfügbarkeit verlangsamt werden.

Oxide, die mitunter in den Metallen eingebettet sind und die zuweilen Nanopartikel umhüllen, haben bei vielen erfolgreichen LENR-Experimenten eine wichtige Rolle gespielt. Bemerkenswert sind zwei Fälle, in denen bei LENR-Experimenten hauptsächlich die Oxidschichten eine Rolle gespielt haben. Iwamura und Kollegen führten Experimente zur Permeation von Deuterium durch, bei denen in die Pd-Folien fünf Oxidschichten mit einer Dicke von jeweils 100 nm eingebettet waren.^[103] Bestanden diese Schichten aus CaO, konnten sie die Transmutation zahlreicher Elemente nachweisen, während bei der Verwendung von MgO keine Transmutationen festgestellt wurden. Die Oxidschichten befanden sich in der Nähe der Eingangsseite der Pd-Folien, d. h. der Seite, über die die eindringenden Deuteronen eingeströmt sind. Sie haben wahrscheinlich die Bewegung der Deuteronen durch die Folien hindurch beeinflusst (behindert).

Aus verschiedenen Gründen verwendeten Arata und Zhang in einigen Experimenten mit Oxid beschichtete Pd-Nanopartikel:^[34] Wie bereits erwähnt, kommt es bei Gasbeladungsexperimenten mit unbeschichteten Nanopartikeln schnell dazu, dass diese zusammensintern und dadurch ihre nanometrische Größe verlieren. Um eine solche Versinterung zu vermeiden, sind Pd-Partikel verwendet worden, die in ZrO_2 eingebettet waren. Das Oxid ist eine Verbindung mit einer hohen Bildungswärme und einer relativ geringen atomaren Mobilität im Vergleich zu reinem Pd. Die Pd-Partikel hatten einen Durchmesser von etwa 50 Nanometern. Mit diesen Materialien wurde über einen Zeitraum von 1600 Stunden eine Überschussleistung von 2 bis 10 W erzielt.

In einer kürzlich erschienenen Arbeit von Biberian und anderen wurden LENR-Experimente untersucht, bei denen Oxide eine Rolle gespielt haben.^[104] Die Autoren stellen darin fest, dass es bei der Durchführung von elektrochemischen LENR-Experimenten in Zellen mit einer Teflon- oder einer Polymerbeschichtung nicht zur Erzeugung von Überschusswärme gekommen ist. Die Verwendung von Glaszellen führt hingegen zu einer Oxidbildung an den Kathoden und in vielen Fällen zu einem Wärmeüberschuss. Durch die langsame Auflösung des Glases gelangen Ionen in die Elektrolyte, die sich dann auf der Kathode ablagern. Diese könnten die Absorption von Deuteronen in einigen Regionen der Kathode blockieren und die aktive Elektrochemie auf kleinere Bereiche mit notwendigerweise höheren Stromdichten beschränken. Denkbar ist auch, dass sie eine Rolle bei der Versorgung mit Reaktanten spielen.

Experimentell wurde festgestellt, dass die Zugabe von 0,25 bis 0,75 % Bor zum Pd eine zuverlässige Erzeugung von Überschusswärme zur Folge hatte^[105], was darauf zurückgeführt wurde, dass die Rissbildung im Pd verringert wurde und in der Folge weniger Deuterium entweichen konnte. Möglicherweise kommt es bei der Herstellung solcher Legierungen zu einer verstärkten Reaktion mit Sauerstoff und damit zu dessen Entfernung. Im Gegensatz dazu wiesen Biberian und Kollegen darauf hin, dass es auch möglich sei, dass das dem Pd zugesetzte Bor die Oxidbildung an der Oberfläche fördert und somit zu einer schnelleren Bildung von Überschusswärme führt. Die genannten Autoren haben darauf hingewiesen, dass die Oxidschichten an der Schnittstelle zwischen Oxid und Metall starke elektrische Felder verursachen. Es kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, ob dies zu LENR führt und wo genau sich die LENR-Reaktionen ereignen.

Eine Klärung der Frage, welche Rolle die Oxidschichten sowie weitere Grenzflächen im Rahmen der LENR-Experimente spielen, ist sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus praktischer Sicht äußerst wünschenswert. Möglicherweise kann die Verwendung von speziell für elektrochemische Experimente entwickelten Kathoden und von maßgeschneiderten Permeationsfolien für Gasbeladungsexperimente dazu beitragen, diese Fragen zu beantworten. Kathoden mit Teilbeschichtungen sowie Permeationsfolien, die Bereiche aufweisen, die entweder mit Schichten oder Grenzflächen bedeckt oder nicht bedeckt sind, könnten nützlich sein. Der Anteil der bedeckten Fläche könnte in solchen Experimenten als variabler Parameter dienen.

Frage 12. Welche Rolle spielt bei LENR-Experimenten die Umgebung aus aktiven Materialien?

