



Sparkling Science >  
Wissenschaft ruft Schule  
Schule ruft Wissenschaft

Katharina Werbach

**Zu den elektrischen Eigenschaften von  
(La<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>)CoO<sub>3</sub> als Kathodenmaterial  
in der Hochtemperaturbrennstoffzelle**

Fachbereichsarbeit

betreut von

**Dr. Elisabeth Niel**

BRG Wien 13, Wenzgasse

**Univ.Prof. Dr. Jürgen Fleig**

Technische Universität Wien, Institut für  
Chemische Technologien und Analytik

BMWF Schriftenreihe  
Abschlussarbeiten von Schülerinnen/Schülern  
und Studierenden im Rahmen des Programms  
Sparkling Science  
Heft 11, Wien 2011

BMWF<sup>a</sup>

[www.bmwf.gv.at](http://www.bmwf.gv.at)  
[www.sparklingscience.at](http://www.sparklingscience.at)

Bundesministerium für Wissenschaft  
und Forschung

Diese Arbeit wurde im Schuljahr 2008/09 erstellt,  
verfasst im Rahmen des Forschungsprojektes  
**„Grüne Chemie“ – Nachhaltige Strategien  
in der Wissenschaft**

#### PROJEKTLEITENDE EINRICHTUNG

Technische Universität Wien, Institut  
für Angewandte Synthesechemie  
Projektleitung: ao. Univ.Prof. DI Dr. Marko D. Mihovilovic  
Kontakt: mmihovil@pop.tuwien.ac.at

#### BETEILIGTE SCHULEN

BG/BRG St. Veit an der Glan, Kärnten  
BRG Feldkirchen, Kärnten  
BG/BRG Villach, Kärnten  
BG/BRG Tulln a.d. Donau, Niederösterreich  
GRG Sachsenbrunn, Niederösterreich  
HTL Dornbirn, Vorarlberg  
BG/BRG 11 Geringergasse, Wien  
BG/BRG 13 Wenzgasse, Wien  
GRG 11 Gottschalkgasse, Wien  
GRG 17 Parhamergymnasium, Wien  
BG/BRG 13 Fichtnergasse, Wien  
BRG 7 Kandlgasse, Wien  
HTL Rosensteingasse, Wien  
Wiedner Gymnasium, Wien  
TGM - Technologisches Gewerbemuseum, Wien



„Jede Reise beginnt mit dem ersten Schritt“ - Dies gilt ganz besonders auch für erfolgreiche Karrieren in Wissenschaft und Forschung. Dabei ist der erste Schritt oft der herausforderndste. Daher hat das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung (BWF) im Jahr 2007 ein unkonventionelles und in Europa einzigartiges Programm der wissenschaftlichen Nachwuchsförderung aus der Taufe gehoben: „Sparkling Science“ ermöglicht jungen Menschen bereits sehr früh hautnah Einblicke in die Welt der Wissenschaft und Forschung.

In den von „Sparkling Science“ geförderten Projekten sind Schülerinnen und Schüler als Juniorpartner in erfahrene Forschungsteams eingebunden. Sie arbeiten aktiv im Forschungsprozess mit und bringen eigene Fragestellungen, Denkanstöße und inhaltliche Beiträge ein. Die Schülerinnen und Schüler wirken an der Konzeption und Durchführung von Untersuchungen mit, führen Befragungen durch, erheben Daten, interpretieren diese gemeinsam mit den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und stellen die Ergebnisse an Schulen, Universitäten und sogar bei wissenschaftlichen Tagungen vor.

Diese Zusammenarbeit von Forschung und Schule bringt für beide Seiten einen großen Mehrwert: Die Wissenschaft profitiert, weil die Jugendlichen innovative Ideen und erfrischende Beiträge einbringen, die dann in neue wissenschaftliche Erkenntnisse einfließen. Die Jugendlichen wiederum bekommen einen

einzigartigen Zugang zu neuen wissenschaftlichen Fragestellungen und erwerben Kompetenzen in den Bereichen Teamarbeit, Projektplanung und Projektpräsentation. Sorgfältig und eigenverantwortlich an komplexen Themenstellungen zu arbeiten und sich dabei auch mutig in Neuland vorzuwagen, sind dabei nicht nur entscheidende Basiskompetenzen für wissenschaftliches Arbeiten, sondern auch Schlüsselfertigkeiten in sämtlichen Berufsfeldern der modernen Arbeitswelt.

Eine der wichtigsten Grundregeln wissenschaftlichen Arbeitens besteht darin, Forschungsergebnisse zu publizieren und damit für andere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bzw. die Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Mittlerweile liegen einige Publikationen in anerkannten wissenschaftlichen Fachzeitschriften vor, in denen an „Sparkling Science“-Projekten beteiligte Schülerinnen und Schüler als Co-Autorinnen und Co-Autoren vertreten sind.

Ein erster Schritt für das spätere erfolgreiche wissenschaftliche Publizieren sind mit Sicherheit die hier vorliegenden Abschlussarbeiten. Sie entstehen im Rahmen der Projekte von Schülerinnen, Schülern und Studierenden und bearbeiten eigenständig Teilbereiche des Forschungsprojektes. Und dies in beeindruckender Art und Weise. Das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung gibt daher eine eigene Publikationsreihe für jene Forschungsergebnisse heraus, die im Rahmen von Maturaprojekten sowie Bakkalaureats- und Masterarbeiten aus „Sparkling Science“ erarbeitet werden.

