

Der Gitterenergiekonverter



Journal of Condensed Matter Nuclear Science 35 (März 2022) 30-48, © 2022 ISCMNS

Lattice Energy Converter

Frank E. Gordon* / Harper J. Whitehouse

* Corresponding author: feg@inovl.com



Zusammenfassung

Mehrere Ausführungen eines Gitterenergiekonverters (Lattice Energy Converter - LEC) haben gezeigt, dass sie in der Lage sind, über längere Zeiträume selbstständig eine Spannung und einen Strom zu erzeugen und aufrechtzuerhalten. Ein LEC wandelt die interne Energie innerhalb des Gitters bestimmter Materialien, wie z. B. Palladium, oder von Gasen, die in diesem Gitter eingeschlossen sind, wie etwa Wasserstoff oder Deuterium, in ionisierende Strahlung und in elektrische Energie um. Die Experimente umfassen Tests, bei denen die Strom-Spannungs-Kennlinien (I-U) der LECs gemessen wurden, während eine externe Spannungs-/Stromquelle angelegt war, sowie andere I-U-Tests, bei denen die spontane LEC-Spannung als Funktion der Temperatur und des Widerstandes gemessen wurde. Es hat sich gezeigt, dass die Spannung und der Strom der LEC mit ansteigender Temperatur zunehmen. Die von einem LEC erzeugte elektrische Energie ähnelt der einer Atom batterie, nur dass ein LEC hierfür keine radioaktiven Materialien benötigt. Während die bisher erzielten Energieniveaus mehrere Größenordnungen unter denen liegen, welche von den meisten Stromquellen erwartet werden, würde der berechnete Fluss an ionisierender Strahlung, wie er zur Erzeugung der experimentell gemessenen Spannungen und Ströme notwendig wäre, ein Äquivalent von mehreren Curies an Strahlung erfordern. Die vorliegenden Ergebnisse konnten von zwei Personen unabhängig voneinander reproduziert werden. Das Video der Präsentation des Gitterenergiekonverters auf dem LENR-Workshop zu Ehren von Dr. Srinivasan im Jahr 2021 finden Sie unter: [youtube.com/watch?v=J4dzTWY_aWM](https://www.youtube.com/watch?v=J4dzTWY_aWM). In diesem Artikel wird dieses YouTube-Video durch zusätzliche Analysen ergänzt, die die beobachteten experimentellen Ergebnisse untermauern.

1. Einführung

Ein Gitterenergiekonverter (Lattice Energy Converter - LEC) ist ein Gerät zur direkten Energieumwandlung, durch das die Wärmeenergie aus den Gitterschwingungen in ionisierende Strahlung und in elektrische Energie umgewandelt wird. Die direkte Umwandlung von Wärme in Elektrizität ohne den Einsatz von radioaktiven Materialien oder mechanischen Verfahren stellt ein anspruchsvolles, zugleich aber auch vielversprechendes Verfahren zur Erzeugung von elektrischer Energie dar. Abbildung 1 zeigt eine Pd-H-LEC-Zelle, in der die spontane Erzeugung von Spannung und Strom über eine Lastimpedanz selbstständig eingeleitet und aufrechterhalten wird. In ihrer einfachsten Ausführung erfolgt diese direkte Umwandlung unter Verwendung eines Elektrodenpaares, das unter

J. Condensed Matter Nucl. Sci. 35 (2022) 30-48

The logo for the Journal of Condensed Matter Nuclear Science, featuring a stylized atom with three electrons and a nucleus, all contained within a blue oval border. The text "Journal of Condensed Matter Nuclear Science" is written in a white, sans-serif font inside the oval.

Research Article

Lattice Energy Converter

F.E. Gordon*
Audi Inc., 2707 Camino Place, San Diego, CA, 92122 USA

H.J. Whitehouse
Audi Inc., 6441 El Cajon Place Ave., San Diego, CA, 92120 USA

Abstract
Multiple implementations of a Lattice Energy Converter (LEC) have demonstrated the ability to self-initiate and self-sustain the production of a voltage and current over extended periods of time. A LEC converts the internal energy within the lattice of some materials, such as palladium, or of gases occluded within the lattice, such as hydrogen or deuterium, into ionizing radiation and electrical energy. Experimental results indicate when spontaneous LEC voltage and current were measured when an external voltage source was applied, with a 1.5 V test when the spontaneous LEC voltage and current were measured at a fixed temperature and resistance. LEC voltage and current has been shown to increase with increased temperature. The electrical power produced by a LEC is similar to that produced by a nuclear battery however, a LEC does not require radioactive materials. While the energy levels produced to are several orders of magnitude below those required for most power sources, as calculated by the scaling radiation necessary to produce the experimentally measured voltage and current would require the equivalent of several curies of radioactive materials to produce the reported experimental results. A video of the Lattice Energy Converter presentation, from the 2021 LENR workshop, honor of Dr. Srinivasan, is available at: https://www.youtube.com/watch?v=J4dzTWY_aWM. This paper expands on the YouTube video presentation with additional analysis that supports the observed experimental results.

Keywords: Direct energy conversion, ionizing radiation electricity generation

1. Introduction
A Lattice Energy Converter (LEC) is a direct energy conversion device that converts the thermal energy of lattice vibration into ionizing radiation and electrical energy. The direct conversion of heat into electricity without the use of radioactive materials or mechanical means is a challenging yet promising method for the production of electrical energy. Figure 1 shows a Pd-H LEC cell that self-initiates and self-sustains the spontaneous production of a voltage and current into a load impedance. In its simplest implementation a LEC achieves direct conversion using a pair of electrodes separated by a gas at normal temperature and pressure (NTP). One electrode, designated the working

*Corresponding author. E-mail: feg@inovl.com; +1 458-349-7968

© 2022 ISCMNS. All rights reserved. ISSN: 2227-3123

Standardtemperatur und -druck (STP) durch ein Gas voneinander isoliert ist. Die eine Elektrode, die nachfolgend als Arbeitselektrode (Working Electrode - WE) bezeichnet wird, besteht zum Teil aus einem mit Wasserstoff oder Deuteriumgas beladenen Wirtsmaterial, wie Eisen (Fe), Nickel (Ni) oder Palladium (Pd). Die andere Elektrode, die nachfolgend als Gegenelektrode (Counter Electrode - CE) bezeichnet wird, besteht aus einem gewöhnlichen Metall, wie Kupfer (Cu), Zink (Zn) oder Messing, einer Legierung aus Cu und Zn.

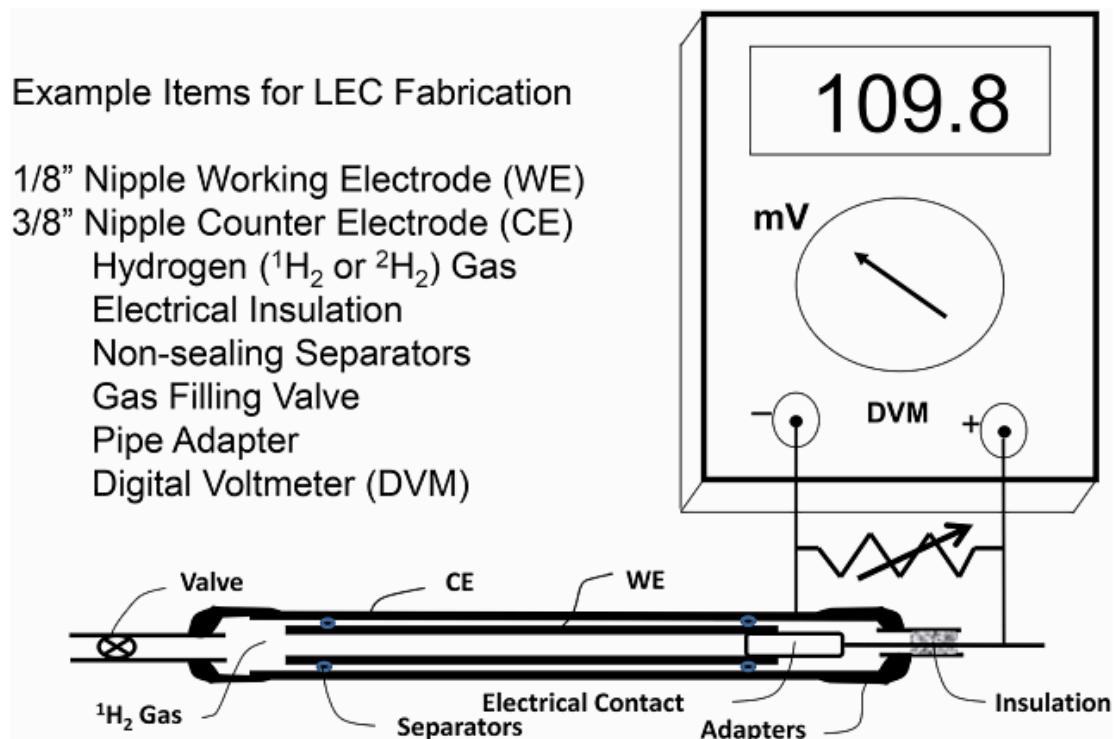


Abbildung 1. Selbstinitiierende und selbsterhaltende Pd-H-LEC-Zelle unter Last.

In Experimenten wurde festgestellt, dass die WE „aktiv“ wird und ionisierende Strahlung emittiert, sobald das Wirtsmaterial des Wasserstoffes galvanisch aus einer wässrigen Lösung abgeschieden wird. Die Aktivität der WE lässt sich an der Luft nachweisen, indem die WE in der Nähe einer CE platziert wird und zwischen den beiden Elektroden ein Digitalvoltmeter (DVM) angeschlossen wird. Sollte sich keine spontane Spannung zeigen, wird die WE wieder in das Beschichtungsbad zurückgelegt und weiteres wasserstoffbeladenes Wirtsmaterial auf der WE abgelagert. Es wurden mehrere LEC-Konfigurationen getestet, darunter auch Versuche, bei denen zwischen der Arbeitselektrode und der Gegenelektrode eine externe elektrische Spannung angelegt wurde, ebenso wie Versuche, bei denen der LEC in Abwesenheit einer externen Spannung und eines externen Stromes die Erzeugung einer Spannung und eines Stromes selbsttätig herbeiführt und aufrechterhält.

2. Der Hintergrund

2.1. Wechselwirkungen zwischen Wasserstoff und Metall

Seit über 150 Jahren, genauer seit H. Sainte-Claire Deville und E. Troost^[1] darüber berichtet haben, dass Wasserstoff rasch durch homogene Platten aus Gusseisen (Fe) und Platin (Pt) diffundiert, werden das Metall-Wasserstoff-System^[2] und insbesondere das Palladium-Wasserstoff-System^{[3][4]} untersucht. Diese überraschenden Ergebnisse veranlassten Thomas Graham, Master of the Royal Mint, dazu, eine ähnliche Versuchsreihe mit Palladium (Pd) durchzuführen. Drei Jahre später war Graham^[5] der erste, der die hohe Diffusionsgeschwindigkeit von Wasserstoff durch erhitztes Pd nachwies. Außerdem stellte Graham fest, dass Pd mehr als das 600-Fache seines eigenen Volumens an Wasserstoff absorbieren kann. In jüngerer Zeit wurde die Diffusion von Wasserstoff im Palladium-Wasserstoff-System (Pd-H) sowie im Nickel-Wasserstoff- (Ni-H) und Eisen-Wasserstoff-System (Fe-H) von Mehrer^[6] dokumentiert. Fukai^[2]

weist bei der Erörterung der Rolle, die Gitterleerstellen und insbesondere überreichliche Leerstellen (Superabundant vacancie - SAV) bei der Bestimmung der Eigenschaften von Materialien spielen, auf Folgendes hin:

Echte Phasengleichgewichtsdiagramme, die M-Atome mit Leerstellen enthalten, wurden bisher noch nicht erstellt. Diese Erkenntnis brachte uns zu der Erwartung, dass SAVs im Prozess der galvanischen Abscheidung von Metallen aus wässrigen Lösungen gebildet werden müssten. Dabei werden M- und H-Atome gleichzeitig abgeschieden, und im Zuge dieses Prozesses kann es zur Bildung einer entsprechenden Anzahl von Leerstellen kommen.

Im Experiment wurden WEs dadurch hergestellt, dass Wasserstoff aus einer wässrigen PdCl₂- und LiCl-Lösung sowie Pd aus einer wässrigen PdBr₂-Lösung ohne LiBr mit abgeschieden wurden, mit denen J. P. Biberian^[7] dann eine aktive WE hergestellt und die LEC-Ergebnisse reproduziert hat. WEs wurden auch auf dem Wege der Koabscheidung von Eisen aus einer wässrigen Lösung von FeCl₂ 4H₂O hergestellt, und es wird davon ausgegangen, dass auch andere Materialien oder Legierungen zur Herstellung aktiver WEs geeignet sind.

2.2. Die elektrischen Eigenschaften von Gasen

Auch die elektrischen Eigenschaften von Gasen werden seit mehr als 130 Jahren untersucht. Im Jahr 1896 veröffentlichten J. J. Thomson und E. Rutherford^[8] eine wichtige Abhandlung *On the Passage of Electricity through Gases exposed to Röntgen (X-)Rays*. (Über den Durchgang von Elektrizität durch Gase, welche Röntgenstrahlen ausgesetzt sind). Im selben Jahr hielt Thomson^[9] an der Princeton University in New Jersey eine Reihe von Vorlesungen über die Entladung von Elektrizität durch Gase. Im Jahr 1899^[10] folgte dann seine entscheidende Arbeit *On the theory of the conduction of electricity through gases by charged ions* (Über die Theorie der Elektrizitätsleitung durch Gase mittels geladener Ionen), in der er eine mathematische Theorie entwickelte, mit der sich der Ionisationsgrad pro Volumeneinheit des Gases anhand einer Messung der Stromdichte pro Flächeneinheit des Leitungsweges vorhersagen ließ. Im Jahr 1903 veröffentlichte er die 1. Auflage seiner Abhandlung *Conduction of Electricity Through Gases* (Die Leitung von Elektrizität durch Gase)^[11]. Im Jahr 1906 veröffentlichte er die 2. Auflage^[12] dieser Abhandlung, und im selben Jahr erhielt er den Nobelpreis für Physik

in Anerkennung der großen Verdienste seiner theoretischen und experimentellen Untersuchungen über die Leitung von Elektrizität durch Gase.