Einer der bekanntesten Aspekte im Zusammenhang mit der Erforschung von LENR besteht in der Notwendigkeit, die Protonen oder Deuteronen mit Festkörpern zusammenzubringen, welche fast ausschließlich in Form eines kristallinen Gitters vorliegen. In einigen wenigen Fällen erfolgt die Zusammenführung der Wasserstoffisotope und des Gitters auf chemischem Wege, noch bevor die Materialien dem LENR-Experiment zugeführt werden. Diese Vorgehensweise wird als „Preloading“ bezeichnet. Bei den meisten LENR-Experimenten befinden sich die Protonen oder Deuteronen jedoch zunächst in einer Phase außerhalb des Gitters und werden dann auf die Oberfläche oder in das Innere des Schlüsselmaterials gebracht. In den konventionellen elektrochemischen Experimenten liegen die leichten Isotope als Flüssigkeit vor, in den Experimenten zur Gasbeladung als Gas, in den Experimenten zur Glimmentladung und zum Lichtbogen als Plasma, und bei der Beladung durch Implantation im Vakuum als Ionenstrahl. Hier geht es darum, dass die Umgebungsphasen, die im LENR-Experiment mit den Schlüsselmaterialien in Berührung kommen, die Rolle des Lieferanten von Protonen oder Deuteronen spielen. Daher sollte die Bewegung der Protonen oder Deuteronen aus diesen Phasen heraus in Richtung der Materialoberflächen von Interesse sein, und darüber hinaus auch die Frage, was passiert, wenn die Protonen oder Deuteronen an den Oberflächen ankommen.

Eine wichtige Tatsache besteht darin, dass in einem LENR-Experiment die Umgebung der Festkörper neben dem Wasserstoff auch Moleküle, Atome und Ionen anderer Elemente enthält. Die Auswirkungen dieser anderen Elemente können im Prinzip sehr unterschiedlich sein. Im Extremfall können sie zu einer Vergiftung der gewünschten Oberflächenreaktionen führen. Daneben sind aber auch andere, weniger drastische Auswirkungen möglich. Bei elektrochemischen Experimenten beispielsweise kann die Zugabe von Hg zum Elektrolyten die Elektrodenoberfläche undurchlässig für den Durchgang von Protonen oder Deuteronen machen. Dies wurde genutzt, um in Kathodenmaterialien Wasserstoffisotope einzuschließen.^[106] Im umgekehrten Extremfall können die Moleküle, Atome oder Ionen aus der Umgebung des Festkörpers im Experiment kernaktive Bereiche erzeugen, in denen sich LENR ereignet. Möglicherweise liefert dieses Quantum auch die Reaktanten für LENR.

Kurz nach der Bekanntgabe durch Fleischmann und Pons experimentierten zwei Forschergruppen damit, die Zusammensetzung des Elektrolyten während der LENR-Experimente zu verändern. Shirai und Kollegen betrieben drei Tage lang eine Zelle mit einer D_2O -Lösung, die 0,1 M DCl und 0,01 M $PdCl_2$ enthielt.^[107] Neben dem Elektrolysestrom floss in der Zelle auch ein Strom innerhalb der Pd-Kathode. Der Temperatursensor der Zelle zeigte etwa 20 °C an. Dann ersetzten sie den Elektrolyten durch eine H_2O -Lösung mit 0,1 M $LiOH$. Daraufhin stieg die Temperatur in der Zelle um über 50 Grad an. In den folgenden Tagen variierten sie die Ströme in der Kathode als auch den Elektrolysestrom. Je nach Kombination beider Ströme schwankten die Temperaturen zwischen 20 und 70 °C. Das bedeutet, dass die thermische Leistung von LENR bis zu einem gewissen Grad steuerbar war.

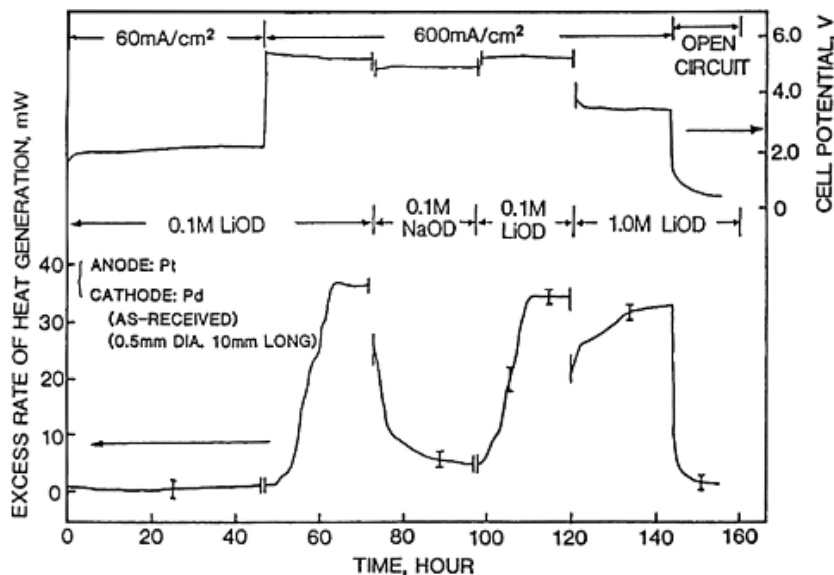


Abbildung 2. Zeitlicher Verlauf der angewandten Stromdichte, der Erzeugung von Überschussenergie und des Zellpotenzials mit einer Pd-Drahtkathode und bei unterschiedlichen Elektrolytchemien und -konzentrationen.