Ich gratuliere allen jungen Nachwuchsforscherinnen und Nachwuchsforschern zu diesen ersten Schritten und wünsche viel Freude und Erfolg auf dem weiteren Weg in Wissenschaft und Forschung.

Herzlich,

Dr. Karlheinz Töchterle  
Bundesminister für Wissenschaft und  
Forschung





Analytik an: Es werden die chemischen Prozesse untersucht, welche die Effizienz von Festoxidbrennstoffzellen limitieren, um mit diesem Wissen noch besser Chemie zu „green chemistry“ zu machen.

In diesem Umfeld wurde auch diese Arbeit verfasst, die zeigt, wie nahe sich nachhaltige Energieversorgung, Materialforschung und „green chemistry“ sind.

Univ.Prof. Dr. Jürgen Fleig  
Technische Universität Wien, Institut für  
Chemische Technologien und Analytik

Der Aufbau einer effektiven und nachhaltigen Energieversorgung ist eine der großen Herausforderungen unserer Zeit.

Entsprechend ist das Thema „Energie“ von zentraler Bedeutung in vielen Gebieten von Forschung und Technologie. Auch an der Technischen Universität Wien stellt es eines der Kernthemen, dem sich zahlreiche Forschungsaktivitäten widmen, dar.

Die Fragen reichen von effektiven und intelligenten Stromnetzen bis hin zur umweltschonenden Energieumwandlung von chemischer in elektrische Energie und damit zu einem Thema der „green chemistry“.

Eine zentrale Rolle bei der effizienten Energieumwandlung spielt die Elektrochemie. Sie ermöglicht es, ohne den Umweg über thermische und mechanische Energie, direkt zwischen chemischer und elektrischer Energie, sprich Strom, hin und her zu wechseln und dabei sehr hohe Wirkungsgrade zu erzielen. Entsprechend groß ist das Interesse an den zugehörigen Energiewandlern bzw. -speichern, den Brennstoffzellen und Batterien. Beide Systeme benötigen jedoch optimierte Materialien, um noch besser für stromerzeugende Heizungen, umweltfreundliche Autoantriebe oder in der mobilen Stromversorgung eingesetzt zu werden.

An dieser Stelle setzen die Forschungsaktivitäten des Bereichs Elektrochemie am Institut für Chemische Technologien und





Im Februar 2008 erfuhr ich von „Sparkling Science“, dem neuen Förderprogramm des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung. Durch eine neu gestaltete Zusammenarbeit von Universitäten mit Schulen soll bei Jugendlichen das Interesse an Naturwissenschaften und Technik gefördert werden.

Ein wesentlicher Bestandteil des Konzeptes von „Sparkling Science“ ist die praktische Mitarbeit von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II in universitären Arbeitsgruppen.

Im Chemieunterricht meiner Oberstufenklassen berichtete ich von der Möglichkeit, in den Sommerferien als Praktikant bzw. Praktikantin im Rahmen dieses Projektes mit Wissenschaftler/innen der Technischen Universität Wien zusammenzuarbeiten.

Begeistert interessierte sich meine Schülerin Katharina Werbach für die Mitarbeit im Projekt „Green Chemistry@Sparkling Science“.

Nach Vorgesprächen mit Prof. Marko Mihovilovic, dem Leiter des Projekts, konnte ein vierwöchiges Sommerpraktikum vereinbart werden.

Katharina Werbach wählte den Bereich der alternativen Energieträger und arbeitete in einem Forschungsteam am Institut für Chemische Technologien und Analytik in der Abteilung für Elektrochemie mit. Unter der

Leitung von Prof. Jürgen Fleig befasste sich diese Forschungsgruppe mit Materialien, die in Hochtemperaturbrennstoffzellen verwendet werden.

Während ihres Sommerpraktikums beschäftigte sich Katharina Werbach mit der Herstellung von Mikroelektroden und der Messung des elektrischen Widerstandes bei Wechselstrom. Diese Mikroelektroden wurden aus  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{CoO}_3$ , einem vielversprechenden Material für die Hochtemperaturbrennstoffzelle, gefertigt.

Mit Freude und großem Engagement beschrieb Katharina Werbach die selbst durchgeführten Experimente und Messungen in ihrer Fachbereichsarbeit „Zu den elektrischen Eigenschaften von  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{CoO}_3$  (LSC) als Kathodenmaterial in der Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC)“.

Ihre fachlich anspruchsvolle Arbeit wurde vom VCÖ, dem FCIO, der GÖCH und dem BMUKK prämiert.

Anlässlich der 13. Österreichischen Chemietage 2009 präsentierte Katharina Werbach an der Technischen Universität Wien ihre Forschungsarbeit der fachlichen Öffentlichkeit.

Meine Schülerin gewann durch ihre Mitarbeit in einer Forschungsgruppe der Technischen Universität Wien wertvolle Einblicke in die naturwissenschaftliche Forschung und unschätzbare Erfahrung. Sie entschied sich nach der Reifeprüfung für ein naturwissenschaftliches Studium.