Darauf folgte in den Jahren 1928^[13] und 1933^[14] die erweiterte zweibändige 3. Auflage, die er zusammen mit seinem Sohn G. P. Thomson, dem späteren Nobelpreisträger (1937), verfasst hatte.

Die Theorie der Elektrizitätsleitung durch Gase lässt sich nutzen, um die Leistung eines LEC zu analysieren, mit dem Ziel, sowohl das Phänomen an sich zu verstehen als auch seine Leistung zu optimieren, um so zu Ausführungsformen für die praktische Anwendung zu gelangen. Im Hinblick auf dieses Ziel sind die folgenden Arbeiten von J. S. E. Townsend^[15], K. K. Darrow^[16] und L. B. Loeb^[17] von besonderem Interesse. Townsend war ein Forschungsassistent von J. J. Thomson, und obwohl man sich an seine Arbeiten über Gasentladungen, d. h. die Townsend-Lawinenentladung, erinnert, ist seine Diskussion in seinem Buch^[15] *Electricity in Gases* über die Bewegung von Ionen in Gasen sehr aufschlussreich. Darrow war Forschungsphysiker an den Bell Laboratories in New Jersey, und seine Erörterung der Diffusion von Ionen zur Messung der Stromdichte pro Flächeneinheit in seinem Buch mit dem Titel *Electrical Phenomena in Gases* (Elektrische Phänomene in Gasen) ist von besonderer Bedeutung und wird in einem folgenden Abschnitt ausführlich behandelt. Loeb war viele Jahre lang Professor für Physik an der University of California in Berkeley, und sein Buch mit dem Titel *Basic Processes of Gaseous Electronics*^[18] (Grundlegende Prozesse der gasförmigen Elektronik) beschreibt die während des Zweiten Weltkriegs erzielten Fortschritte im Verständnis.

Die wichtigste Erkenntnis aus allen oben genannten Referenzen besteht darin, dass es eine Reihe von Eigenschaften des Gases gibt, die sorgfältig berücksichtigt werden müssen, wenn es darum geht, die Leistungsfähigkeit eines LEC zu bestimmen: die Ionenbildungsrate, die Bindung ionisierter Elektronen an neutrale Moleküle, die Rekombinationsrate der Ionen zurück zu neutralen Molekülen, die Ionendichte im Gas, die Ionenbeweglichkeit im Gas, die Raumladung im Gas aufgrund unterschiedlicher Mengen an

positiven und negativen Ionen, die Stärke des elektrischen Feldes im Gas, die Diffusion von Ionen aufgrund von Konzentrationsgefällen im Gas sowie die Stromdichte, welche pro Querschnittseinheit des Leitungsweges erzeugt wird und von der Zellgeometrie abhängt.

3. Experimentelle Ergebnisse

3.1. Versuchsaufbau und Versuche mit einer externen variablen

Spannungsversorgung

Die ersten LENR-Experimente begannen mit dem Ziel, die Elektrolyse in einem Gas durchzuführen, um zu einer Fugazität zu gelangen und auf diese Weise bei Temperaturen über 100 °C eine Arbeitselektrode aus Palladium elektrisch mit Wasserstoff zu beladen. Mehrere LENR-Wissenschaftler hatten experimentell nachgewiesen, dass die Leistung von LENR mit der Höhe der Temperatur und der Rate der Beladung zunimmt – Experimente auf der Basis der Flüssigelektrolyse sind jedoch auf Temperaturen unterhalb des Siedepunktes des flüssigen Elektrolyten beschränkt.

Abbildung 2 zeigt die erste experimentelle Zelle, die mit dem Ziel entwickelt wurde, zu einer erheblichen Erhöhung der Betriebstemperatur zu gelangen und auf diese Weise die Leistung von LENR zu steigern. Diese Zelle umfasst eine Arbeitselektrode, die aus einem 1/4-Zoll-Kupferrohr besteht, welches aus einer wässrigen Lösung von 0,03 M PdCl₂ und 0,3 molarem LiCl mit Palladium beschichtet wurde. Diese Arbeitselektrode war in einem 3/4-Zoll-Messingrohr untergebracht, welches als Gegenelektrode fungierte. Der Zusammenbau der Zelle erfolgte unter Verwendung standardmäßiger Rohrverschraubungen, einschließlich einer nichtleitenden Durchführung zur elektrischen Isolierung der Arbeitselektrode gegenüber der Gegenelektrode.

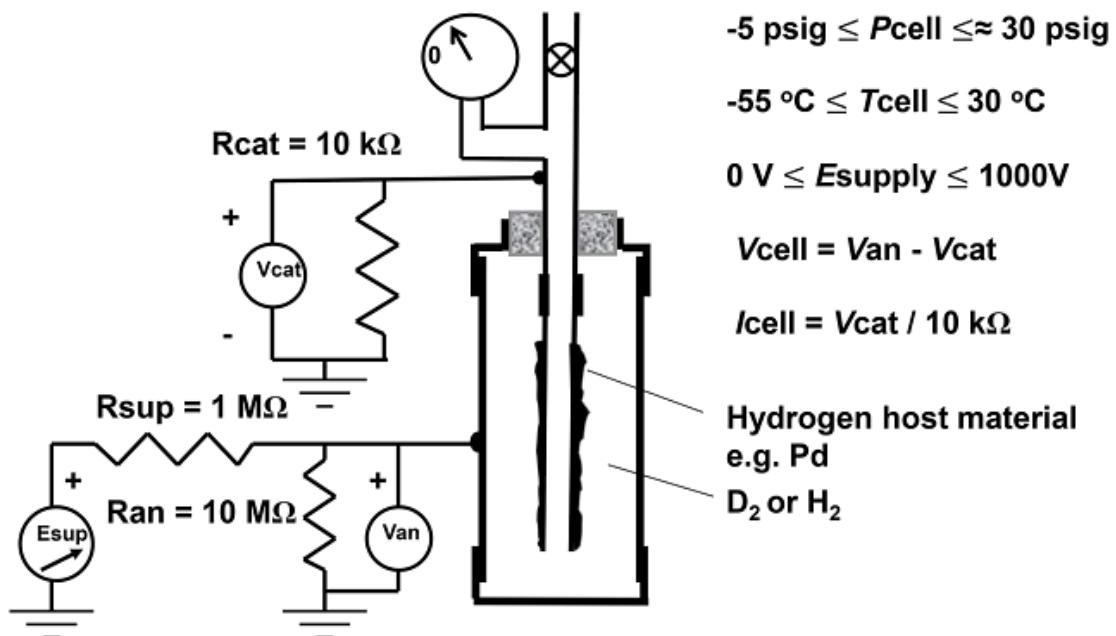


Abbildung 2. LEC-Zelle, ausgestattet mit einer variablen externen Spannungsversorgung zur Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U).

Nach dem Zusammenbau wurde die Zelle unter Vakuum gesetzt und anschließend mit Deuteriumgas gefüllt. Da Gas, solange es keine Ionen enthält, ein Nichtleiter ist, wurden in der Zelle sechs 1- μ Ci-Quellen aus ²⁴¹Am platziert, um das Gas im Laufe der ersten Tests zu ionisieren. Abbildung 2 zeigt auch eine Hochspannungs-Gleichstromversorgung, die zum Schutz des Personals und der Geräte mit einem 1- Ω -Strombegrenzungswiderstand in Reihe geschaltet ist. Um die Spannungen gegen Erde zu erfassen, wurde an die Arbeitselektrode (WE) und an die Gegenelektrode (CE) ein LabJack U6 Pro angeschlossen, der über die Kapazität zur Aufzeichnung von bis zu 14 Datenkanälen verfügt. Um die Spannung auf maximal ± 10 Volt zu begrenzen, wurde parallel zum Eingang des LabJack in die Schaltung der CE ein Widerstandsspannungsteiler aufgenommen. Erste Versuche mit dieser Pd-D-LEC-Zellkonfiguration

ergaben einen höheren Stromfluss durch das Gas, d. h. dass sich im Gas mehr Ionen befanden, als dies durch die $6 \mu\text{Ci}$ aus dem ^{241}Am zu erwarten wäre, sofern sich auf der WE keine Pd-Beschichtung befindet. Auch nach Entfernung der ^{241}Am -Quellen wies die LEC-Zelle immer noch einen Stromfluss auf.

Eine zweite bedeutsame Beobachtung bestand darin, dass das LabJackTM-Datenerfassungssystem bei einer Abtastrate von 512 Abtastungen pro Sekunde Spannungsspitzen und kurzzeitige Ausschläge erkannte hat, die innerhalb von Zeiträumen von weniger als 2 ms aufgetreten sind. Abbildung 3 zeigt einen Screenshot der LabJack-Echtzeitanzeige für die LEC-Amplitude. Die Abtastrate, die bei diesem Test zur Anwendung kam, betrug 128 Abtastungen pro Sekunde. Die vertikale Achse steht für die Amplitude in Volt und die horizontale Achse für die Zeit in Sekunden. Da das LabJack-Messsystem auf ± 10 Volt begrenzt ist, kommt ein Skalierungsfaktor zum Einsatz, mit dem die Spannung während der parallelen Datenverarbeitung und -aufzeichnung in Echtzeit korrigiert wird.

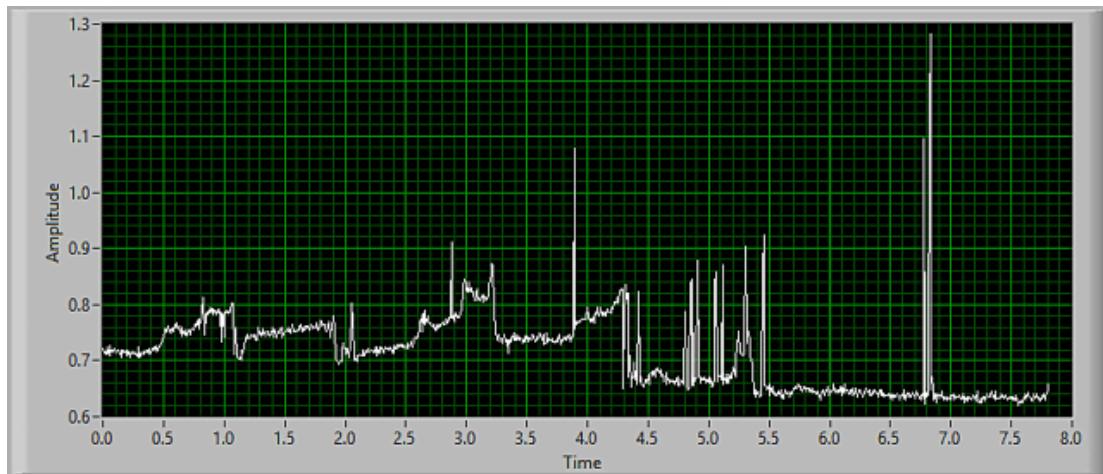


Abbildung 3. Beispielhafte Echtzeitanzeige der LEC-Amplitude in Volt mit einer sich über 8 Sekunden erstreckenden Datenanzeige auf dem Bildschirm.

Damit die Verarbeitung der Daten mit deren Erfassung Schritt halten kann, haben wir eine Software entwickelt, die parallel zu der des LabJack läuft und die in einer Kombination aus Microsoft Excel und Visual Basic besteht, damit eine Datei, sobald sie gespeichert wurde, verarbeitet und angezeigt werden kann. Die Datenverarbeitung umfasst für jeden einzelnen Kanal zumindest die folgenden Funktionen: Datenskalierung, Mittelwertbildung über die Datei, Mittelwertbildung pro Sekunde sowie die maximale und die minimale Spannung pro Sekunde. Die zusätzliche Verarbeitung umfasste die Nutzung eines Ludlum Protonenrückstoß-Szintillationsdetektors (PRESCILA) zum Nachweis von Neutronen sowie die von Natriumiodid-Detektoren zum Nachweis von Gammastrahlung, einschließlich ihrer Energiewerte, sowie die Signalverarbeitung verschiedener Umgebungskanäle, wie z. B. die Umgebungstemperatur des Prüfstandes, die Temperatur des LabJack-Labors und die Spannungswerte der Hochspannungsversorgung. In der Regel können mit den 14 verfügbaren Kanälen bis zu vier LEC-Zellen gleichzeitig aufgezeichnet und zusammen mit den Temperaturen verarbeitet werden.

Zur Beurteilung der Leistung eines LEC wurden mehrere Tests durchgeführt, z. B. durch ein Wechseln der Polarität der angelegten externen Spannung, durch Änderungen der Zelltemperatur und des Gasdrucks, durch ein Variieren der Zellabmessungen und durch Veränderungen des Lastwiderstandes. Die LEC-Zellen wurden außerdem mit Deuteriumgas, mit Wasserstoffgas und sogar mit atmosphärischer Luft getestet, welche einen Wasserstoffgehalt von etwa 0,5 Teilen pro Million aufweist. An der Luft nahm die Aktivität über mehrere Stunden ab, was darauf schließen lässt, dass die Aktivität zum Teil auf die Ausgasung des Wasserstoffs zurückzuführen ist, doch auch nach mehreren Tagen konnte noch eine gewisse Aktivität beobachtet werden.