Zur zweiten Gruppe gehörten Appleby und weitere Mitarbeiter. Sie haben Experimente zur elektrochemischen Beladung durchgeführt, die zu bescheidenen Leistungsüberschüssen geführt haben.^[108] In Abbildung 2 sind die Ergebnisse eines Experimentes dargestellt, das sich über etwa 150 Stunden erstreckte. Man sieht, dass das Signal-Rausch-Verhältnis bei den höchsten Ausgangsleistungen über 10 betrug. Dieses Experiment wies vier interessante Merkmale auf. Als erstes wäre da die Leistungsbilanz zu Versuchsbeginn zu nennen, als die Stromdichte noch niedrig war. Die Erhöhung des Stroms um den Faktor 10 führte zur Erzeugung von Überschussleistung, wenn es sich beim Elektrolyten um 0,1 M LiOD handelte. Das zweite bemerkenswerte Merkmal besteht darin, dass die LENR-Leistung gegen Null sank, nachdem der Elektrolyt auf 0,1 M NaOD umgestellt worden war. Die Rückkehr zu 0,1 M LiOD führte dazu, dass die Überschussleistung fast wieder das ursprüngliche Niveau erreichte. Das dritte interessante Merkmal besteht in dem Verhalten, wenn die Konzentration des LiOD um den Faktor zehn erhöht wird. Dabei sank die Überschussleistung auf etwa die Hälfte des Wertes, der mit dem verdünnten LiOD-Elektrolyten erreicht wurde, und begann sich dann zu erholen. Die Zeitkonstante für die Schwankungen in der Überschussleistung betrug bei diesen Experimenten mehrere Stunden. Nicht bekannt ist, ob die Rolle der Li-Atome in Applebys Experimenten „lediglich“ darin bestand, die Voraussetzungen für LENR zu schaffen, ohne dass das Li selbst an den Reaktionen beteiligt war, oder ob die Li-Atome im Zuge von LENR tatsächlich als Reaktanten fungierten, die zur Energiegewinnung beigetragen haben. In jedem Fall belegen die Experimente, dass Lithium und Natrium sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die Erzeugung von LENR-Energie haben. Es besteht ein offenkundiger Bedarf an weiteren Experimenten, bei denen die Zusammensetzung und die Konzentration des Elektrolyten (oder der Gasatmosphäre) während eines Durchgangs variiert wird.

4. Schlussfolgerungen

Das Aufwerfen von zahlreichen wissenschaftlichen und anderen Fragen zu LENR sollte nicht den Eindruck erwecken, dass über dieses Thema nur wenig bekannt ist. Auch wenn es hier noch viel in Erfahrung zu bringen gilt, wurden im letzten Vierteljahrhundert auf empirischer Ebene große Fortschritte erreicht. Allein über diese Fortschritte ließe sich eine lange Abhandlung schreiben. An dieser Stelle sollen nur die wichtigsten empirischen Fakten in aller Kürze zusammengefasst werden. An erster Stelle steht die Beobachtung, dass es möglich ist, Kernreaktionen unter Einsatz von chemischer Energie auszulösen. Auch wenn die genauen Bedingungen dafür noch nicht vollständig verstanden sind, steht fest, dass zur Auslösung von LENR sowohl ein Feststoff als auch Protonen oder Deuteronen erforderlich sind. Von großer Bedeutung ist die Tatsache, dass die Beweise für das Auftreten von Kernreaktionen belastbar sind. Die in LENR-Experimenten erzielten Ausgangsenergien überstiegen in einigen Fällen das bei chemischen Reaktionen mögliche Maß um das 1000-fache. Die Entstehung von Kernreaktionsprodukten ist unbestreitbar. Besonders stark sind die Beweise für die Erzeugung von Tritium, einem radioaktiven Isotop mit einer kurzen Halbwertszeit, das sich relativ leicht messen lässt.

Neutronen und schnelle Teilchen können nicht durch chemische Reaktionen entstehen. Sie allein zeigen, dass es in LENR-Experimenten zu Kernreaktionen kommt. Andere empirische Beweise, wie etwa die Entstehung von Kratern auf den Oberflächen von Materialien in LENR-Experimenten, lassen sich nur dadurch erklären, dass Kernenergien freigesetzt werden.

Zu LENR gibt es noch viele weitere wissenschaftliche und praktische Fragen. Ein kürzlich erschienener Aufsatz von McKubre, der sich mit Fragen und Kritik an die LENR-Forschung befasst, ist verfügbar.^[109] Er betrachtet drei Fragen: (a) Was glauben wir zu wissen? (b) Warum glauben wir, es zu wissen? (c) Warum gibt es in der breiteren wissenschaftlichen Gemeinde immer noch Zweifel? Eine der wichtigsten nichttechnischen Fragen lautet sicherlich, was es braucht, damit das Thema unabhängig von seiner praktischen Anwendbarkeit als legitimes Wissenschaftsgebiet akzeptiert wird. Es gilt vor allem zwei Schwierigkeiten zu überwinden. Die eine besteht darin, dass die meisten Wissenschaftler die überzeugenden experimentellen Daten für das Auftreten von LENR nicht zur Kenntnis nehmen. Selbst Forscher, die an Möglichkeiten für eine verbesserte Erzeugung, Handhabung und Nutzung von Energie arbeiten, schenken dem Status und den attraktiven Perspektiven von LENR keine Beachtung. Ein weiteres Problem besteht in dem aktiven Widerstand, den einige ehemalige Wissenschaftler gegen die Anerkennung von LENR als Wissenschaftszweig aufbringen. Inwieweit es sich bei diesem Widerstand um Egoismus, Unwissenheit oder die Finanzierung durch bestimmte Interessengruppen im Energiebereich handelt, bleibt unklar und wird dies auch bleiben.