Die Betreuung der Fachbereichsarbeit von Katharina Werbach und das Kennenlernen aktueller Forschungsarbeiten machten mir große Freude.

Dr. Elisabeth Niel  
BRG Wien 13, Wenzgasse





Fachbereichsarbeit im Fach Chemie

# Zu den elektrischen Eigenschaften von $(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x})\text{CoO}_3$ als Kathodenmaterial in der Hochtemperaturbrennstoffzelle

Verfasser: Katharina Werbach, 8A

Betreuer: Dr. Elisabeth Niel

GRG 13, 1130 Wien Wenzgasse 7

Schuljahr 2008/2009

# Inhalt

## Vorwort

### 1. Einleitung

1.1. Ziele der Arbeit

1.2. Über den Inhalt

### 2. Theorie

#### 2.1. Elektrochemische Elemente

2.1.1. Primäre Elemente

2.1.2. Sekundäre Elemente

2.1.3. Brennstoffzellen

2.1.3.1. Die PEM

2.1.3.2. Die SOFC

2.1.3.3. Funktion der SOFC

#### 2.2. Lanthan-Strontium-Kobaltat

2.2.1. Aufbau

2.2.1.1. Lösungen im festen Zustand

#### 2.3. Ionenleitung

2.3.1. Gründe für Ionenleitung

2.3.2.1. Punktdefekte

2.3.2.1.1. Intrinsische Defekte

2.3.2.1.2 Extrinsische Defekte

2.3.3. Temperaturabhängigkeit der Ionenleitfähigkeit

2.3.4. Reaktionsschritte an der LSC Elektrode

2.4.4. Widerstände

### 3. Durchführung

#### 3.1. Arbeitsvorschriften

3.1.1. Arbeitsvorschrift für die Herstellung von Perowskiten

3.1.2. Herstellung von Mikroelektroden durch Fotolithographie

#### 3.2. Durchführung

3.2.1. Herstellung von  $(\text{La}_{0,4};\text{Sr}_{0,6})\text{CoO}_3$

3.2.2. Herstellung des Targets

3.2.3. Herstellung der Mikroelektroden

3.2.3.1. Auftragen des LSC auf YSZ

3.2.3.2. Mikrostrukturieren

3.2.3.3. Gründe für die Verwendung von Mikroelektroden

3.2.4. Messung der Impedanz

## 4. Auswertung

4.1. Allgemeine Erläuterungen

4.2. Die Proben

4.2.1. Veränderung des Widerstandes mit der Zeit

4.2.1.1. JJ0339C

4.2.1.2. JJ044B

4.2.2. Veränderung des Widerstandes durch Ätzung

4.2.2.1. JJ022A

4.2.3. Einfluss der Herstellung

4.2.3.1. JJ031-JJ036

## 5. Resümee und Ausblick

5.1. Ausblick

5.2. Resümee

## 6. Quellenangaben

6.1. Literatur

6.2. Abbildungen



## Vorwort

Ich schreibe diese Fachbereichsarbeit über ein Thema, das ich im Zuge eines Praktikums an der Technischen Universität Wien kennen lernen durfte.

Dieses Praktikum fand im Rahmen eines Projektes statt, das vom Ministerium für Bildung, Unterricht und Kultur und von der Chemischen Fakultät der Technischen Universität Wien initiiert wurde.

Der Name des Projektes ist Green Chemistry@Sparkling Science und es richtet sich an naturwissenschaftlich interessierte SchülerInnen in den Oberstufen höher bildender Schulen. Es sollen besonders die Leistungen der Chemie im Sinne der Umwelterhaltung und des Umweltschutzes hervorgehoben werden, Inhalte also die normalerweise nicht mit Chemie verbunden werden.

Das Projekt fand August 2007 zum ersten Mal statt und wurde durch Chemielehrer an die Schüler weitervermittelt. Eine wesentliche Voraussetzung um an diesem Projekt teilnehmen zu können war, sich dazu bereitzuerklären eine Fachbereichsarbeit über ein behandeltes Thema zu verfassen.

Ich meldete mich für ein Projekt am Institut für Chemische Technologien und Analytik in der Abteilung für Elektrochemie an, das sich mit Materialien für Brennstoffzellen beschäftigt. Dieses Stoffgebiet der Chemie ist eng verbunden mit physikalischen Themen, was einer der Gründe für meine Wahl war. Auch dass eine Fachbereichsarbeit zu verfassen ist, um mitarbeiten zu können, war mir keineswegs unangenehm, da ich in jedem Fall eine Arbeit als Vorbereitung auf das Studium schreiben wollte.

Es war eine einmalige Erfahrung, da Wissen nicht aufbereitet an Schüler weitergegeben wurde, sondern Forschung sozusagen "hautnah" miterlebt werden konnte und ich würde mich jederzeit wieder für ein ähnliches Projekt melden.