In Abbildung 4a wird ein Beispiel gezeigt, bei dem die Temperatur in der Zelle auf etwa minus 55 °C abgesenkt wurde, um die Anzahl der Wasserdampf-Ionencluster im Gas zu verringern^[19] und sie somit als Quelle von Ionen zu eliminieren, welche zur Leitfähigkeit der Zelle beitragen. Nachdem sich die Temperatur der Zelle stabilisiert hatte, wurde die Spannung von einem Höchstwert von 800 Volt in 100-Volt-Schritten auf 100 Volt reduziert, wobei die Schrittweite bis auf 10 Volt verringert wurde. Obwohl die Hochspannungsversorgung anfangs bei 800 Volt lag, betrug die Spannung über dem LEC aufgrund der

Leitfähigkeit der Zelle und des Strombegrenzungswiderstandes etwa 275 Volt. Mit sinkender Spannung verringert sich auch der Strom, und es ergibt sich für die Leitfähigkeit die dargestellte Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U).

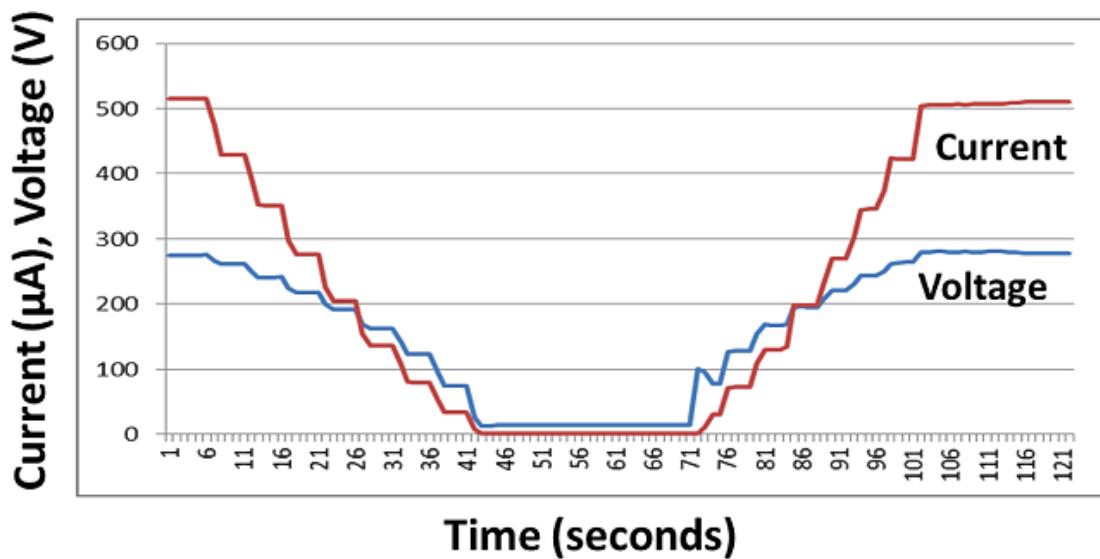


Abbildung 4a. Gemessene I-U-Kennlinie einer bei -55°C getesteten LEC-Zelle über einen Zeitraum von 2 Minuten.

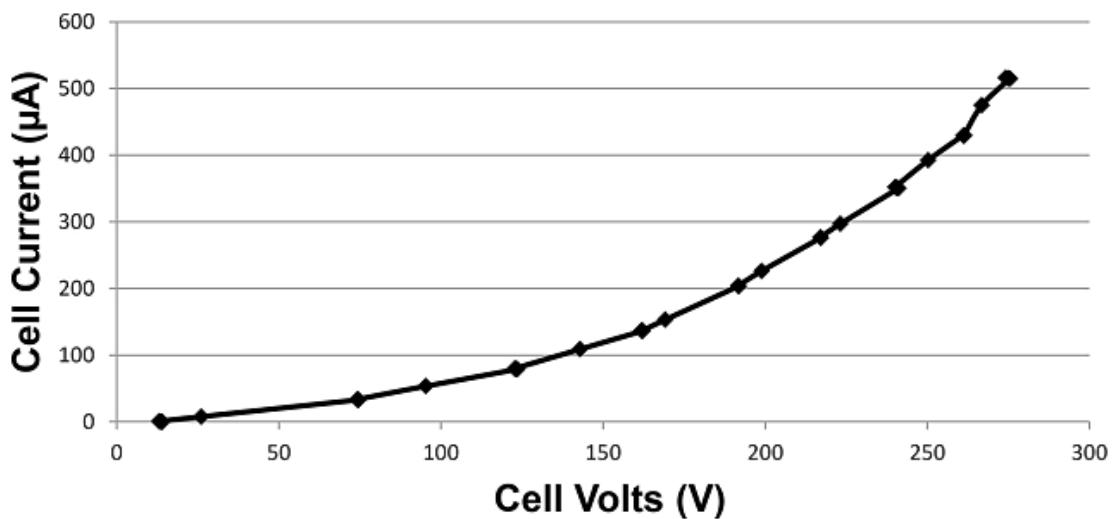


Abbildung 4b. I-U-Beziehung zwischen Strom und Spannung bei -55°C .

Die untere Grafik (Abbildung 4b) zeigt die Stromstärke im Verhältnis zur Spannung (I-U). Überraschenderweise zeigt sich jedoch bei näherer Betrachtung der Rohdaten, dass die Stromstärke auf null zurückgeht, bevor die Spannung auf null fällt. Bei Abbildung 5 handelt es sich um eine einfachlogarithmische Darstellung der Strom- und Spannungsdaten (I-U), aus der eine Änderung der Steigung hervorgeht, die bei etwa 28 Volt einsetzt – die gemessene Spannung fällt aber nicht auf null, auch wenn der Strom gegen null tendiert.

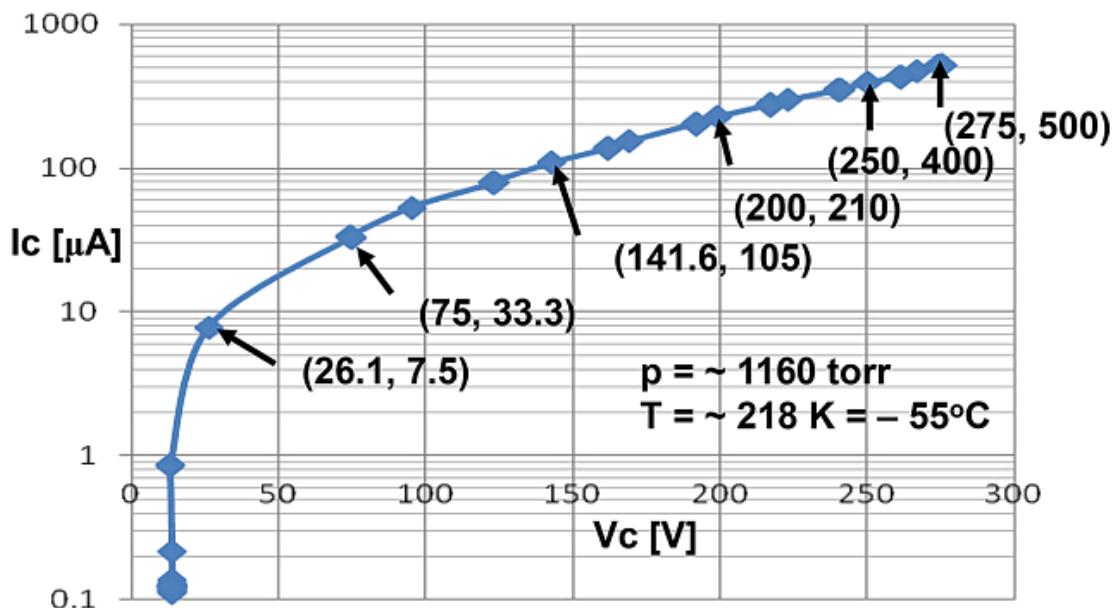


Abbildung 5. Halblogarithmische Darstellung der Daten aus dem Test der LEC-Zelle in Abbildung 4,
die zeigen, dass der Strom auf null geht, bevor die Spannung der Zelle auf null geht.

Abbildung 6 zeigt, dass die Stromstärke $I_e(V)$ bei einer Annäherung von V an null mit einer Steigung $m \approx 0,0241$ nicht gegen null extrapoliert wird, da der Term $I_e^{1/3}(0)^3 \approx 1,3$ bestehen bleibt. Die Thomsons^[13] schreiben jedoch $V(i)$ als Polynom der Stromdichte i , d. h. $V = Ai^2 + Bi$. Dies stellt einen bedeutenden Unterschied dar, denn die Kurve des LEC ist nach oben konvex, während die Kurve der Thomsons konkav nach unten verläuft. Dieser Unterschied lässt sich möglicherweise darauf zurückführen, dass das Pd mit zunehmender Spannung an Fugazität zunimmt und der Ionisationsfluss somit entsprechend ansteigt.

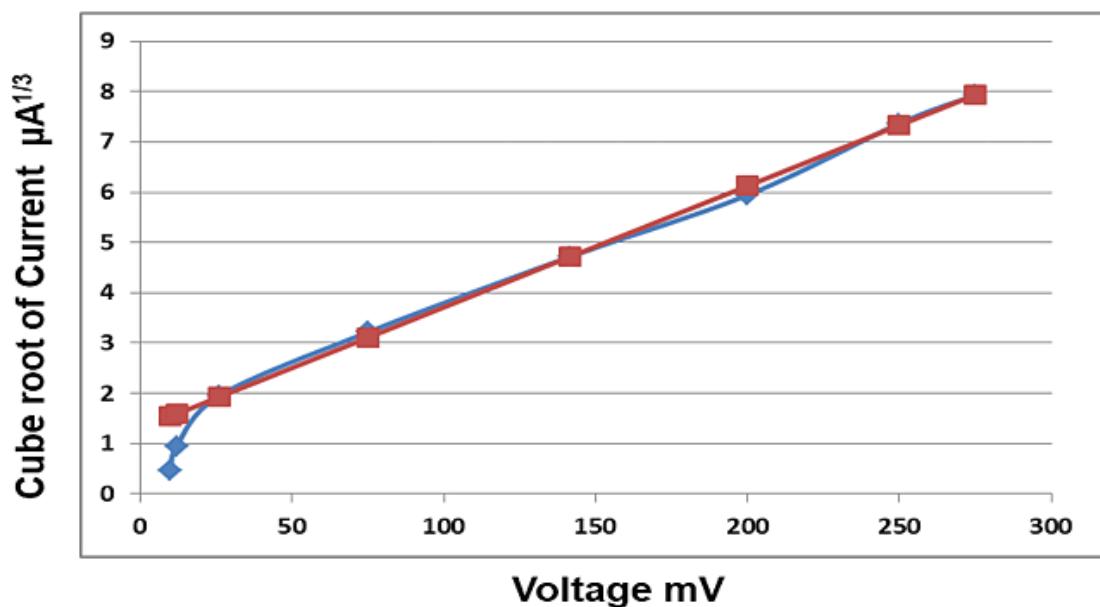


Abbildung 6. Darstellung der Kubikwurzel des Stroms gegenüber der Spannung - Blau: Experimentelle Daten - Rot: Polynomische Datenanpassung: $I(V)^{1/3} = [mV + I_e^{1/3}(0)]$ mit $m \approx 0,0241$ (33) und $I_e^{1/3}(0) \approx 1,3$.

3.2. Experimente ohne externe Spannungsversorgung

Diese erstaunlichen Ergebnisse konnten problemlos überprüft werden, indem alle externen Spannungs- und Stromquellen von der LEC-Zelle entfernt wurden. Um jegliche Möglichkeit eines unbeabsichtigten Stromflusses seitens des LabJack-Messsystems auszuschließen, war das einzige Messgerät, das an den LEC angeschlossen war, ein Digitalvoltmeter (DVM) mit einer internen Impedanz von $10 \text{ M}\Omega$ parallel zu einem variablen Lastwiderstand R , was einen effektiven Widerstand von $936 \text{ k}\Omega$ ergab (siehe Abbildung 1).

Als die Zelle mit der ko-beschichteten WE aus Pd zusammengebaut und mit Wasserstoff gefüllt worden war, hat sie ganz von alleine sowohl eine Leerlaufspannung ($10 \text{ M}\Omega$) als auch einen Kurzschlussstrom ($680 \text{ }\Omega$) erzeugt und aufrechterhalten. Um zu einer korrekten Bewertung einer LEC-Zelle zu gelangen, sind sowohl „Leerlauf“- als auch „Kurzschluss“-Messungen erforderlich. Eine noch genauere Analyse lässt sich durchführen, indem mehrere I-U(R)-Werte erfasst werden. In Abbildung 7 wird die Leistung des LEC in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt, wobei die Leerlaufspannung ($RL \sim 936 \text{ k}\Omega$) von etwa $10 \text{ }\mu\text{V}$ bei 28°C auf mehr als 525 mV bei einer Temperatur von 185°C angestiegen ist, was einem Spannungsanstieg von über $50\,000 : 1$ entspricht.