Es bieten sich drei Möglichkeiten, die zu einer Akzeptanz von LENR durch die Wissenschaft und die breitere Öffentlichkeit führen könnten. Die eine besteht darin, eine klare theoretische Erklärung zu entwickeln, diese zu erproben und einer breiten Anerkennung zuzuführen. Damit ist jedoch nicht so bald zu rechnen, denn es gibt zahlreiche Theorien, deren Entwicklungsstand in quantitativer Hinsicht in der Regel unzureichend ist, und denen es an Experimenten mangelt, mit denen ihre Vorhersagen überprüft werden können. Eine andere Möglichkeit für einen Durchbruch besteht in der Veröffentlichung äußerst aussagekräftiger experimenteller Ergebnisse, beispielsweise der steuerbaren Erzeugung von Energie im Kilowattbereich. Ein solcher Bericht mit den aussagekräftigen Testergebnissen von E-Cat-Systemen erschien im Mai 2013^[110], fand aber nicht einmal Eingang in die Mainstream-Presse. Auch ein neuer Bericht über E-Cat-Tests scheint keine große Wirkung zu haben, zumindest nicht im Augenblick.^[111] Eine dritte Möglichkeit wäre das Auftauchen von LENR-Stromgeneratoren in Geschäften, wo sie von der Bevölkerung erworben werden können. Dazu sind mehrere Schritte erforderlich, darunter die Entwicklung zuverlässiger und steuerbarer Prototypen, Betatests, die Entwicklung und Herstellung von Produkten sowie deren Sicherheits- und Zulassungsgenehmigungen. Dieser Ansatz zur Legitimierung der Forschung und Entwicklung im Bereich von LENR wird also nicht so bald zum Tragen kommen.

Der zweite Beitrag dieser Trilogie wird in Ausgabe 119 dieses Magazins erscheinen. Er wird sich mit Fragen zu wissenschaftlichen Versuchs- und Berechnungsverfahren für LENR befassen. Der letzte Beitrag ist für die Ausgabe 120 geplant. Er wird sich mit der Technik, der Kommerzialisierung und den Anwendungen von LENR-Stromgeneratoren befassen.

Danksagungen

Ich danke Michael McKubre und Andrew Meulenberg für ihre Unterstützung bei der Vorbereitung dieses Artikels, Mel Miles für seine aufmerksamen Kommentare zum Entwurf und Peter Gluck für seine anregende Korrespondenz.

Referenzen

1. CMNS mailing list managed by Haiko Lietz cmns@haikolietz.de
2. Beaudette, C. G. 2002. „Cold Fusion Research: Questions and Answers“, Unpublished, cgbeau@gwi.net
3. Nagel, D. J. 2009. „Questions and Answers About Lattice-Enabled Nuclear Reactions“, *Infinite Energy*, 14, 84, 12-24, infinite-energy.com/images/pdfs/nagel.pdf
4. McKubre, M. C. H., Tanzella, F. L. and Violante, V. 2012. „What Is Needed in LENR/FPE Studies?“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 8, 187-197, iscmns.org/CMNS/publications.htm