# 1. Einleitung

## 1.1. Ziele dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, einen einführenden Überblick über Lanthan-Strontium-Kobaltat  $[(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x})\text{CoO}_3]$  zu bieten. Dabei soll insbesondere auf die elektrischen Eigenschaften des Stoffs eingegangen werden, da dieses Material eines der vielversprechendsten Elektroden-Materialien für die Hochtemperaturbrennstoffzelle ist, die zur Erzeugung von elektrischem Strom dienen soll. Die elektrischen Eigenschaften zu kennen und das Material dahingehend zu optimieren ist der wichtigste Teil, mit dem sich die Forschung an  $(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x})\text{CoO}_3$  beschäftigt.

Dass es bei einem noch so unerforschtem und neu entwickelten Material auch zu Problemen kommen kann, ist selbstverständlich und soll daher auch nicht verschwiegen werden.

## 1.2. Über den Inhalt

Dieses Themengebiet ist sehr komplex und wird weltweit nur von wenigen Forschungsteams untersucht. Ich hielt es daher für wichtig auch das Umfeld des Materials, die Brennstoffzellen, die Mechanismen des Ionenleitungsvorgangs, etc. zu erklären, um das größtmögliche Verständnis der Materie zu erreichen.

Zuerst wird in einem theoretischen Teil die Funktion von elektrochemischen Elementen, insbesondere die Funktion von Brennstoffzellen erklärt, um das Umfeld, in dem  $(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x})\text{CoO}_3$  verwendet wird zu erläutern.

Danach wird der Aufbau von  $(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x})\text{CoO}_3$  erklärt, und im Zuge dessen wird auf die Gründe für die elektrische Leitfähigkeit des Materials eingegangen. Auch die bei der Leitung auftretenden Widerstände werden erläutert, um eine Grundlage für den letzten Teil der Arbeit zu schaffen.

Im folgenden Teil wird die Erzeugung von LSC, die anschließende Mikrostrukturierung, also die Herstellung von Mikroelektroden, und die darauf folgende Messung des Widerstandes bei Wechselstrom geschildert.

Im nächsten Teil werden schließlich einige Proben vorgestellt, deren Ergebnisse typisch für  $(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x})\text{CoO}_3$  und die bei diesem Werkstoff auftretenden Probleme sind.

Im abschließenden Kapitel soll noch ein kleiner Ausblick auf die Verwendung der Hochtemperaturbrennstoffzelle und die dabei auftretenden Vor- und Nachteile gegeben werden, um eine Vorstellung von der praktischen Anwendung von Forschung zu ermöglichen sowie ein kleines Resümee über die Arbeit gegeben werden.



## 2. Theorie

### 2.1. Elektrochemische Elemente

Bei elektrochemischen Elementen, oder elektrochemischen Spannungsquellen, handelt es sich um einen speziellen Aufbau von Elementen, die eine freiwillige Redox-Reaktion miteinander eingehen. Dabei wird die freiwerdende Energie der Redox-Reaktion nutzbar gemacht.<sup>1</sup> Man unterscheidet zwischen primären, sekundären und tertiären elektrochemischen Elementen, allen gemeinsam jedoch ist ihr prinzipieller Aufbau: Sie bestehen aus einem Elektrolyten, einer positiven und einer negativen Elektrode (Anode und Kathode). An der Anode findet eine Oxidation (Elektronenabgabe) und an der Kathode eine Reduktion (Elektronenaufnahme) statt.<sup>2</sup> Wichtig ist, dass die Reaktionen voneinander getrennt ablaufen, denn nur so kann der Elektronenstrom für einen Verbraucher genutzt werden. Die Materialien für Anode, Kathode und Elektrolyt variieren von Element zu Element, bedeutend ist aber, dass Anode und Kathode Elektronen leiten und dass der Elektrolyt nur Ionen leitet.

#### 2.1.1. Primäre Elemente

Primäre elektrochemische Elemente sind zum Beispiel herkömmliche Trocken- oder Alkalibatterien sowie Knopfzellen.

Sie können in ihrem Aufbau und hinsichtlich der verwendeten Materialien variieren, es sind etwa die Elektrolyte manchmal flüssig, wie in der Alkalibatterie (KOH- Kalilauge) oder eher pastös, wie in der Trockenbatterie (Braunstein), aber alle Primärelemente haben eine Gemeinsamkeit:

Sie sind nur einmal verwendbar und müssen nach ihrer Entladung

---

<sup>1</sup> Magyar, Roderich; Liebhart, Wolfgang; Jelinek, Gabriela: EL-MO. Elemente -Moleküle. 1. Auflage. - Wien: öbvhpt Verlagsgmbh&Co.KG, 2007, S72

<sup>2</sup> Artikel: Elektrochemie; in: Microsoft® Encarta® Enzyklopädie 2002. © 1993-2001 Microsoft Corporation

entsorgt werden.<sup>3</sup>

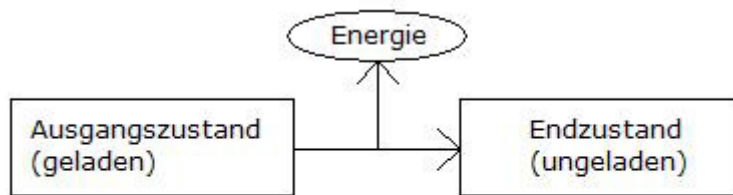


Abbildung 1:  
Prinzip eines  
Primärelements

## 2.1.2.

### Sekundäre Elemente

Sekundäre elektrochemische Elemente, die auch Akkumulatoren genannt werden, finden heute in einer großen Bandbreite an Größen und Materialien Verwendung. Sie werden sehr vielschichtig eingesetzt, von den großen Bleiakkumulatoren in Autos bis zu den kleinsten Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Notebooks und Handys.