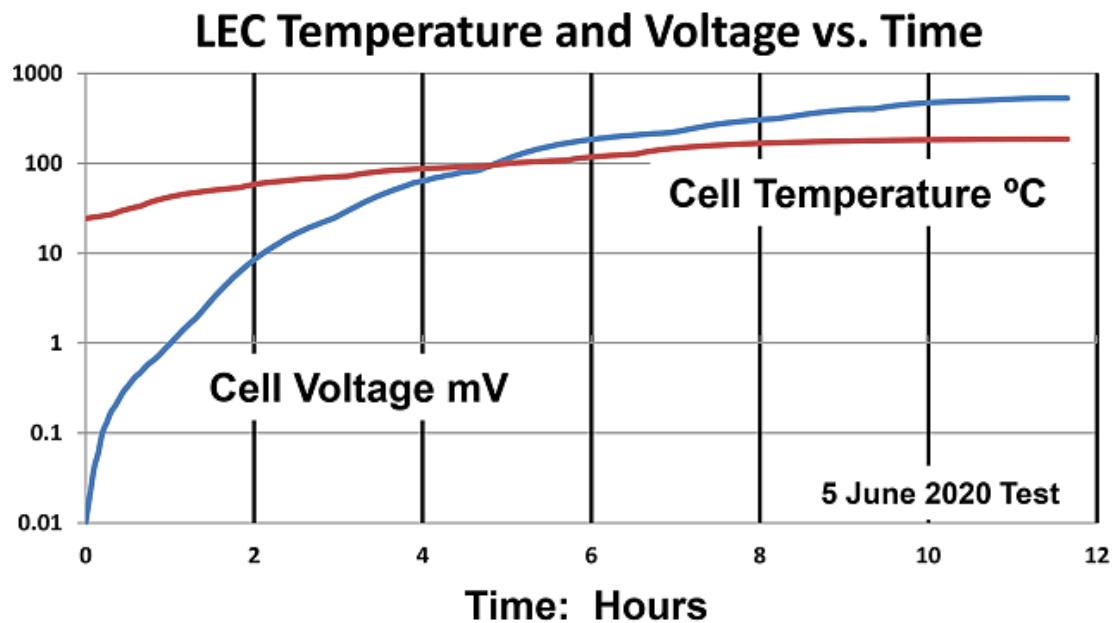


Abbildung 7. Aufzeichnung der Temperatur der LEC-Zelle und der Spannung bei offenem Stromkreis ($\sim 936 \text{ k}\Omega$) als Funktion der Zeit.

Selbsterhaltende LECs wie in Abbildung 1 werden unter Last getestet, indem der variable Lastwiderstand, der parallel zum DVM geschaltet ist, verändert wird, so wie in Abbildung 1 dargestellt. Das Gehäuse mit dem variablen Widerstand R verfügt über 24 Widerstandswerte, die von $1 \text{ M}\Omega$ bis hinunter zu $10 \text{ }\Omega$ reichen. Abbildung 8 zeigt die für jeden verwendeten Widerstand erzeugte Spannung, also etwa 17 absteigende Widerstandswerte.

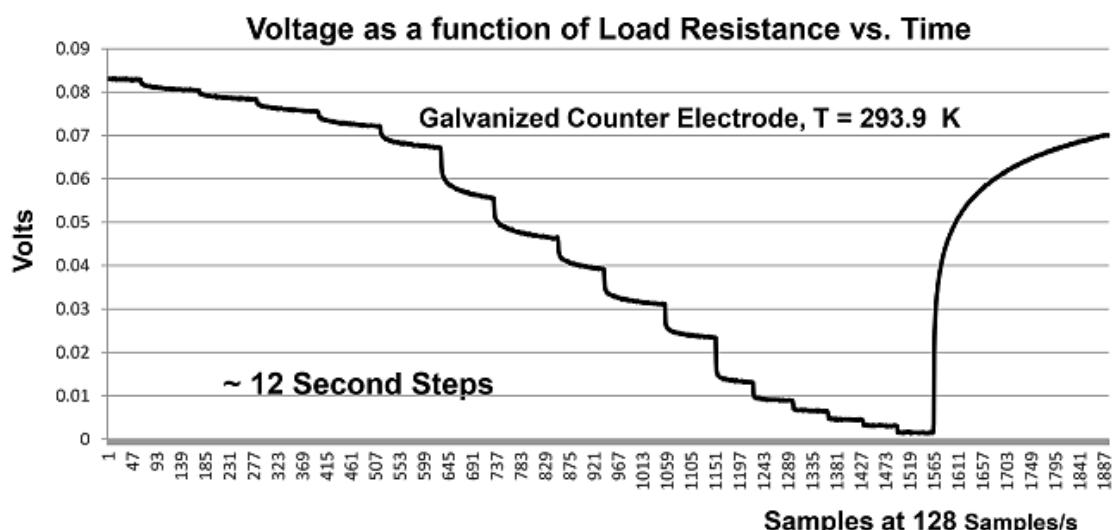


Abbildung 8. Aufzeichnung der Spannung der LEC-Zelle als Funktion des Widerstands bei Raumtemperatur.

Die Widerstandslast wurde in Abständen von etwa 12 Sekunden geändert, um ein Entladen des Wasserstoffs aus dem Palladium-Wasserstoff-Wirtsmaterial zu vermeiden. Sobald der Widerstandswert von 680Ω auf $1 M\Omega$ zurückgeschaltet wird, lässt sich bei der Spannungserholung eine Zeitkonstante feststellen, die möglicherweise im Zusammenhang mit der Diffusion und Mobilität der Wasserstoffionen im Gas steht, welche wiederum auf die Änderung der elektrischen Feldstärke im Gas zurückzuführen ist.

Abbildung 9 veranschaulicht im Diagramm den in Abbildung 7 dargestellten LEC-Lasttest der Zelle bei drei Temperaturen von 80 , 140 und 185 °C. Die drei Kurven im oberen Bereich der Abbildung zeigen die LEC-Spannung für jede Temperatur in Abhängigkeit vom Widerstand, während die Kurven im unteren Bereich den nach dem Ohmschen Gesetz berechneten Laststrom sowie den berechneten Nebenschlussstrom in Abhängigkeit von der Zellspannung darstellen.

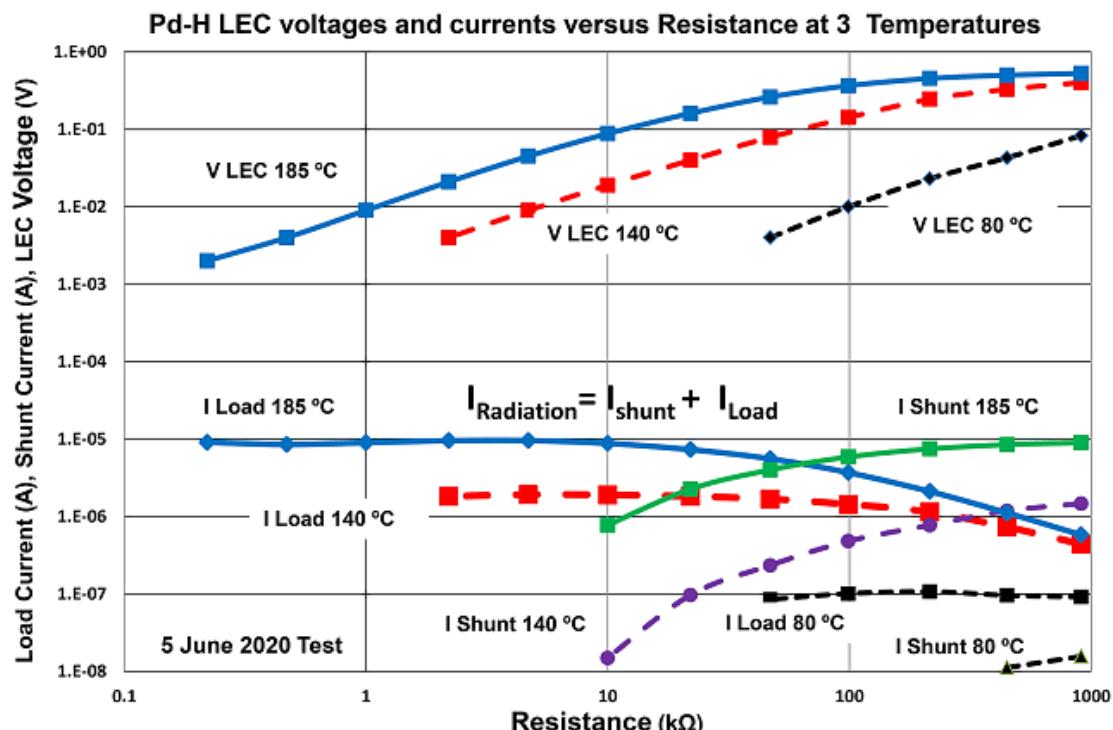


Abbildung 9. Darstellung der Spannung und der Ströme einer LEC-Zelle als Funktion des Lastwiderstandes bei drei unterschiedlichen Temperaturen. Die Erläuterungen zu I_{Load} , I_{Shunt} und $I_{\text{Radiation}}$ sind dem Text zu entnehmen.

Besonders bemerkenswert ist der relativ konstante Strom, der bei niedrigen Werten des Lastwiderstandes zu beobachten ist, wenn die Spannung über der Zelle gering ist. Für eine direkte Beladung, die im Vakuum erfolgen kann, stehen zwei mögliche Mechanismen zur Verfügung: zum einen jene Partikel oder Ionen, die durch radioaktiven Zerfall, durch thermonische Emission oder durch den photoelektrischen Effekt freigesetzt werden, und zum anderen die Diffusion von Ionen im Gas infolge von Konzentrationsgefällen. Dieses Verhalten eines konstanten Stroms steht im Widerspruch zum prognostizierten I-U-Verhalten, wie es von Thomson und anderen für den Fall von höheren Zellspannungen beschrieben wurde. Indem sie bei ihrer Analyse die Diffusion vernachlässigten, konnten sie aufzeigen, dass der Strom bei kleinen Spannungswerten linear mit der Spannung ansteigt, bis er sich bei hohen Spannungswerten asymptotisch einem konstanten Wert nähert, den sie als Sättigungsstrom bezeichneten. Dieses lineare Verhalten bei niedriger Spannung lässt sich so auch bei der Berechnung des Nebenschlussstroms für den LEC beobachten. Bei der Bewertung der LEC-Leistung muss jedoch darauf geachtet werden, dass zur Quantifizierung des Leistungsverhaltens des Diffusionsstromes in LEC-Zellen die Spannungsdaten für niedrige Widerstandswerte erfasst werden.

Die Leistungskurven erreichen ihren Höhepunkt genau an der Stelle, an der die interne Impedanz der LEC-Zelle mit der externen Lastimpedanz zusammenfällt, wie es die Theorie der Elektrotechnik vorhersagt und wie es für herkömmliche Stromversorgungen typisch ist. Bemerkenswert ist hierbei, dass sowohl die Leerlaufspannung als auch der Kurzschlussstrom einer LEC-Zelle, die ja kein radioaktives Material verwendet, vergleichbar sind mit denen einer handelsüblichen Nuklearbatterie P100 NanoTritium™, welche 225 mCi an Strahlung benötigt.

Abbildung 11 veranschaulicht eine mögliche Kombination aus phänomenologischer, physikalischer und elektrischer Darstellung zur Erklärung des elektrischen Verhaltens der in Experimenten vermessenen LEC-Zellen auf Palladium-Wasserstoff- (Pd-H), Palladium-Deuterium- (Pd-D) und Eisen-Wasserstoff- (Fe-H) Basis.

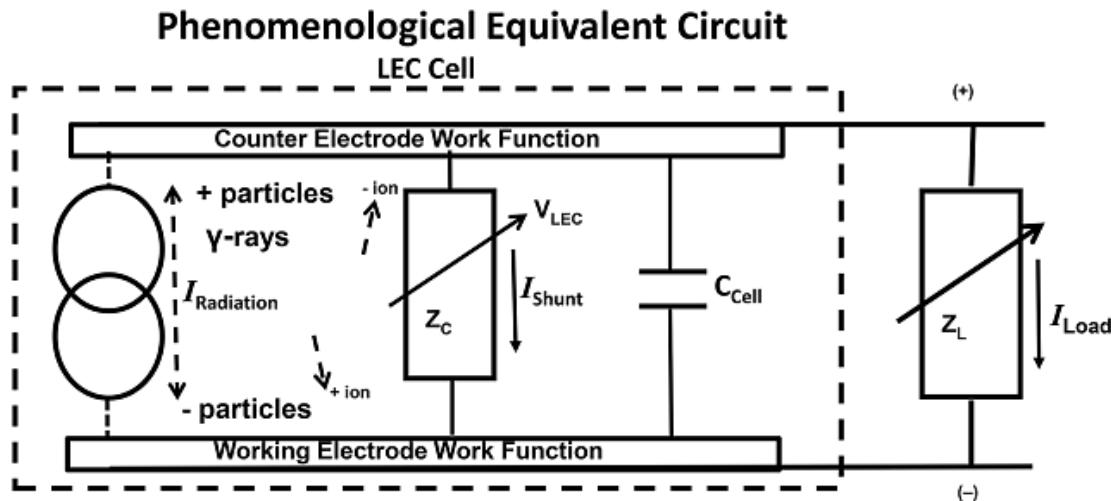


Abbildung 11. Kombiniertes phänomenologisches und physikalisches Schaltbild auf der Grundlage eines Norton-Ersatzschaltbildes.