5. Nagel, D. J. 2014. „Evidence for Lattice Enabled Nuclear Reactions: Thermal Power Generation“, to be published.
6. Karabut, A. B. and Kolomeychenko, S. A. 2006. „Experiments Characterizing the X-Ray Emission from a Solid-State Cathode Using a High-Current Glow Discharge“, *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-10*, P. L. Hagelstein and S. R. Chubb (Editors), World Scientific, 585-596.
7. Srinivasan, M., Miley, G. H. and Storms, E. 2011. „Low Energy Nuclear Reactions: Transmutations“, *Nuclear Energy Encyclopedia: Science, Technology and Applications*, S. B. Krivit, J. H. Lehr and T. B. Kingery (Editors), Wiley, 503-540.
8. Mizuno, T. et al. 2002. „Relation Between Neutron Evolution and Deuterium Permeation of a Palladium Electrode“, *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-9*, X. Z. Li (Editor), 265-270.
9. Jiang, S. et al. 2014. „Neutron Burst Emissions from Uranium Deuteride and D-Loaded Titanium“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 13, 253-263.
10. Prelas, M. A. and Lukosi, E. 2014. „Neutron Emission from Cryogenically Cooled Metals Under Thermal Shock“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 13, 455-463.
11. Keeney, F. W. et al. 2006. „Charged-Particle Emission from Deuterided Metals“, *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-10*, P. L. Hagelstein and S. R. Chubb (Editors), World Scientific, 509-523.
12. Celani, F. et al. 1990. „Further Measurements on Electrolytic Cold Fusion with D₂O and Palladium at Gran Sasso Laboratory“, *Fusion Technology*, 17, 718-724.
13. Bush, R.T. and Eagleton, R.D. 1993. „Experimental Studies Supporting Transmission Resonance Model for Cold Fusion in Light Water. II. Correlation of X-Ray Emission with Excess Power“, *Proc. ICCF-3*, M. Okamoto (Editor), New Energy and Industrial Development Organization, 409-416.
14. Violante, V. et al. 2014. „RF Detection and Anomalous Heat Production During Electrochemical Loading of Deuterium in Palladium“, *Energia, Ambiente e Innovazione*, Vol. 2-3, 63-77.
15. Mosier-Boss, P. A. and Szpak, S. 1999. „The Pd/nH System: Transport Processes and Development of Thermal Instabilities“, *Nuovo Cimento Soc., Ital. Fis.*, Vol. A, 112, 577-586.
16. Swartz, M., Verner, G. and Weinberg, A. 2008. „Non-Thermal Near-IR Emission from High-Impedance and Codeposition LANR Experiments“, *Proc. ICCF-14*, 343-361, www.iscmns.org/iccf14/ProcICCF14a.pdf
17. Szpak, S., Mosier-Boss, P. A. and Gordon, F. E. 2006. „Experimental Evidence for LENR in a Polarized Pd/D Lattice“, presented at the National Defense Industry Association Conference, Washington, DC, lenr-canr.org.
18. Dufour, J. et al. 2001. „Experimental Observation of Nuclear Reactions in Palladium and Uranium: Possible Explanation by Hydrex Model“, *Fusion Technology*, 40, 91-116.
19. Chechin, V. A. et al. 1994. „Critical Review of Theoretical Models for Anomalous Effects (Cold Fusion) in Deuterated Metals“, *International Journal of Theoretical Physics*, 33, 617-670.
20. Storms, E. 2014. *The Explanation of Low Energy Nuclear Reaction*, Infinite Energy Press.
21. en.wikipedia.org/wiki/Occam%27s_razor
22. en.wikipedia.org/wiki/Deuterium
23. McKubre, M. C. H. et al. 1994. „Isothermal Flow Calorimetric Investigations of the D/Pd and H/Pd Systems“, *J. Electroanalytical Chemistry*, 368, p. 55, lenr-canr.org/acrobat/McKubreMCHIsothermala.pdf
24. Dardik, I. et al. 2006. „Excess Heat in Electrolysis Experiments at Energetics Technologies“, *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-11*, World Scientific, 84-101.
25. McKubre, M. C. H., Private Communication.
26. Mills, R. L. and Kneizys, S. P. 1991. „Excess Heat Production by the Electrolysis of an Aqueous Potassium Carbonate Electrolyte and the Implications for Cold Fusion“, *Fusion Technology*, 20, 65-81.
27. Notoya, R. and Enyo, M. 1993. „Excess Heat Production in Electrolysis of Potassium Carbonate Solution with Nickel Electrodes“, *Frontiers of Cold Fusion, Proc. ICCF-3*, H. Ikegami (Editor), Universal Academy Press, 421-426.
28. Ohmori, T. and Enyo, M. 1993. „Excess Heat Produced during Electrolysis of H₂O on Ni, Au, Ag and Sn Electrodes in Alkaline Media“, *Frontiers of Cold Fusion, Proc. ICCF-3*, H. Ikegami (Editor), Universal Academy Press, 427-430.
29. Notoya, R., Noya, Y. and Ohnishi, T. 1994. „Tritium Generation and Large Excess Heat Evolution by Electrolysis in Light and Heavy Water-Potassium Carbonate Solutions with Nickel Electrodes“, *Fusion Technology*, 26, 179-183.