Allen gemeinsam ist der Unterschied zu den Primärelementen, denn sie können nämlich nach ihrer Entladung wieder aufgeladen und noch mal verwendet werden.<sup>4</sup>

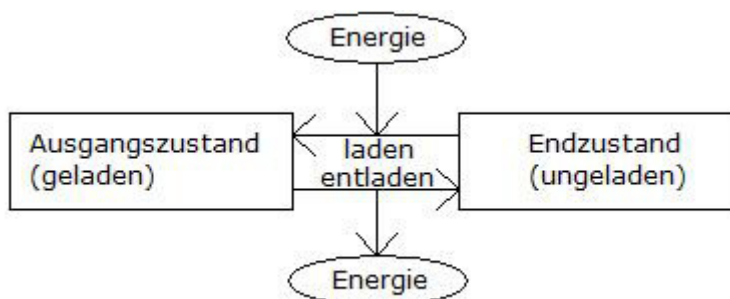


Abbildung 2:  
Prinzip eines  
Sekundärelements

### 2.1.3. Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind tertiäre elektrochemische Elemente. Sie unterscheiden sich von anderen elektrochemischen Elementen dadurch, dass ihr Reaktanten, die nicht Teil ihres Aufbaus sind, kontinuierlich

<sup>3</sup> Magyar; Liebhart; Jelinek: 2007, S73-74

<sup>4</sup> Magyar; Liebhart; Jelinek: 2007, S73-74

zugeführt werden müssen <sup>5</sup>

Bei herkömmlichen kalorischen Kraftwerken dient die Verbrennungswärme des Brennstoffes zur Erzeugung von Wasserdampf, der wiederum eine Turbine antreibt, die ihrerseits einen elektrischen Generator betreibt. Bei dieser Art der Energieumwandlung zur elektrischen Energie werden nur 30%-40% der Verbrennungswärme in elektrische Energie umgewandelt.. <sup>6</sup>

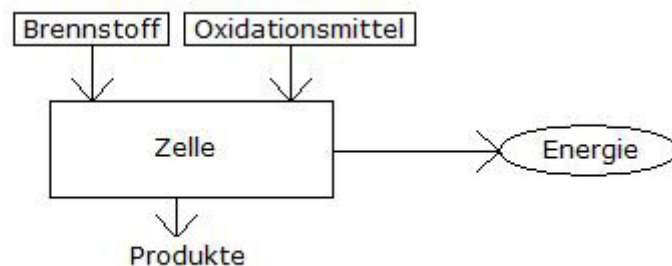
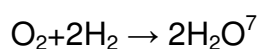


Abbildung 3:  
Prinzip eines  
Tertiärelements

### **2.1.3.1. Die PEM**

PEM steht für Proton Exchange Membrane, also Protonen-Austausch Membran, und bezieht sich auf einen Hauptbestandteil dieser Brennstoffzelle. Die Reaktionspartner bei dieser Art der Brennstoffzelle sind Wasserstoff und Sauerstoff, für deren Reaktion Platin als Katalysator benötigt wird. Als Elektrolyten verwendet man eine Polymermembran, die ausschließlich Protonen, also positiv geladene Teilchen, durchlässt. Der Wasserstoff ist das Reduktionsmittel und gibt an der Anode ein Elektron pro Wasserstoffatom ab, der Sauerstoff nimmt als Oxidationsmittel an der Katode zwei Elektronen pro Sauerstoffatom auf.

Die Gesamtgleichung lautet:



### **2.1.3.2. Die SOFC**

<sup>5</sup> Magyar; Liebhart; Jelinek: 2007, S75

<sup>6</sup> Mortimer, Charles E.: Chemie; 7. Auflage - Stuttgart: Thieme Verlag, Jahr, S373

<sup>7</sup> Magyar; Liebhart; Jelinek: 2007, S75

SOFC steht für Solid Oxide Fuel Cell, d.h. Festoxid- Brennstoffzelle. Gebräuchlich sind auch die Namen Hochtemperaturbrennstoffzelle oder oxidkeramische Brennstoffzelle.

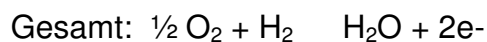
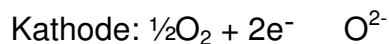
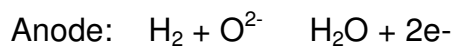
Die Materialien für die Kathode und den Elektrolyt sind Feststoffe, oft Keramiken, die für Elektronen Isolatoren sind, jedoch Ionen leicht leiten können. Für die Anode werden gewöhnlich Metalle verwendet, vor allem Edelmetalle oder Nickel. Als Oxidationsmittel ist die Verwendung von Sauerstoff (aus der Luft) sehr verbreitet, als Brenngas wird meist Wasserstoff (z.B.: aus Methan, Kohle, Methanol) verwendet. Bei dem hier untersuchten Modell einer SOFC wird  $(La_xSr_{1-x})CoO_3$  als Kathodenmaterial, Yttrium-Stabilisiertes Zirkoniumdioxid (YSZ) als Elektrolyt und Platin als Anodenmaterial verwendet.<sup>8</sup>

Im Unterscheid zur PEM Brennstoffzelle ist die SOFC temperaturbeständiger und die verwendeten Werkstoffe sind kostengünstiger.