Dies ähnelt dem Norton-Äquivalent eines linearen elektrischen Gerätes mit zwei Anschlüssen, bei der die Norton-Schaltungselemente die Stromquelle und die Zellenimpedanz bilden, die Impedanz Z_C jedoch von der Spannung abhängt. Die Betrachtung des Stromverhaltens der LEC-Zelle zeigt, dass sich die Zellen so verhalten, als ob der beobachtete Strom von einer Stromquelle stammt. Deshalb wird in der schematischen Darstellung das durch die Strahlung erzeugte Gefälle in der Ionendichte der Zelle auch als Stromquelle gezeigt. Sowohl die Arbeitselektrode als auch die Gegenelektrode werden als Austrittsarbeit (WF) dargestellt, welche für die Arbeitselektrode und die Gegenelektrode aufgrund der bei beiden Elektroden verwendeten unterschiedlichen Materialien möglicherweise unterschiedlich ausfallen können. Bei der LEC-Zelle sind auch das Wasserstoff- ($^1\text{H}_2$) oder das Deuteriumgas ($^2\text{H}_2$) sowie die zugehörigen Ionen angegeben. Die variable Impedanz der Spannungsleitung Z_C wird durch den internen Ionen-Plasma-Leitungsstrom I_{Shunt} und die Zellspannung I_{LEC} bestimmt. Die elektrische Kapazität der Zelle wird durch C_{Cell} repräsentiert. Die externe variable Lastimpedanz wird durch Z_L dargestellt, und der Laststrom I_{Load} durch einen Pfeil.

Die Schwankungen, wie sie sich bei höheren Zellspannungen in den Lastströmen der Zelle zeigen, lassen sich durch einen zunehmenden internen Zellstrom I_{Shunt} erklären, welcher einen Teil des thermisch erzeugten Spontanstrahlungsstromes $I_{Radiation}$ weg von der Lastimpedanz Z_L und durch die spannungsvariable interne Zellimpedanz Z_C hindurchleitet. Die Schwankungen beim Kurzschlussstrom und bei der Leerlaufspannung sowie bei der Zelleistung unter höheren Temperaturen lassen sich mit der Hypothese erklären, dass $I_{Radiation} = I_0 \exp(-E_\alpha/k_B T)$ beträgt, wobei E_α eine mit der WE verbundene Aktivierungsenergie, k_B die Boltzmann-Konstante und $k_B T$ die mit dem Gitter im Wirtsmaterial des Wasserstoffes und dem darin eingeschlossenen Wasserstoff verbundene Wärmeenergie sind. Diese Hypothese wird durch die Tatsache gestützt, dass eine Arrheniusdarstellung $\ln(I_{Radiation}) = -(E_\alpha/k_B)(1/T) + \ln(I_0)$ des Strahlungsstromes bei den drei Temperaturen 80, 140 und 185 °C eine gerade Linie mit der Steigung $-(E_\alpha/k_B)$ ergab, was zu einer berechneten Aktivierungsenergie von 0,601 eV geführt hat. Die Bildung von Leerstellen in Metallen weist ebenfalls die Form $N_{Vacancies} = N_0 \exp(-E_\alpha/k_B T)$ auf, was darauf schließen lässt, dass die Leerstellen für die Leistung eines LEC eine wesentliche Rolle spielen dürften. Die Aktivierungsenergie von Leerstellen liegt bei Pd zwischen 1,41 und 1,52 eV^[20].

Abbildung 12 zeigt ein Beispiel für eine sich selbst aktivierende und sich selbst aufrechterhaltende LEC-Zelle, die ihre Polarität über einen Zeitraum von vier Tagen dreimal gewechselt hat. Die LEC-Spannung war zunächst negativ und wurde dann, als die Temperatur erhöht wurde, positiv. Als die Temperatur zurückging, fiel die LEC-Spannung wieder ins Negative und stieg dann allmählich ins Positive, obwohl die Temperatur relativ konstant geblieben war. Die durchgeführten Tests unter Last, sowohl bei negativer als auch bei positiver Spannung, sind mit den Lasttests jener Zellen vergleichbar, die eine relativ konstante Spannung aufweisen. Dieses Verhalten wurde bereits in mehreren LEC-Zellen beobachtet. Die Ursache hierfür ist nicht bekannt, obwohl eine Möglichkeit darin bestehen könnte, dass sich die Austrittsarbeit der Materialien verändert, wenn sich deren Wasserstoffbeladung ändert und die Elektrodenoberflächen einer ionisierenden Strahlung ausgesetzt werden. Dieses Verhalten ist ein weiteres Beispiel für die komplexe Natur eines scheinbar einfachen Gerätes.

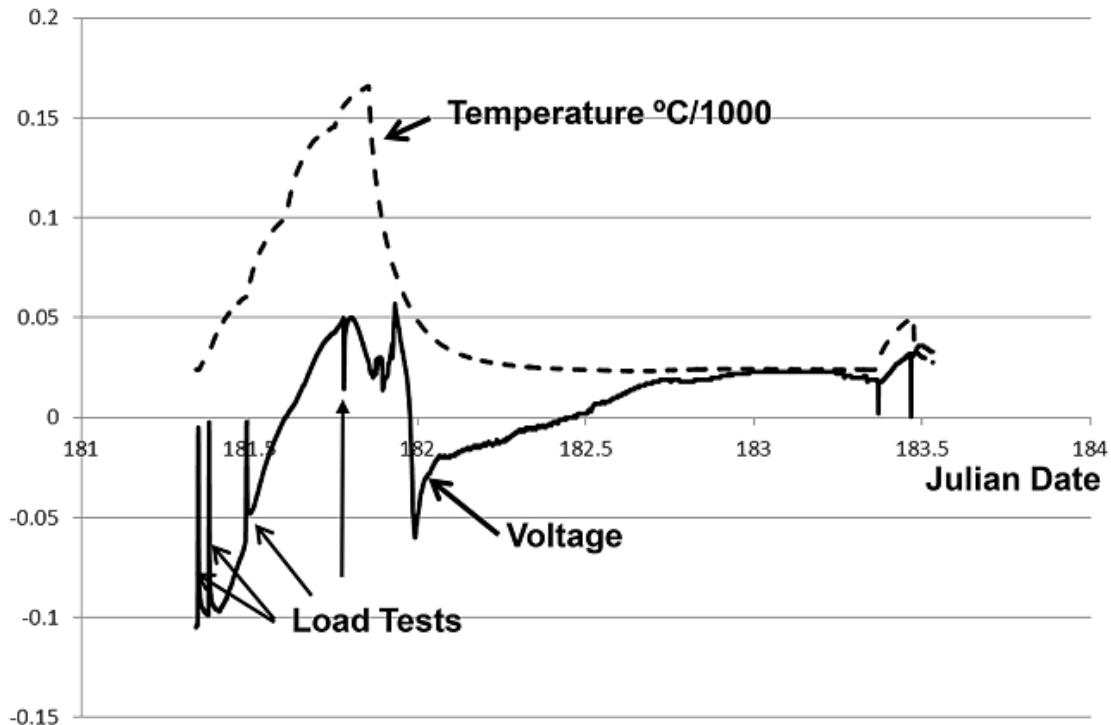


Abbildung 12. Beispiel für das komplexe spontane Verhalten einer LEC-Zelle als Funktion der Zeit und der Temperatur.

4. Analyse der Versuchsergebnisse

4.1. Die Theorie

Obwohl die physikalischen Prozesse, die in einer LEC zu ionisierender Strahlung führen, noch nicht verstanden sind, gibt es für den Stromfluss in Gasen bereits eine ausgereifte Theorie. In seinen Vorlesungen über The Discharge of Electricity Through Gases (Die Entladung von Elektrizität über Gase) [9] schreibt Thomson:

Es wird sich zeigen, dass die Analogie, die zwischen einer verdünnten Elektrolytlösung und einem den Röntgenstrahlen ausgesetzten Gas besteht, auf eine Vielzahl von Phänomenen zutrifft, und wir konnten feststellen, dass diese bei der Erklärung einer ganzen Reihe von charakteristischen Eigenschaften der Stromleitung durch Gase von großem Nutzen ist.

Obwohl deren elektrische Instrumentierung für heutige Verhältnisse recht begrenzt war und die Analyse der Elektrizitätsleitung die Auswirkungen der Ionendiffusion und der Raumladung im Gas zunächst nicht berücksichtigt hat, haben die Experimente von Thomson und Rutherford [8] doch gezeigt:

Die Tatsache, dass der Durchgang eines elektrischen Stroms durch ein Gas dessen Leitfähigkeit zerstört, bestätigt eine äußerst charakteristische Eigenschaft der Stromableitung durch Gase, welche Röntgenstrahlen ausgesetzt sind – das bedeutet, dass der Strom im Gas

bei einer bestimmten Strahlungsintensität einen bestimmten Maximalwert nicht überschreitet, wie groß die elektromotorische Kraft auch sein mag. Das Gas ist gewissermaßen „gesättigt“.

Einige Jahre später lieferte Thomson^[10] eine in mathematischer Hinsicht ausführlichere Analyse der Stromleitung, in der er auch die Wirkung der Raumladung im Gas mit einbezogen hat, allerdings immer noch ohne Berücksichtigung der Diffusion.

Die elektrische Leitfähigkeit, die Gase unter bestimmten Umständen aufweisen – wie beispielsweise beim Durchgang von Röntgen- oder Uranstrahlen durch das Gas, oder wenn sich das Gas in einer Vakuumröhre oder in der Nähe eines mit ultraviolettem Licht beleuchteten Metallstücks befindet –, lässt sich auf die Anwesenheit von geladenen Ionen im Gas zurückführen, wobei die Bewegung dieser Ionen im elektrischen Feld den Strom bildet.

Leider ist es Thomson nicht gelungen, die Differentialgleichung für das elektrische Feld als einer Funktion der Lage innerhalb des Gases für den allgemeinen Fall eines endlichen Ionisationsgrades q zu entwickeln, in dem die positiven und negativen Ionen über unterschiedliche Mobilitäten verfügen, d. h. über unterschiedliche Driftgeschwindigkeiten aufgrund des Einflusses des elektrischen Feldes. Thomson liefert ein Näherungsverfahren zur Berechnung des elektrischen Feldes in einem Gas für den Fall, dass die Anzahl der positiven Ionen gleich der Anzahl der negativen Ionen ist. Für den Fall eines elektrischen Feldes zwischen planparallelen Elektroden in Luft veranschlagt er das elektrische Feld für den Punkt zwischen den Elektroden, an dem $d^2 E / dx^2 = 0$ beträgt, als $1/2,51$ des elektrischen Feldes am selben Punkt, wobei er voraussetzt, dass keine Raumladung vorhanden ist. Außerdem liefert er eine Formel zur Ermittlung dieses Verhältnisses für jedes beliebige Gas, dessen Mobilitätswerte bekannt sind, und diese ergibt für Wasserstoff einen Wert von $\sim 1/4,67$. Einige Jahre später haben E. Riecke^[21] und G. Mie^[22] Näherungslösungen zur Verteilung des elektrischen Feldes im Gas für verschiedene Verhältnisse der Stromdichte zur Sättigungsstromdichte entwickelt.

In der zweiten Hälfte des 19. und noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts lag das Hauptaugenmerk der Forscher auf dem Verständnis der physikalischen Zusammenhänge bei der Leitung von Elektrizität durch Gase. Zu diesem Zweck hatten die meisten Forscher Vorkehrungen getroffen, um sicherzustellen, dass die von ihnen verwendeten Röntgenstrahlen bzw. die von den Uransalzen ausgehenden Emissionen nicht auf die Elektroden ihrer Experimente gelangen konnten, was aufgrund des photoelektrischen Effektes sonst zur Erzeugung zusätzlicher Ionen geführt hätte.

Mit Townsend^[15], einem Forschungsstudenten von Thomson, verlagerte sich der Schwerpunkt weg von Experimenten bei niedrigen Werten von elektrischem Feld und Druck, z. B. $E/p < 2$, wobei E in $[V \cdot cm^{-1}]$ und p in $[mm Hg]$ oder $[Torr]$ gemessen werden, hin zu Experimenten bei hohen $E/p > 2$, bei denen der Einfluss des Aufpralls von Gasionen auf die Elektroden nun an Bedeutung gewann^[23]. Da die Entladungen bei hohen $E/p > 2$ selbsterhaltend waren, verlor die Rolle einer externen ionisierenden Strahlung an Bedeutung. Nützlich ist auch Thomsens Artikel in der Encyclopædia Britannica^[24], der eine Analyse zur Leitfähigkeit enthält, die sich ergibt, wenn alle Ionen das gleiche Vorzeichen aufweisen und somit auch über die gleiche Ladung verfügen. Zum Verständnis einiger elektrotechnischer Fragen, die bei hohen E/p -Werten von Bedeutung sind, ist auch die Lektüre von Peeks^[25] „Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering“ (Dielektrische Phänomene in der Hochspannungstechnik) aufschlussreich. In seinem Buch werden Koronaentladungen und Gasdurchschläge sowie Lichtbögen in Zylinderkoordinaten bei hohen E/p -Werten erörtert. Da ein LEC bei $E/p < 2$ arbeitet, lassen sich diese Phänomene als mögliche Erklärungen für die Stromleitung im LEC ausschließen, und man kann sich der schwierigeren Frage widmen, worin die Ursache für die Stromleitung liegt.

Aber erst mit der Arbeit des Forschungsphysikers K. K. Darrow^[16], der in den Bell Telephone Laboratories tätig war, hat sich der Schwerpunkt auf die Analyse der Elektrizitätsleitung durch Gase verlagert, wie er selbst schreibt:

Es ist der Zustand des leitenden Gases, auf den es zuerst und am meisten ankommt; wir müssen es analysieren, die verschiedenen Arten von geladenen und ungeladenen Teilchen, aus denen es besteht, identifizieren, ihre Anzahl und ihre Geschwindigkeiten bestimmen und dann (wenn möglich) herausfinden, wie die angelegte Potentialdifferenz und die anderen Kräfte der Umgebung diesen Zustand herbeiführen. Was aber den elektrischen Strom anbelangt, so kann dieser durchaus als eine geringfügige Störung des leitenden Systems betrachtet werden.