30. Bush, R. T. 1990. „A Light Water Excess Heat Reaction Suggests that ‚Cold Fusion‘ May be ‚Alkali-Hydrogen Fusion‘“, *Fusion Technology*, 22, 301-322.
31. Swartz, M. R., Verner, G. M. and Frank, A. H. 2002. „The Impact of Heavy Water (D₂O) on Nickel-Light Water Cold Fusion Systems“, *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-9*, X.Z. Li (Editor), 335-342.
32. Dandapani, B. and Fleischmann, M. 1972. „Electrolytic Separation Factors of Palladium“, *J. Electroanalytical Chemistry*, 39, 323-332.
33. Focardi, S., Habel, R. and Piantelli, F. 1994. „Anomalous Heat Production in Ni-H System“, *Il Nuovo Cimento*, 107, 166-167.
34. Arata, Y. and Zhang, Y.-C. 1998. „Anomalous Differences Between Reaction Energies Generated within D₂O-Cell and H₂O-Cell“, *Japan. J. Appl. Phys.*, 37, L1274-L1276; 2002. „Formation of Condensed Metallic Deuterium Lattice and Nuclear Fusion“, *Proc. Japan Academy Ser. B*, 78, p. 57.
35. Kitamura, A. et al. 2011. „Heat Evolution from Pd Nano-Powders Exposed to High-Pressure Hydrogen Isotopes and Associated Radiation Measurements“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 4, 56-68.
36. Kitamura, A. et al. 2013. „Study of Anomalous Heat Evolution from H-Ni Nanoparticle System at Elevated Temperature with Mass-Flow Calorimetry“, *Proc. ICCF-18*, to be published.
37. Sakoh, H. et al. 2014. „Hydrogen Isotope Absorption and Heat Release Characteristics of a Ni-Based Sample“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 13, 471-484.
38. Mayer, F. J. and Reitz, J. R. 2012. „Electromagnetic Composites at the Compton Scale“, *Intl. J. of Theoretical Physics*, 51, 322-330.
39. Arata, Y. and Zhang, Y.-C. 1996. „Deuterium Nuclear Reaction Process within Solid“, *Proc. Japan Academy Ser. B*, 72, 179-184.
40. Nagel, D. J. et al. 2008. „Introduction to Calorimetry“, *Proc. ICCF-14*, pp. 1-66 (2008), www.iscmns.org/iccf14/ProcICCF14a.pdf
41. Siehe beispielsweise Kozima, H., Zhang, W.-S. and Dash, J. 2008. „Precision Measurement of Excess Energy in Electrolytic System Pd/D/H₂SO₄ and Inverse Power Distribution of Energy Pulses vs. Excess Energy“, *Proc. ICCF-13*, MATI Moscow, 348-358.
42. Miles, M. H., Fleischmann, M. and Imam, M. A. 2001. „Calorimetric Analysis of a Heavy Water Electrolysis Experiment Using a Pd-B Alloy“, *Naval Research Laboratory Report NRL/MR/6320-01-8526*.
43. Nagel, D. J. 2013. „Characteristics and Energetics of Craters in LENR Experimental Materials“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 10, 1-71.
44. Ruer, J. 2013. „Simulation of Crater Formation on LENR Cathodes Surfaces“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 12, 54-68.
45. Nagel, D. J. and Srinivasan, M. 2014. „Evidence from LENR Experiments for Bursts of Heat, Sound, EM Radiation and Particles and for Micro-Explosions“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 13, 443-454.
46. Fleischmann, M. and Pons, S. 1993. „Calorimetry of the Pd D₂O System: From Simplicity to Complications to Simplicity“ *Frontiers of Cold Fusion, Proc. ICCF-3*, H. Ikegami (Editor), Universal Academy Press, 47-66.
47. Preparata, G. 1996. „Everything You Always Wanted to Know About Cold Fusion Calorimetry“, *Proc. ICCF-6*, M. Okamoto (Editor), New Energy and Industrial Development Organization, 136-143.
48. Wang, X. F. and Arata, Y. 2014. „The Importance of the Removal of Helium from Nano-Pd Particles after Solid Fusion“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 13, 13-18.
49. Srinivasan, M. 2010. „Hot Spots, Chain Events and Micro-nuclear Explosions“, *Proc. ICCF-15*, V. Violante and F. Sarto (Editors), Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment, 240-245, iccf15.frascati.enea.it/docs/ICCF15-PROCEEDINGS.pdf
50. Mills, R. L. et al. 2013. „Catalyst Induced Hydrino Transition (CIHT) Electrochemical Cell“, blacklightpower.com/publications
51. Mills, R. L. et al. 2014. „Mechanism of Soft X-ray Continuum Radiation from Low-Energy Pinch Discharges of Hydrogen and Ultra-low Field Ignition of Solid Fuels“, blacklightpower.com/publications
52. en.wikipedia.org/wiki/Muon-catalyzed_fusion, starscientific.com.au
53. <http://answers.yahoo.com/question/index?qid=20111127115120AAiFb2a>
54. en.wikipedia.org/wiki/Muon
55. Maly, J. A. and Vavra, J. 1993. „Electron Transitions on Deep Dirac Levels I“, *Fusion Technology*, 24, 307-318; 1995. „Electron Transitions on Deep Dirac Levels II“, *Fusion Technology*, 27, 59-70.
56. Dufour, J. et al. 1996. „From ‚Cold Fusion‘ to ‚Hydrex‘ and ‚Deutex‘ States of Hydrogen“, *Proc. ICCF-6*, 482-495.