### **2.1.3.3 Funktion der SOFC**

Egal welche Materialien als Kathoden- bzw. Anodenmaterial verwendet werden, der Ablauf der Reaktion ist immer gleich: An der Kathode findet die Reduktion statt, Sauerstoff-Moleküle werden zu  $O^{2-}$  Ionen reduziert. Diese werden durch den Elektrolyten zur Anode transportiert, wo mit Hilfe von Wasserstoff die Reduktion zu Wasser erfolgt, wobei 2 Elektronen frei werden.<sup>9</sup>

Die Reaktionsgleichung dazu ist also:




---

<sup>8</sup>Kurzweil, Peter: Brennstoffzellentechnik, 1. Auflage -Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2003, S172

<sup>9</sup> Kurzweil, 2003, S172

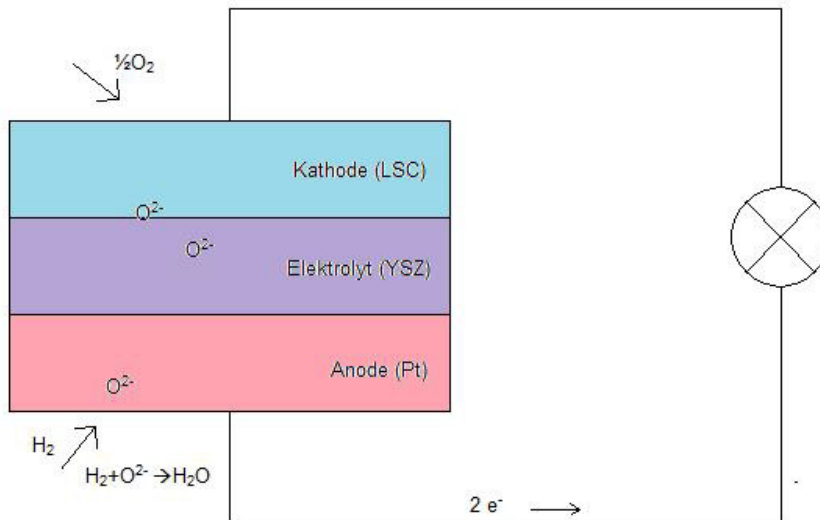


Abbildung 4:  
Die Funktion  
Der SOFC

## 2.2.

### Lanthan-

### Strontium-Kobaltat

Bei  $(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x})\text{CoO}_3$ , kürzer auch LSC genannt, handelt es sich um einen kristallinen Feststoff. Die Symbole  $x$  beziehungsweise  $1-x$ , die anstelle von Zahlen bei Lanthan und Strontium stehen, verweisen auf die Verunreinigung des Strontiums mit Lanthan. Dabei stehen die Werte die für  $x$  eingesetzt werden für den Anteil der Strontium-Ionen die von Lanthan ersetzt werden. Genauer wird darauf in 2.2.1.1 eingegangen.

Im folgenden wird näher auf seinen Aufbau und die Gründe seiner Verwendung als Kathodenmaterial in der Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) eingegangen.

#### 2.2.1. Aufbau

LSC ist eine aus Ionen bestehende Verbindung und hat daher eine Gitterstruktur. Da LSC eine Lösung im festen Zustand ist (siehe 2.2.1.1), wird an dieser Stelle nur auf den Aufbau von  $\text{SrCoO}_3$  eingegangen.  $\text{SrCoO}_3$  kristallisiert in eine Perowskit -Struktur und gehört zu der wichtigen Familie der Elektrokeramiken.

Perowskit- strukturierte Kristalle haben die allgemeine chemische Formel  $\text{M}'\text{M}''\text{X}_3$ , sie sind also aus drei verschiedenen Atomarten aufgebaut, von denen zwei im gleichen Verhältnis liegen und Metalle sind.

Die Familie der Perowskite ist in ihrer Grundform kubisch strukturiert. Das heißt, dass man sich den Aufbau des Gitters als Würfel vorstellen

kann, bei dem die Ionen verschiedene eindeutig geometrische Positionen einnehmen können. Man unterscheidet bei  $\text{SrCoO}_3$  zwei Arten der Aufstellung:

Bei der ersten Aufstellung nimmt Kobalt, das mit einer vierwertig positiven Ladung das am meisten geladene Kation ist, den Platz in der Raummitte ein. Strontium, zweiwertig positiv geladen, sitzt an den Ecken und Sauerstoff schließlich, das einzige Anion der Struktur und zweiwertig negativ geladen, nimmt die Position in den Mitten der Flächen des Kubus ein.