In seiner Analyse des leitenden Systems aus drei Gleichungen, mit denen er Riecke^[21] folgt, berücksichtigt Darrow sowohl die Wirkung des elektrischen Feldes als auch die der Diffusion der Ionen im Gas. Dabei stellt er fest, dass die Diffusion von Ionen aufgrund positiver und negativer Konzentrationsgefälle der Ionen $-D_1 dn_1/dx$ bzw. $-D_2 dn_2/dx$ die gleiche Wirkung hat wie die Ionendrift aufgrund des elektrischen Feldes. Wenn er also die Gleichung für die Stromdichte pro Flächeneinheit i aufstellt, beinhaltet ein Term das Produkt aus der Ionendichte n und dem elektrischen Feld E sowie der Ionenbeweglichkeit μ , während der andere Term den Gradienten der Ionendichte dn/dx , multipliziert mit dem Diffusionskoeffizienten D beinhaltet, der nach der Einsteinschen Beziehung für Gase die Ionenbeweglichkeit, multipliziert mit der Boltzmann-Konstante, multipliziert mit der Ionentemperatur in Kelvin entspricht, d. h. $D = \mu k_{eV} T$ [cm²/s], wobei $k_{eV} = k_B/e$ [eV · K⁻¹] anstelle von k_B eingesetzt werden kann, so dass die Leitungsgleichungen nun lauten:

$$q - \alpha n_1 n_2 + D_1 d^2 n_1 / dx^2 - \mu_1 d(En_1) dx = 0, \quad (1)$$

$$q - \alpha n_1 n_2 + D_2 d^2 n_2 / dx^2 + \mu_2 d(En_2) dx = 0, \quad (2)$$

worin q der Ionisationsgrad, n die Anzahl der pro Sekunde und Kubikzentimeter ionisierten Ionenpaare und α die Rekombinationsrate sind, welche für H₂ etwa $1,4 \times 10^{-6}$ cm³/s und für Luft $1,6 \times 10^{-6}$ cm³/s beträgt.

$$i = e[(n_1 \mu_1 + n_2 \mu_1)E + (D_2 dn_2 / dx - D_1 dn_1 / dx)] \quad (3)$$

Darrow stellt in Kapitel V über die „Elementare Theorie der Drift“ auf Seite 193 in Gleichung 66, die hier als (4) wiedergegeben ist, fest, dass bei $n_1 \approx n_2$ gilt:

Indem man n_1 und n_2 gleichsetzt und jedes von ihnen mit n bezeichnet, erhält man:

$$i/e = n(\mu_1 + \mu_2)E + (D_2 - D_1) dn / dx, \quad (4)$$

eine Gleichung, die sich leicht integrieren lässt, wenn die Mobilitäten und die Diffusionskoeffizienten als unabhängig von x angenommen werden. **Besonders interessant daran ist, dass E und i nicht notwendigerweise zusammen verschwinden.** [Hervorhebung hinzugefügt]

Mit Darrows Gleichung (4) lassen sich nun die überraschenden Schlussfolgerungen erklären, die sich aus den experimentellen LEC-Ergebnissen ziehen lassen, wie sie in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt sind. Im Fall von Abbildung 5 ging die Stromstärke auf null, als sich die angelegte Prüfspannung dem Nullpunkt genähert hat, da es aufgrund der Ionendiffusion und des daraus resultierenden Konzentrationsgefälles bei den Ionen in der LEC-Zelle zu einem Stromfluss gekommen ist, dessen Richtung dem des angelegten Stroms entgegengesetzt ist. Im Fall von Abbildung 6, also der Extrapolation des Stromes gegen null, geht der Strom in der Zelle tatsächlich gegen null, sobald man die Zelle mit einem hohen Widerstandswert, beispielsweise mit einem DVM, verbindet.

Nach Auffassung von Darrow kann dieses Ergebnis wie folgt interpretiert werden: [Hervorhebung hinzugefügt]

Gehen wir einmal davon aus, dass die Ionen beider Vorzeichen in einem Gas zwischen zwei Wänden gleichmäßig verteilt sind – und mit „gleichmäßig“ meine ich, dass die Konzentrationen beider Arten an allen Stellen jeweils den gleichen Wert aufweisen, auch wenn dieser gemeinsame Wert von Ort zu Ort variiert – und dass es sich hierbei um einen stationären Zustand handelt. **Dann muss es ionisierende Strahlen geben, die ständig auf das Gas einwirken, und zwischen den beiden Wänden muss darüber hinaus eine Potenzialdifferenz bestehen.** Würde nämlich kein Feld existieren, dann würden sich die negativen Ladungen entlang des Konzentrationsgefälles schneller ausbreiten als die positiven

– es gäbe einen Nettostrom. Dies würde wiederum zu einer Verarmung der negativen Ladungen führen, und es entstünde im Gas ein Überschuss an positiven Ladungen – was der ursprünglichen Annahme widersprechen würde. Nehmen wir aber an, dass zwischen den Wänden eine P. D. (Potenzialdifferenz) in dem Sinne besteht, dass sie den negativen Ladungen entgegenwirkt und die positiven Ladungen mit sich nach vorne zieht, während sie das Gefälle gemeinsam hinabfließen. Für diese Potenzialdifferenz ließe sich ein Wert finden, der so beschaffen ist, dass deren Feldstärke die negativen Ladungen verlangsamt und die positiven gerade so weit antreibt, dass der vorgenannte Nettostrom aufgehoben wird;

Bei dieser Potenzialdifferenz handelt es sich um genau jene Spannung, welche mit Hilfe des DVM gemessen wird, und so erklärt sich das „eigentümliche“ Verhalten eines LEC, einschließlich des Anstiegs der LEC-Spannung aus der Einstein-Gleichung für Gase, wonach der Diffusionskoeffizient $D = \mu k_B T$ mit der Temperatur steigt. Möglicherweise trägt auch die unterschiedliche Austrittsarbeit der Elektroden zur Potenzialdifferenz bei, auch wenn für diese - wie Darrow gezeigt hat - keine Notwendigkeit besteht. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Gas in einem LEC Ionen enthalten muss, da es Elektrizität leitet; dass ungefähr gleich viele positive wie negative Ionen vorhanden sind, da die Leitfähigkeit der Zelle im Falle einer Umkehrung der Polarität des angelegten Potenzials im Wesentlichen unverändert bleibt; und dass unter den Ionen ein Konzentrationsgefälle vorhanden sein muss, da die Zelle einen Strom erzeugt, wenn sich das elektrische Feld E gegen null bewegt, während der Lastwiderstand R_L gegen null geht.

Die Aufnahme des Drift-Terms in die Leitungsgleichung durch Darrow erklärt also die „eigentümlichen“ I-U-Kennlinien, wie sie im Experiment beobachtet wurden, und weist auch darauf hin, dass es sich bei der Diffusion um einen jener Prozesse handelt, die sich in einem LEC ereignen. Offen bleibt allerdings die Frage nach der Ursache der spontanen ionisierenden Strahlung oder warum die Ionendichte in der Zelle ungleichmäßig erscheint. Eine mögliche Erklärung für Letzteres besteht darin, dass von der WE eine ionisierende Strahlung ausgeht, die an der CE zur Entstehung von energiereichen Photoelektronen führt, die wiederum zur Ionisation des Gases in unmittelbarer Nähe der CE führen, was dann zur Bildung eines Konzentrationsgefälles unter den Ionen führt.

Die vorstehende Analyse stößt an bestimmte Grenzen, da die mit Gleichung (4) verbundene Annahme, wonach $n_1 = n_2 = n$ gilt, voraussetzt, dass keine Raumladung vorhanden ist. Dies würde bedeuten, dass das elektrische Feld E durch die Beziehungen $E(x) = V/L$ für eine planparallele Geometrie oder $E(r) = V/[rln(b/a)]$ für eine zylindrische Geometrie beschrieben wird, für die $a \leq r \leq b$ gilt, wobei V die Potenzialdifferenz zwischen den Elektroden, L ihr Abstand für eine planparallele Geometrie sowie a und b der Innen- bzw. Außenradius der Elektroden für eine zylindrische Geometrie der Elektroden sind.

Darrow schreibt dazu:

Natürlich würde die Raumladung keine Rolle spielen, wenn die Werte für n_1 und n_2 gleich wären; doch dies stellt eine Bedingung dar, der man sich angesichts der unterschiedlichen Beweglichkeit beider Ionenarten nur schwer nähern kann – denn es ist leicht einzusehen, dass bei einer Erzeugung von Ladungsträgern beider Vorzeichen mit gleicher Geschwindigkeit und bei einer schnelleren Drift der negativen Ionen gegenüber den positiven Ionen zwischen den Platten zu jedem Zeitpunkt weniger negative als positive Ionen vorzufinden wären. Gleichwohl ist es aufschlussreich, die Gleichungen in einer Weise zu vereinfachen, wie dies zulässig wäre, wenn n_1 und n_2 annähernd die gleichen Werte aufweisen würden.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass es durchaus sinnvoll sein kann, sich in dieser Weise zu nähern, da die Berechnung des strahlungsinduzierten Stroms I_{rad} von dem Term (i/e) dominiert wird, wobei $i = (I/S_m)$ ist, der in SI- oder CGS-Einheiten $\sim 6,2415 \times 10^{18}$ (I/Sm) beträgt, wobei I_{rad} für den Kurzschlussstrom der Zelle steht, welcher typischerweise etwa 10^{-6} A beträgt, und S_m die Querschnittsfläche nahe der Leitungsmitte bezeichnet, für welche $d^2 E(x)/dx^2 = 0$ gilt. L. B. Loeb^[18] bezieht all das Wissen mit ein, das sich bis einschließlich des Zweiten Weltkrieges angesammelt hat, und empfiehlt eine „.... Verjüngung des Studiengebietes, das früher einmal als *The Discharge of Electricity in Gases* bezeichnet wurde und jetzt richtiger *Gaselektronik* heißen sollte“. Von besonderer Bedeutung für das Verständnis der Leistung eines LEC war die Entwicklung von Ionisationskammern^[26]. Eine Ionisationskammer (wie z. B. ein Gerdien-Kondensator^[27], der so konstruiert ist, dass er die Anzahl der im Gas enthaltenen Ionen misst, während es durch das Gerät fließt) misst den Sättigungsstrom, der

durch den Strahlungsfluss eines festgelegten Gasvolumens erzeugt wird, wenn dieses einer ionisierenden Strahlung ausgesetzt wird. Rossi und Staub^[26] haben die Dichte positiver und negativer Ionen berechnet, und zwar sowohl für den Fall, dass die Rekombination und die Diffusion vernachlässigt werden, als auch für den Fall, dass sie miteinbezogen werden. Eine bestimmte Bauart von Ionisationskammern, genauer gesagt eine Ionisationskammer vom Typ re-entrant (oder 4π), ähnelt einem LEC dahingehend, dass sich die zu messende Strahlungsquelle im Inneren einer Kammer befindet, so wie sich auch die WE eines LEC im Inneren des Gerätes befindet. Damit ist die Frage nach der Verteilung des elektrischen Feldes innerhalb des Gases von Bedeutung, wobei moderne Computer inzwischen in der Lage sind, das durch die Raumladung hervorgerufene Feld numerisch zu analysieren. In mehreren Veröffentlichungen^{[28][29][30][31]} werden die jüngsten Resultate für planparallele, zylindrische und kugelförmige Elektrodengeometrien beschrieben. Auch sie vernachlässigen die Diffusionsterme, eignen sich aber bestens zur Vorhersage des Shunt-Terms. Allerdings liefert auch diese Analyse keine Vorhersage hinsichtlich der I-U-Eigenschaften der experimentellen LEC-Messungen, welche darauf hindeuten, dass die LEC-Resultate auf die Diffusion der Ionen innerhalb des Gases zurückzuführen sind.

4.2. Eine Einschätzung zur Leistung der LEC-Zelle

Die Leistungsbewertung einer LEC-Zelle hängt davon ab, ob es sich bei den Messungen um einen externen spannungsinduzierten oder um einen spontanen Stromfluss handelt. Im Falle des spannungsinduzierten Stromflusses beginnt man mit der Messung der I-U-Kennlinie der Zelle unter Verwendung der in Abbildung 2 dargestellten Instrumentenkonfiguration für eine Reihe verschiedener Versorgungsspannungen. Ein typischer Wert für den Kathodenwiderstand R_{cat} beträgt $10 \text{ k}\Omega$ und ein typischer Wert für den Strombegrenzungswiderstand der Versorgungsspannung R_{sup} beträgt $1 \text{ M}\Omega$. Dieses Verhältnis der beiden Widerstände stellt sicher, dass die maximale Spannung, die dem Messsystem zugeführt wird, auf 10 Volt und die maximale Stromstärke auf 1 Mikroampere begrenzt sind. Der durch die Zelle fließende Strom beträgt I_{cell} und die Spannung über der Zelle V_{cell} beträgt $V_{cell} = V_{anode} - V_{cathode}$. Als Anode kann bei der Zelle entweder die Arbeitselektrode (WE) oder die Gegenelektrode (CE) zum Zuge kommen.