57. Heffner, H. 2008. „Deflation Fusion: Speculations Regarding the Nature of Cold Fusion“, *Infinite Energy*, 14, 80, 38-46
58. Mayer, F. J. and Reitz, J. R. 2014. „Thermal Energy Generation in the Earth“, *Nonlinear Processes Geophysics*, 21, 1-12.
59. Mayer, F. J. and Reitz, J. R. 2014. „Compton Composites Late in the Early Universe“, *Galaxies*, 2, 382-409.
60. Sinha, K. P. and Meulenberg, A. 2011. „Tunneling Beneath the 4He^* Fragmentation Energy“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 4, 241-255; 2012. „Lochon-Mediated Low-Energy Nuclear Reactions“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 6, 55-63.
61. Meulenberg, A. 2013. „From the Naught Orbit to the 4He Excited State“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 10, 15-29.
62. Naudts, J. 2005. „On the Hydrino State of the Relativistic Hydrogen atom“, [arXiv:physics/0507193](https://arxiv.org/abs/physics/0507193)
63. Meulenberg, A. and Sinha, K. P. 2014. „Deep Electron Orbits in Cold Fusion“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 13, 368-377.
64. Dufour, J. 2013. „An Introduction to the Pico-Chemistry Hypothesis“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 10, 40-45.
65. Nagel, D. J. and Swanson, R. 2013. „Excess Heat Might Not Be Entirely from Nuclear Reactions“, *Proc. ICCF-18*, to be Published.
66. Storms, E. 2002. „The Nature of the Nuclear-Active Environment Required for Low-Energy Nuclear Reactions“, *Infinite Energy*, 8, 45, 32-37.
67. McKubre, M. C. H. 2003. „Review of Experimental Measurements Involving DD Reactions“, ICCF-10 Short Course, August 25.
68. Miles, M. et al. 1991. „Heat and Helium Production in Cold Fusion Experiments“, *The Science of Cold Fusion*, T. Bressani, E. Del Giudice and G. Preparata (Editors), Societa Italiana di Fisica, 363-372.
69. McKubre, M. C. H. et al. 2000. „The Emergence of a Coherent Explanation for Anomalies Observed in D/Pd and H/Pd Systems: Evidence for ^4He and ^3He Production“, *Proc. ICCF-8*, F. Scaramuzzi (Editor), Italian Physical Society, 3-10.
70. Bressani, T. 1998. „Nuclear Physics Aspects of Cold Fusion Experiments: Scientific Summary after ICCF-7“, *Proc. ICCF-7*, 32-37; Miles, M. H. 2006. „Correlation of Excess Enthalpy and Helium Production: A Review“, *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-10*, P. L. Hagelstein and S. R. Chubb (Editors), World Scientific, 123-131.
71. Srinivasan, M. 2014. „Transmutations and Isotopic shifts in LENR Experiments“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 13, 495-504.
72. Dufour, J. 2000. „Hydrex Catalyzed Transmutation of Uranium and Palladium: Experimental Part“, *Proc. ICCF-8*, F. Scaramuzzi (Editor), Italian Physical Society, 153-158.
73. en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission
74. Philips, G. W., Nagel, D. J. and Coffey, T. 2005. „A Primer on the Detection of Nuclear and Radiological Weapons“
75. Violante, V. et al. 2012. „The Study of the Fleischmann and Pons Effect through Materials Science Development“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 8, 60-74.
76. McKubre, M. C. H. et al. 2008. „Replication of Condensed Matter Heat Production“, *Low-Energy Nuclear Reactions Sourcebook*, J. Marwan and S. B. Krivit (Editors), American Chemical Society, 219-247.
77. McKubre, M. C. H. and Tanzella, F. L. 2006. „Using Resistivity to Measure H/Pd and D/Pd Loading: Method and Significance“, *Proc. ICCF-12*, A. Takahashi, K.-I. Ota and Y. Iwamura (Editors), World Scientific, 392-403.
78. Nagel, D. J. 1998. „The Status of ‚Cold Fusion‘“, *Radiation Physics and Chemistry*, 51, p. 653.
79. Arata, Y. and Zhang, Y.-C. 1993. „Cold Fusion in a Complex Cathode“, *Proc. ICCF-3*, M. Okamoto (Editor), New Energy and Industrial Development Organization, 441-446.
80. Yoshino, H., Igari, E. and Mizuno, T. 2014. „Replicable Model for Controlled Nuclear Reaction using Metal Nanoparticles“, 2014 Cold Fusion/LANR Colloquium at MIT, coldfusionnow.org/interviews/2014-cflanr-colloquium-at-mit-full-coverage
81. Nagel, D. J. 2008. „The Intersection of Low Energy Nuclear Reactions with Nanometer-Scale Science, Technology and Engineering“, *Infinite Energy*, 14, 79, 12-20.
82. Nagel, D. J. and Imam, M. A. 2006. „Energetics of Defects and Strains in Palladium“, P. L. Hagelstein and S. R. Chubb (Editors), *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-10*, World Scientific, 291-303.