Die zweite Art der Aufstellung ist folgendermaßen strukturiert:

Die Sauerstoff-Ionen nehmen die Position an den Ecken des Kubus ein, die Strontium-Ionen die Position in der Raummitte und die Kobalt Ionen die Stellungen an den Flächenmitten der Seiten des Kubus.<sup>10</sup>

#### **2.2.1.1. Lösungen im festen Zustand**

Eine Lösung im festen Zustand ist mit einer flüssigen Lösung, wie zum Beispiel Alkohol und Wasser, praktisch vergleichbar. Auch Legierungen von Metallen, wie zum Beispiel Gold und Kupfer, zählen zu den festen Lösungen.

Der britische Metallurg William Hume-Rothery stellte die nach ihm benannten Hume-Rothery Regeln für die vollständige Mischbarkeit von metallischen festen Lösungen auf:

- 1) die Atomradien dürfen sich um höchstens 15% unterscheiden
- 2) die Kristallstruktur der Metalle muss gleich sein
- 3) die Metalle müssen eine ähnliche Elektronegativität aufweisen und
- 4) die Metalle müssen die gleiche Valenz, also Wertigkeit, haben

Diese Prinzipien gelten im Wesentlichen auch für die festen Lösungen von Verbindungen, jedoch muss für die 4 oben angeführte Regel eine Einschränkung gemacht werden: Die Ionen müssen nicht dieselbe Valenz haben, aber die Ladungsneutralität muss aufrechterhalten werden.

---

<sup>10</sup> J. F. Shackelford. "Werkstofftechnologie für Ingenieure". 6.Auflage. -München: Pearson Studium, 2005, S109

Als Beispiel dafür kann eine Mischung von Aluminiumoxid und Magnesiumoxid verwendet werden:

Aluminium ist dreiwertig und Magnesium zweiwertig, das heißt dass nicht jede Stelle eines Magnesiumatoms von einem Aluminiumatom eingenommen werden kann. Nur jeweils zwei Aluminiumatome füllen drei leere Plätze des Magnesiums aus.<sup>11</sup>

Bei LSC tritt genau derselbe Sachverhalt auf: nicht jeder Platz des Strontiums kann von einem Lanthan Ion eingenommen werden. Das führt zu Defekten, wie sie in Abschnitt 2.3.2 genauer erläutert werden

## 2.3. Ionenleitung

SOFCs beruhen auf der Ionischen Leitfähigkeit eines Oxides, wobei technologisch meist YSZ eingesetzt wird. Als ionische Leitfähigkeit bezeichnet man die Fähigkeit eines Stoffes Ionen, also geladene Teilchen, zu leiten.

### 2.3.1. Gründe für Ionenleitung

Die Fähigkeit Ionen zu leiten beruht, genau wie viele andere wichtige Eigenschaften von Oxiden (z.B.: Korrosion bei hoher Temperatur), auf Defekten im Ionengitter und ist außerdem stark von der Temperatur abhängig<sup>12</sup>

### 2.3.2. Defekte im Ionengitter

Die Struktur eines idealen Kristalls ist definitionsgemäß die dreidimensionale unendlich ausgedehnte Anordnung von Atomen oder Ionen im Raum, die alle auf identische Art und Weise von ihren Nachbarn umgeben sind<sup>13</sup>

Dieses Modell ist selbstverständlich nur theoretisch, schon allein weil kein Kristall unendliche Ausdehnung haben kann und die Teilchen an

---

<sup>11</sup>Shackelford., 2005, S157/158

<sup>12</sup>. Fleig, Habilitation thesis, "Electrical and Electrochemical Investigations of Inhomogeneities in Solid State Ionics" - Stuttgart: Fakultät für Naturwissenschaften der Universität Ulm, (Max-Planck-Institut für Festkörperforschung ) 2002 S11

<sup>13</sup> E. Riedel. "Anorganische Chemie", 4 Auflage -New York, Berlin :de Gruyter,1999, S211

der Oberfläche eine andere Umgebung haben, als die im Kristall.<sup>14</sup> Dennoch wird jede Abweichung von diesem Modell als Defekt bezeichnet. Es gibt verschiedenen Arten von Defekten, in den meisten Kristallgittern sind jedoch die Punktdefekte für den ionischen Ladungstransport verantwortlich.<sup>15</sup>

### 2.3.2.1. Punktdefekte

Punktdefekte sind das Ergebnis der thermischen Schwingung von Atomen, die vollkommen normal ist wenn die Temperatur der Atome über dem absoluten Nullpunkt liegt.

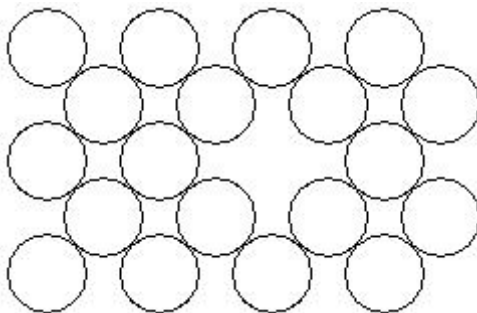
Punktdefekte lassen sich in zwei Typen, je nach Entstehung, unterteilen:

Die intrinsischen Defekte, die in jedem Kristall ohne äußeres Zutun vorkommen können, und die extrinsischen Defekte, die künstlich erzeugt werden<sup>16</sup>.