Eine erste Leistungsabschätzung lässt für die Zelle vornehmen, indem man von einer planparallelen Elektrodengeometrie mit einem Abstand L ausgeht und des Weiteren voraussetzt, dass im Gas keinerlei Raumladung vorhanden ist. Dann beträgt das elektrische Feld $E = V_{cell}/L$ und die Stromdichte $i = I_{cell}/S$, wobei S die Querschnittsfläche des Leitungsweges zwischen den Elektroden angibt. Die Dichte der positiven Ionen n_1 und der negativen Ionen n_2 sei jeweils gleich $n(x)$ als Funktion der Position, wobei x von der Anode aus gemessen wird. Diese Annahme kommt der Annahme gleich, wonach es sich bei dem ionisierten Gas um ein Ionen-Ionen-Plasma handelt. Es gelte $U = (\mu_1 + \mu_2)$, wobei μ_1 die Mobilität der positiven Ionen und μ_2 die Mobilität der negativen Ionen mit $\mu_2 > \mu_1$ bezeichnet. Es gelte $U_{21} = (\mu_2 - \mu_1)$ und die Boltzmann-Konstante betrage $k_{eV} \approx 8,6173 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$, so dass die Differenz der Diffusionskoeffizienten $D_2 - D_1 = U_{21} k_{eV} T$ beträgt. Dann lässt sich Gleichung (4) wie folgt umschreiben:

$$i/e = Un(x)E + U_{21}k_{eV}Tn'(x) \quad (5)$$

mit der Lösung

$$n(x) = (i/e)/UE + C_{exp}(-UE_x/U_{21}k_{eV}T), \quad (6)$$

worin C eine Integrationskonstante, T die Temperatur der Zelle in Kelvin, $1/e \approx 6,2415 \times 10^{18} \text{ A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ der Kehrwert der Elementarladung $e := 1,602176634 \text{ A} \cdot \text{s}$ und $dn(x)/dx = n'(x)$ sind.

Ein Schätzwert für die Größe des Verhältnisses zwischen der Anzahl der Ionen an der Kathode und jener an der Anode lässt sich durch Lösen der Gleichung (5) ermitteln, wenn $i \approx 0$. Nach der Integration ist $\ln(n_L/n_0) = -Un(L)V|_{I \approx 0}/U_{21}$, so dass, wenn $V|_{I \approx 0} > 0$, wie in Abbildung 5 zu sehen,

$\ln(n_L/n_0) < 0$ und $0 < n_L/n_0 < 1$ gilt und die maximale Ionendichte an der Anode auftritt, welche für die Pd-D-Zelle in Abbildung 2 die CE darstellt. Ist außerdem $x = 0$, so ergibt sich für die Konstante C die Beziehung $C = n(0)|_{I \approx 0} = n_0$.

Für den Fall eines spontanen Stromflusses im LEC wird nur die LEC-Spannung $V_{LEC}(R, T)$ als Funktion des effektiven Lastwiderstandes $R = R_{Load}R_{DVM}/(R_{Load} + R_{DVM})$ gemessen und I_{Load} mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes als $I_{Load} = V_{LEC}/R$ berechnet. Aus der phänomenologischen Beschreibung eines LEC gemäß Abbildung 11 ergibt sich $I_{Load} = I_{Radiation} - i_{Shunt}$. Da es sich bei i_{Shunt} um den internen Strom durch das Gas handelt, welcher durch die Ionendrift aufgrund des elektrischen Feldes $E(x)$ verursacht wird, lässt sich i_{Shunt} als $neUE(x)$ abschätzen. Ein allgemeiner analytischer Ausdruck für das elektrische Feld ist nicht bekannt. Wie von Thomson^{[10][12]} sowie von Thomson und Thomson^[13] nachgewiesen wurde, ist $n_1 \approx n_2 \approx n$ jedoch nur dann korrekt, wenn $dE \approx 0$ ist, was abseits der Elektroden der Fall ist. Bei einem LEC mit zylindrischer Elektrodengeometrie und einem engen Elektrodenabstand trifft die Näherung $dE/dx \approx d(rE)/dr = 0$ möglicherweise nicht zu. Daher müssen $E(x) \neq V_{LEC}/L$ und $i_{Radiation}$ zunächst geschätzt werden, da $i_{Shunt} = i_{Radiation} - i_{Load}$.

Da die Driftgeschwindigkeiten der Ionen $|v_1(x)| = \mu_1 E(x)$ beziehungsweise $|v_2(x)| = \mu_2 E(x)$ betragen, verringern sich bei einer Reduzierung von R auch V_{LEC} und $E(x)$, was wiederum zu einer Abnahme der Driftgeschwindigkeit führt. Dies bewirkt seinerseits eine Verlängerung der Zeit, in der sich die positiven und negativen Ionen rekombinieren müssen und somit nicht mehr zur Leitfähigkeit der Zelle beitragen. Abbildung 9 zeigt dies als die Abnahme der gemessenen $I_{Radiation}(R, T)$ bei kleinem R . Beachten Sie, dass $I(R, T)$ bei kleinem R variiert – wählen Sie also seinen Maximalwert I_{max} . Nehmen wir an, dass keine Raumladung vorhanden ist, d. h. nach dem Gaußschen Gesetz ist $\operatorname{div} E(x) = \rho/\varepsilon = e(n_1 - n_2)/\varepsilon = 0$, wobei E das elektrische Feld, ε die Dielektrizitätskonstante des Gases und ρ die Volumenladungsdichte bzw. Ladung pro Volumeneinheit sind. Bezuglich $i_{Radiation}$ wird die linke Seite von Gleichung (4) wie folgt umgeschrieben:

$$(i_{Radiation}/e) = (I_{max} + \text{epsilon}) / Se = n_{Average}, \quad (7)$$

wobei in CGS-Einheiten mit $6,2415 \times 10^{18} \approx 1/e$, $e := 1,602176634 \times 10^{-19} A \cdot As$ (As steht für Amperesekunde) die Elementarladung und I_{max} [A] den gemessenen Laststrom der LEC-Zelle bei $V_{LEC} [V] \approx 0$ bezeichnen, epsilon für eine kleine Zahl steht, $S [\text{cm}^2]$ für die Querschnittsfläche der Leitungsbahn und $n [\text{jp} \cdot \text{cm}^{-3}]$ für die gemittelte Ionenpaardichte $n_{Average} = \int_0^L n(x)dx/L$.^[32] Was die Geometrie anbelangt, so wird von planparallelen Elektroden ausgegangen, da sich diese letzte Annahme durch eine Änderung der Variablen^[33] korrigieren lässt und normalerweise auch ohne Korrektur nur einen geringfügigen Fehler bewirkt.

Die interne Stromdichte des Nebenschlusswiderstandes der Zelle $i_{shunt}(R)$ lässt sich ermitteln, indem man $i_{load}(R)$ von $i_{rad} = I_{max}/S$ subtrahiert, nachdem zuvor eine kleine Zahl epsilon zu i_{rad} addiert wurde, um eine semilogarithmische Darstellung von $i_{shunt}(R)$ in Abhängigkeit von R erstellen zu können, ohne auf einen Nullwert von $i_{shunt}(R)$ zu gelangen. Eine Abschätzung des Fehlers, wie er sich aus der Annahme einer nicht vorhandenen Raumladung ergibt, lässt sich durch Berechnung eines hypothetischen $i_{hypot}(R) = n_{hypot} \cdot U \cdot V_{LEC}(R)$ unter Variation von n_{hypot} bis hin zur Überlagerung mit $i_{shunt}(R)$ erreichen. Dies wird in Abbildung 13 gezeigt. Dass die Ionendichte $n \neq n_{hypot}$ in beiden Berechnungen unterschiedlich ausfällt, resultiert aus den Feststellungen von Thomson^[12] und Mie^[22], wonach bei einer Raumladung $E \neq V/L$.

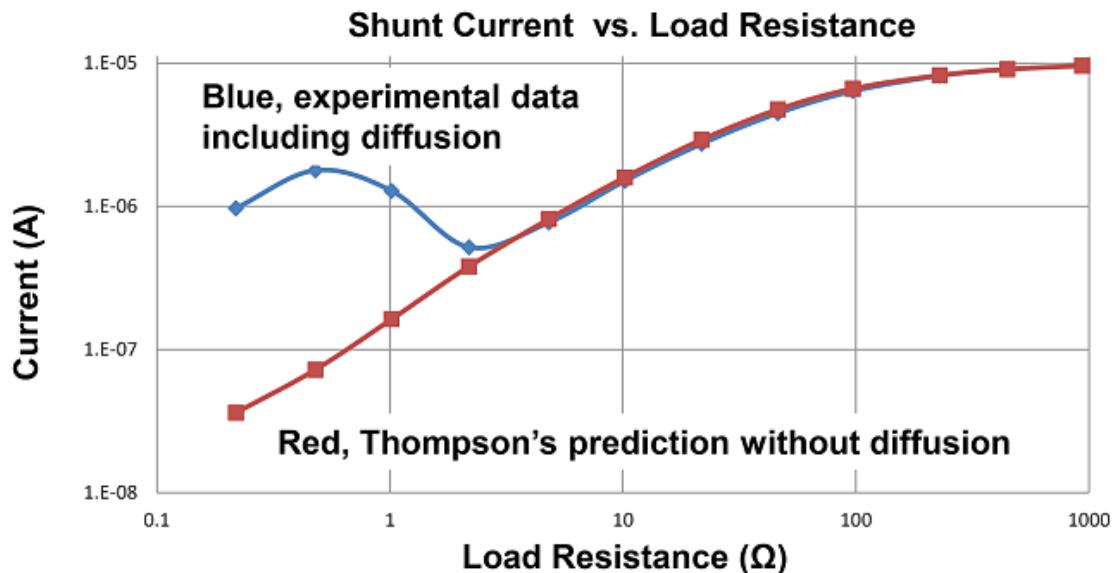


Abbildung 13. Darstellung des von Thompson (rot) vorhergesagten Nebenschlussstroms, der die Diffusionsterme nicht berücksichtigt, und der experimentellen Daten, bei denen die Diffusion berücksichtigt ist.

Die bei der Temperatur T an den effektiven Lastwiderstand $R = R_{Load}R_{DVM} / (R_{Load} + R_{DVM})$ abgegebene Leistung $P(R, T)$ des LEC beträgt somit $P(R, T) = V_{LEC}^2 / R$. Abbildung 10 veranschaulicht dieses Verhalten im Experiment, wobei der Wert der maximalen Leistung bei einem mittleren Wert des Lastwiderstandes eintritt.

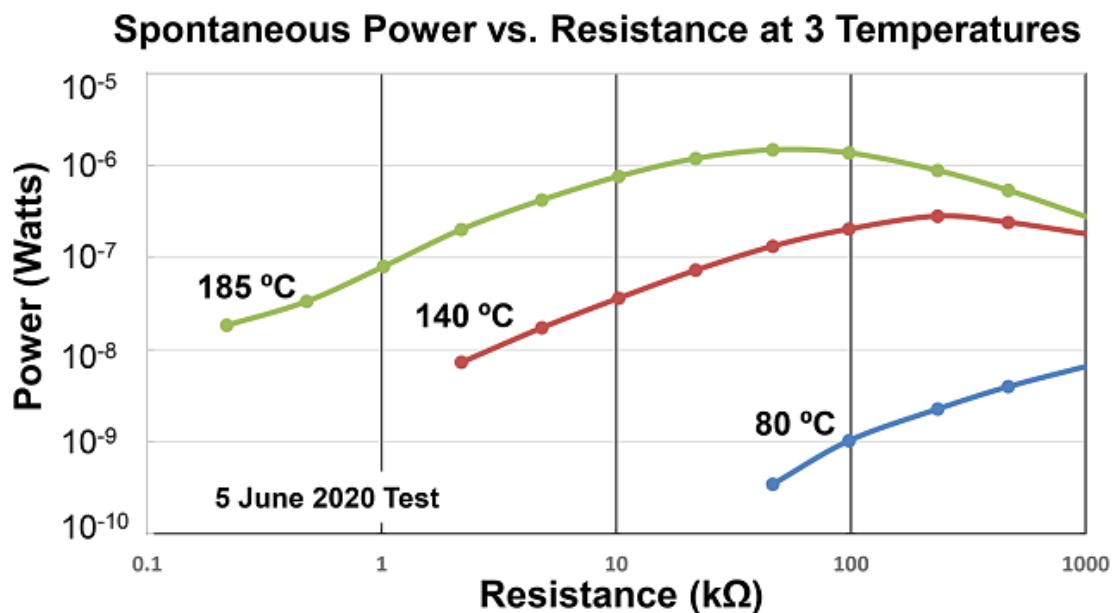


Abbildung 10. Darstellung der Lastleistung der LEC-Zelle als Funktion des Lastwiderstandes bei den drei Temperaturen der Zelle aus Abbildung 9.

5. Betrachtungen zur Leistungsfähigkeit des LEC

Obwohl sowohl der Ursprung der Strahlung im LEC als auch deren Beschaffenheit, durch die das Gas ionisiert und die gemessene spontane Spannung als auch der Strom verursacht werden, nicht bekannt sind, lassen sich bestimmte Feststellungen über die Leistung eines LEC treffen. Zu diesen Feststellungen bezüglich der Leistungsfähigkeit eines LEC gehören:

- Eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für einen dauerhaften LEC-Betrieb besteht darin, dass die Arbeitselektrode zum Teil aus einem wasserstoffumschlossenen Wirtsmaterial besteht, welches sich in fluidem Kontakt mit einem wasserstoffhaltigen Gas befindet.