83. Pons, S. et al. 1990. „Method and Apparatus for Power Generation“, International Patent Application, WO 90/10935, March 12; Bush, R.T. 1990. „Isotopic Mass Shifts in Cathodically-Driven Palladium via Neutron Transfer Suggested by a Transmission Resonance Model ...“, *Proc. ICCF-1*, National Cold Fusion Institute, 213-228; McKubre, M. C. H. et al. 1993. „Excess Power Observations in Electrochemical Studies of D/Pd System; the Influence of Loading“, *Frontiers of Cold Fusion*, H. Ikegami (Editor), Universal Academy Press, 5-19; Kunimatsu, K. et al. 1993. „Deuterium Loading Ratio and Excess Heat Generation during Electrolysis of Heavy Water by a Palladium Cathode in a Closed Cell Using a Partially Immersed Fuel Cell Anode“, *Frontiers of Cold Fusion*, H. Ikegami (Editor), Universal Academy Press, 31-45.
84. Letts, D. and Cravens, D. 2006. „Laser Stimulation of Deuterated Palladium: Past And Present“, *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-10*, P. L. Hagelstein and S. R. Chubb (Editors), World Scientific, 159-170; Swartz, M.R. 2006. „Photo-Induced Excess Heat from Laser-Irradiated Electrically Polarized Palladium Cathodes in D₂O“, *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-10*, P. L. Hagelstein and S. R. Chubb (Editors), World Scientific, 213-225.
85. Paquin, R. A. 1994. „Properties of Metals“, *Handbook of Optics: Fundamentals, Techniques, and Design*, Vol. 1, M. Bass (Editor), Chapter 35, Optical Society of America.
86. Iwamura, Y. et al. 2006. „Low Energy Nuclear Transmutations in Condensed Matter Induced by D₂ Gas Permeation through Pd Complexes: Correlation between Deuterium Flux and Nuclear Products“, *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-10*, P. L. Hagelstein and S. R. Chubb (Editors), World Scientific, 435-446.
87. Storms, E. 2007. *The Science of Low Energy Nuclear Reaction*, World Scientific.
88. Ibid., pp. 42-44.
89. Celani, F. et al. 2006. „Thermal and Isotopic Anomalies when Pd Cathodes are Electrolyzed in Electrolytes Containing Th-Hg Salts Dissolved at Micromolar Concentrations in C₂H₅OD/D₂O Mixtures“, *Condensed Matter Nuclear Science, Proc. ICCF-10*, P. L. Hagelstein and S. R. Chubb (Editors), World Scientific, 379-397.
90. Violante, V. et al. 2008. „Material Science on the Pd-D System to Study the Occurrence of Excess Power“, *Proc. ICCF-14*, 429-436, www.iscmns.org/iccf14/ProcICCF14b.pdf
91. Szpak, S. et al. 1991. „On the Behavior of Pd Deposited in the Presence of Evolving Deuterium“, *J. Electroanalytical Chemistry*, 302, 255-260; Swartz, M. R. 1997. „Codeposition of Palladium and Deuterium“, *Fusion Technology*, 31, p. 228.
92. Fleischmann, M., Pons, S., Anderson, M. W. and Hawkins, M. 1990. „Calorimetry of the Palladium-Deuterium-Heavy Water System“, *J. Electroanalytical Chemistry*, 287, p. 293.
93. Miles, M. H., Private Communication.
94. Widom, A. and Larsen, L. 2006. „Ultra Low Momentum Neutron Catalyzed Nuclear Reactions on Metallic Hydride Surfaces“, *European Physics J. C*, 46, 107-111.
95. Storms, E. 2013. „Cold Fusion from a Chemist's Point of View“, *Infinite Energy*, 18, 108, 13-18.
96. Arata, Y. and Zhang, Y.-C. 2002. „Formation of Condensed Metallic Deuterium Lattice and Nuclear Fusion“, *Proc. Japan Academy*, 78B, 57-62.
97. Kidwell, D. A. et al. 2011. „Fabrication, Characterization and Evaluation of Excess Heat In Zirconium-Nickel-Palladium Alloys“, *Proc. ICCF-16*, M. Srinivasan and J.-P. Biberian (Editors), 42-52.
98. Celani, F. et al. 2008. „High Temperature Deuterium Absorption in Palladium Nano-Particles“, *Proc. ICCF-13*, Y. Bazhutov (Editor), Publishing Center MATI, Moscow Technical University, 181-201.
99. Mathews, S. A. et al. 2013. „Surface Preparation of Materials for LENR: Femtosecond Laser Processing“, *Proc. ICCF-18*, to be published.
00. Knies, D. 2012. Private Communication.
01. Miley, G. 2013. „An Interview with George Miley“, *Infinite Energy*, 19, 112, 60-62.
02. Baird, J. K. and Schwartz, E. M. 1999. „Isotope Effect in Hydrogen Diffusion in Metals“, *Zeit. Für Physikalische Chemie*, 211, 47-68.
03. Iwamura, Y. et al. 2002. „Observation of Low Energy Nuclear Reactions Induced by D₂ Gas Permeation through Pd Complexes“, *Proc ICCF-9*, X. Z. Li (Editor), 141-146.
04. Biberian, J.-P. et al. 2014. „Possible Role of Oxides in the Fleischmann-Pons Effect“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 13, 38-43.
05. Miles, M. H. et al. 1996. „Heat and Helium Measurements Using Palladium Alloys in Heavy Water“, *Proc. ICCF-6*, M. Okamoto (Editor), New Energy and Industrial Development Organization, 20-28.
06. McKubre, M. C. H. et al. 2014. „Calorimetric Studies of the Destructive Stimulation of Palladium and Nickel Fine Wires“, *J. Condensed Matter Nuclear Science*, 13, 337-345.

07. Shirai, O. et al. 1991. „Some Experimental Results Relating to Cold Nuclear Fusion“, *Bulletin of the Institute of Chemical Research of Kyoto University*, 69, 550-559.
08. Appleby, A. J. et al. 1990. „Anomalous calorimetric Results During Long-Term Evolution of Deuterium on Palladium from Alkaline Deuterioxide Electrolyte“, *Proc. of the First Annual Conference on Cold Fusion*, National Cold Fusion Institute, 32-42.
09. McKubre, M. C. H. 2009. „Cold Fusion (LENR): One Perspective on the State of the Science“, *Proc. ICCF-15*, V. Violante and F. Sarto (Editors), xv-xxvii, lenr-canr.org/acrobat/McKubreMCHcoldfusionb.pdf
10. Levi, G. et al. 2013. „Indications of Anomalous Heat Energy Production in a Reactor Device Containing Hydrogen Loaded Nickel Powder“, arXiv: 1305.3913, May.
11. Levi, G. et al. 2014. „Observation of Abundant Heat Production from a Reactor Device and of Isotopic Changes in the Fuel“, ecat.com/wp-content/uploads/2014/10/ECAT-test-report-2014.pdf, October.

Abgerufen von „https://lenr.wiki/index.php?title=Fragen_zu_den_Gittergestützten_Kernreaktionen:_Mechanismen_und_Materialien&oldid=5454“

Diese Seite wurde zuletzt am 1. Oktober 2022 um 16:38 Uhr bearbeitet.