- b. Es hat sich gezeigt, dass Gitterleerstellen im Wirtsmaterial des Wasserstoffs ebenso wie überreichlich vorhandene Leerstellen und sonstige Defekte, wie sie bei der Ko-Abscheidung von Pd oder Fe aus einer wässrigen Lösung entstehen, seitens der aktiven Arbeitselektrode zu ionisierender Strahlung führen.
- c. Eine notwendige Bedingung besteht darin, dass das Gas zum Teil aus Wasserstoff oder seinem nichtradioaktiven Isotop Deuterium besteht, obwohl beobachtet werden konnte, dass eine anhaltende Leitfähigkeit auf niedrigem Niveau auch in der Luft vorhanden ist, was darauf hindeutet, dass die Menge an Wasserstoff nicht unbedingt groß sein muss.
- d. Das Umklemmen der Elektroden gegenüber der Darstellung in Abbildung 2 mit dem Ziel, die Polarität des elektrischen Potenzials umzukehren, beispielsweise durch den Anschluss der Hochspannungsversorgung an die Arbeitselektrode und den Anschluss des Lastwiderstandes an die Gegenelektrode, führt zwar zu einem vorübergehenden Anstieg der Leitfähigkeit, nicht jedoch zu einer nennenswerten Änderung bei der langfristigen Leitfähigkeit im stationären Zustand.
- e. Experimente zur spannungsinduzierten Leitfähigkeit unter Verwendung von Deuteriumgas bei $T \approx -55^\circ\text{C}$ haben gezeigt, dass Ionen im Gas, die auf die relative Luftfeuchtigkeit zurückzuführen sind, nicht als Ursache für die Leitfähigkeit in Frage kommen, da es sich bei dieser Temperatur um eine völlig vernachlässigbare Anzahl von Wasserionen (D₂O) handelt.
- f. Eine Koronaentladung kann nicht für die Leitfähigkeit verantwortlich sein, da sowohl das elektrische Feld, das durch die spontane Spannung hervorgerufen wird, zu gering ist, um eine Koronaentladung auszulösen^[25], als auch die Gasdrücke, typischerweise $\sim 500 \text{ Torr}$ bis $\sim 3 \text{ bar}$, zu groß sind, um eine Entladung stattfinden zu lassen.
- g. Die thermische Ionisierung des Gases kann nicht für die Leitfähigkeit im LEC verantwortlich sein, da sowohl die berichteten Daten^[34] als auch die Gleichung von Saha^[35] zeigen, dass hierfür Temperaturen von mehr als etwa 2000 K erforderlich wären.
- h. Die natürliche ionisierende Strahlung, wie sie von der kosmischen Strahlung, von der Umwelt oder von der geringen Menge an radioaktiven Isotopen im Wirtsmaterial des Wasserstoffs oder auch vom Tritium im Wasserstoffgas ausgeht, kann nicht die Ursache für die Ionisierung des Gases sein, da ein Experiment, bei dem die Arbeitselektrode blank war, aber etwa 6 μCi (~90 % α und ~10 % γ) an Strahlung aufwies, zu keiner messbaren Leitfähigkeit infolge der von den α -Teilchen erzeugten Ionen oder aufgrund des photoelektrischen Effektes durch die von der WE erzeugte γ -Strahlung geführt hat.
- i. Auch nach umfangreichen Tests waren Rout und Kollegen^[36] nicht in der Lage, die spezifische Ionisierung zu identifizieren, die den Film vernebelt hat, und schlugen schließlich vor, „dass eine neue, unbekannte, vom beladenen Palladium emittierte Substanz für die Vernebelung verantwortlich ist“.

Zu den möglichen physikalischen Mechanismen, die zu der anfänglichen ionisierenden Strahlung an der Arbeitselektrode führen könnten, gehören:

- eine thermisch induzierte Vibration des Gitters des Wirtsmaterials des Wasserstoffs, verstärkt durch eine nichtlineare Wellenvermischung in Verbindung mit der Anwesenheit von Wasserstoff, welcher in den Gitterleerstellen nahe der Oberfläche des Wirtsmaterials des Wasserstoffs eingeschlossen ist;
- eine thermisch induzierte Wechselwirkung zwischen mehreren in einer Leerstelle eingeschlossenen Wasserstoffatomen, insbesondere bei unterschiedlicher Kernspinausrichtung, oder zwischen einem in einer Leerstelle eingeschlossenen Wasserstoffatom und einem Atom des Wirtsmaterials des Wasserstoffs.

6. Schlussfolgerungen

Es wurde eine Reihe von LEC-Geräten gebaut, darunter auch eigenständige Nachbauten, bei denen es zu einer spontanen Erzeugung von Spannung und Strom kommt. Obwohl die Messungen lediglich die Spannung als eine Funktion der Zeit und der Temperatur umfassen, welche über verschiedene Lastwiderstände hervorgerufen wird, lassen sich aus einer erweiterten mathematischen Analyse der Messungen folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Der von einem LEC erzeugte Spontanstrom ist im Wesentlichen konstant und in erster Linie auf die Diffusion von Ionen zurückzuführen. Dieser diffusionsinduzierte Strom lässt sich messen, indem die Spannung des LEC durch einen Lastwiderstand in der Zelle auf ein Minimum reduziert wird. Die entsprechende Ionenkonzentration lässt sich mit Hilfe eines Tests zur induzierten Leitfähigkeit und durch die Bestimmung jener Spannung abschätzen, bei der der induzierte Strom gegen null geht, so wie in Abbildung 5 dargestellt.

- b. Aus der Theorie zur Stromleitung durch Gase ist bekannt, dass das Gas in Abwesenheit von emittierten Teilchen, z. B. Teilchen aus dem radioaktiven Zerfall, thermischen Elektronen oder durch photoelektrische Effekte erzeugten Elektronen, ionisiert werden muss und dass sich die mittlere Ionisierungsdichte berechnen lässt. Diese historische Theorie kann auch zur Schätzung des Nebenschlussstroms in der Zelle verwendet werden, welcher auf die ionenbeweglichkeit und das elektrische Feld zurückzuführen ist, und lässt sich auf der Grundlage der gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien (I-U) als eine Funktion der Temperatur schätzen, so wie in Abbildung 9 dargestellt.
- c. Für einen Pd-H-LEC wurden bei 185 °C mittels experimenteller Messungen Ionen-Durchschnittsdichten von mehr als 10^{10} Ionenpaaren (ip) pro Kubikzentimeter ermittelt.
- d. Bei konstanter Temperatur nimmt die Stärke des spontanen Stroms, der in einen angeschlossenen Lastwiderstand abfließt, auf Grund eines Spannungsanstieges bei zunehmendem Lastwiderstand zeitgleich mit dem Nebenschlussstrom zu. Die maximale Leistung, die von einem LEC bezogen werden kann, tritt also bei einem mittleren Widerstandswert auf, wie in Abbildung 10 dargestellt.

Danksagungen

Die Autoren möchten sich bei Prof. J. P. Biberian und Andrew Erickson für deren Replikationen des LEC bedanken, sowie bei Pamela und Roger Boss, Robert Means und dem Gutachter des JCMNS für ihre Bewertungen und Kommentare. Und wir danken den Organisatoren der französischen RNBE-Konferenz 2020 sowie des indischen Workshops 2021 zu Ehren von Dr. Srinivasan, auf denen diese Ergebnisse präsentiert werden konnten. Die Autoren möchten hiermit auch die von zahlreichen Wissenschaftlern veröffentlichten Forschungsarbeiten würdigen, die die Grundlage für die vorliegende Analyse des LEC bilden.

Referenzen

1. H. Sainte-Claire Deville, L. Troost, *Sur la Perméabilité du Fer à Haute Température*, [On the Permeability of Iron at High Temperature], *Comptes rendus*, 57 (1863) 965-967.
2. Y. Fukai, *The Metal-Hydrogen System*, Second Edition, (Springer, 2005).
3. F. A. Lewis, *The Palladium Hydrogen System*, (Academic Press, 1967).
4. F. A. Lewis, *The Palladium Hydrogen System*, *Platinum Metals Rev.* 26(1) (1982) 20-27, Also available at <https://gsvit.files.wordpress.com/2014/01/platinum-metals-the-palladium-hydrogen-system.pdf>
5. T. Graham, *On the Occlusion of Hydrogen Gas by Metals*, *Proc. Roy. Soc.*, 15 (1868) 422-427.
6. H. Mehrer, *Diffusion in Solids*, (Springer, 2007).
7. J. P. Biberian in private communication with F. E. Gordon and also in his presentation at the French RNBE 2020 Conference, 21 November 2020.
8. J. J. Thomson, E. Rutherford, XL. On the Passage of Electricity through Gases exposed to Röntgen Rays, *Phil. Mag.* S5 42 (1896) 392-407.
9. J. J. Thomson, *The Discharge of Electricity Through Gases*. (Archibald Constable & Co., Westminster, UK, 1898), reprinted (Charles Scribner's Sons, New York, 1903).
10. J. J. Thomson, XIX. On the theory of the conduction of electricity through gases by charged ions, *Phil. Mag.* S5 47:286 (1899) 253-268. Also available from <https://zenodo.org/record/2226317>
11. J. J. Thomson, *Conduction of Electricity Through Gases*, (Cambridge at the University Press, 1903).
12. J. J. Thomson, *Conduction of Electricity Through Gases*, (Cambridge at the University Press, 1906), Also available from books.google.com.py/books?printsec=frontcover&dq=editions:ISBN117762950X&id=_8RzAAAAIAAJ
13. J. J. Thomson, G.P. Thomson, *Conduction of Electricity Through Gases*, 3rd edn. Vol. I, *General Properties of Ions, Ionization by Heat and Light*, (Cambridge at the University Press, UK, 1928).
14. J. J. Thomson, *Conduction of Electricity Through Gases*, 3rd edn. Vol. II, *Ionization by Collision and the Gaseous Discharge*, (Cambridge at the University Press, UK, 1933).
15. J. S. E. Townsend, *Electricity in Gases*, Chapter III, (Oxford at the Clarendon Press, UK, 1915).
16. K. K. Darrow, *Electrical Phenomena in Gases*, (The Williams&Wilkins Co. Baltimore, MD, 1932). Also available on line at Google Books.
17. L. B. Loeb, *Fundamental Processes of Electrical Discharges in Gases*, (John Wiley & Sons, 1939).

18. L. B. Loeb, Basic Processes of Gaseous Electronics, (University of California Press, 1960).
19. H. R. Carlon, „Electrical Conductivity and Infrared Radiometry of Steam“, US Army Armament Research and Development Command, ARCSL-SP-80006, Apr 1980.
20. O. Vekilova, D. I. Bazhanov, S. Simak, I. Abrikosov, First-principles study of the vacancy-hydrogen interaction in Pd, Phys. Rev. B 80(2) (2009) 24101. Also available from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:se:liu:diva-1989048> F. E. Gordon and H. J. Whitehouse / Journal of Condensed Matter Nuclear Science 35 (2022) 30-48
21. E. Riecke, Über näherungsweise gesättigte Ströme zwischen planparallelen Platten [About approximately saturated currents between plane-parallel plates], Nachrichten von der Gesellschaft Wissenschaften zu Göttingen [News from the Society of Sciences in Göttingen], Available at https://gdz.sub.uni-goettingen.de/id/PPN252457811_1903
22. G. Mie, Der elektrische Strom in ionisierter Luft in einem ebenen Kondensator [The electric current in ionized air in a plane capacitor], Annalen der Physik, Vierte Folge, Band 13 5 857-889 Also available from semanticscholar.org/paper/Der-elektrische-Strom-in-ionisierter-Luft-in-einem-Mie/303d7417bccc82df50c510294b659c325aaca920 click on the (pdf) zenodo.org link
23. R. Papoule, Electrical Phenomena in Gases, Chapter 10, (American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 1965), First published in France in 1963 by (Dunod, Éditeur, under the title Les Phénomènes Électriques dans les Gaz, 1963)
24. J. J. Thomson, III Electric Conduction through Gases, Encyclopædia Britannica, Vol 6, 1911.
25. F. W. Peek Jr, Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering, (McGraw-Hill 1929).
26. B. B. Rossi, H.H. Staub, Ionization Chambers and Counters, McGraw-Hill Book Co. 1949).
27. H. Gerdien, Ein neuer Apparat zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Luft [A new device for measuring the conductivity of air] (1905) Göttingen, K. Nachr. Ges. Wiss. Mathem. physik. Kl. 1905.
28. D. Novković et al., Numerical solutions of differential equations of a cylindrical ionization chamber, Phys. Med. Bio. 41 (1996) p. 725.
29. D. Novković et al., Numerical solutions of differential equations of an ionization chamber: plane-parallel and spherical geometry, Phys. Med. Bio. 43 (1998) 559-575.
30. D. G. Stoyanov, Current-voltage characteristic of parallel-plane ionization chamber with inhomogeneous ionization, JINST 2 (2007) P08007. Also available at arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0706/0706.3913.pdf
31. D. G. Stoyanov, Analytical form of current-voltage characteristic of parallel-plane, cylindrical, and spherical ionization chambers with homogeneous ionization, JINST 2 (2007) P11006. Also available at <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0708/0708.0409.pdf>
32. W. Binks, Energy per Ion Pair, Acta Radiologica, 41:sup1 17 (1954) 85-104.
33. P. A. Tate, P. C. East, The Saturation Curve in Ionization Chambers, ReportNo. 355, DefenceResearchChemical Laboratories, (1961) Ottawa Canada.
34. J. M. Yos, Transport Properties of Nitrogen, Hydrogen, Oxygen, and Air to 30,000 °K, Technical Memorandum RA-TM-63-7 (AD-435053) 22 Mar 1963 Also available at <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0435053.pdf>
35. D. J. Jeffery, An Educational Note on the Saha Equation and its Solution for the Ionization State of a Gas, Available at http://www.physics.unlv.edu/~jeffery/astro/educational_notes/100_saha.pdf Also see Anonymous, <https://www.astro.princeton.edu/~gk/A403/ioniz.pdf>
36. R. K. Rout, et al., Reproducible, anomalous emissions from palladium deuteride/hydride. Fusion Technol., 1996. 30: p. 273

Abgerufen von „https://lenr.wiki/index.php?title=Der_Gitterenergiekonverter&oldid=6431“

Diese Seite wurde zuletzt am 28. Dezember 2023 um 16:52 Uhr bearbeitet.