#### 2.3.2.1.1. Intrinsische Defekte

In elementaren Verbindungen sind die zwei häufigsten Arten der Punktdefekte **Leerstellen**, also einfach unbesetzte Atomplätze in der kristallinen Struktur, und Zwischengitterplätze.

Abbildung 5:  
Leerstelle im Kristallgitter



Als **Zwischengitterplatz** bezeichnet man einen von einem Atom eingenommenen Platz der in einer perfekten Kristallstruktur

<sup>14</sup> Opitz Alexander, Diplomarbeit: „Die Kinetik der O<sub>2</sub>-Reduktion an mikrostrukturierten Platinschichten auf Yttrium-Stabilisiertem ZrO<sub>2</sub>“, Inst. f. Chemische Technologien und Analytik der TU-Wien, 2008, S17

<sup>15</sup> Fleig, 2002, S11

<sup>16</sup> Shackelford., 2005, S163



nicht besetzt wäre oder ein zusätzliches Atom das in die perfekte Kristallstruktur so eingelagert wird dass beide Atome Positionen einnehmen die sie im perfekten Kristallgitter nicht einnehmen würden.

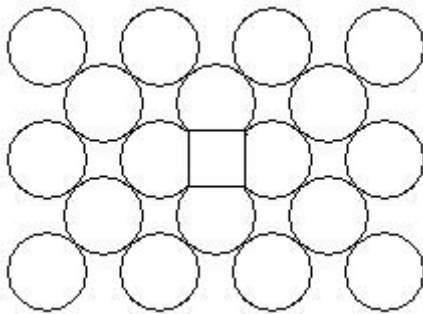


Abbildung 6:  
Zwischengitterplatz im Kristallgitter

Die häufigste Art der Defektbildung in nicht elementaren Verbindungen sind der Schottky und der Frenkel-Defekt.

Der **Schottky Defekt** ist ein Paar von entgegengesetzt geladenen Ionen-Leerstellen. Die Leerstellen müssen entgegengesetzte Ladungen haben um die Ladungsneutralität zu bewahren.

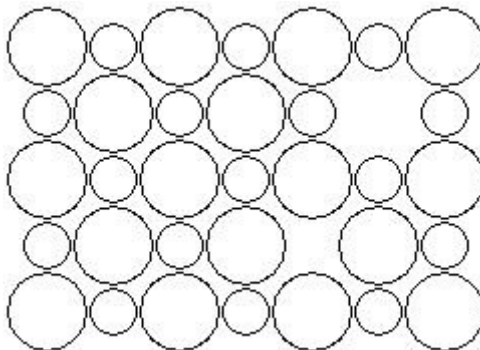


Abbildung 7:  
Schottky-Defekt

Beim **Frenkel Defekt** handelt es sich um eine Mischung aus Leerstelle und Zwischengitterplatz. Der Frenkel-Defekt tritt vor allem in weniger dicht gepackten Strukturen auf, da er nur entstehen kann wenn zu seiner Bildung keine übermäßige Gitterdehnung verlangt wird <sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> Shackelford., 2005, S164

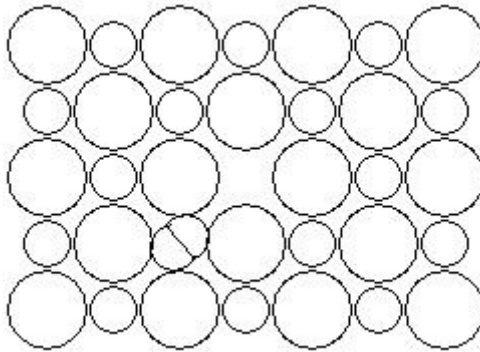


Abbildung 8:  
Frenkel-Defekt

Die Bildung dieser Defekte verlangt das Aufbrechen von

Bindungen, im thermodynamischen Gleichgewicht. Sie können daher nur entstehen wenn die endothermische (wärmeverbrauchende) Formationsenthalpie von entropischen Effekten ausgeglichen wird. Die Konzentration der Defekte hängt stark von der Temperatur ab<sup>18</sup>

#### 2.3.2.1.2. Extrinsische Defekte

Die Konzentration von Defekten kann jedoch auch künstlich, mit Hilfe von Dotierung (also Verunreinigung) erreicht werden. Wenn das der Fall ist, so spricht man im Allgemeinen von extrinsischen (ex, lat: aus) Defekten. Der „Trick“ ist dabei folgender: Um eine gewisse Konzentration an Leerstellen zu erreichen, werden aliovalente Atome, also Atome mit einer anderen Wertigkeit als die der im Gitter vorkommenden, eingeschleust. Um die Neutralität des gesamten Kristalls zu wahren werden nun Leerstellen gebildet.<sup>19</sup> Ein Beispiel dafür ist die Dotierung von Zirkonoxid ( $ZrO_2$ ) mit Yttrium: Durch diese Dotierung wird das Material nicht nur in seiner Struktur stabilisiert, sondern auch für Sauerstoff-Ionen leitfähig. Durch den Einbau von Yttrium, einem dreiwertig positiven Atom, in ein Gitter das aus vierwertig positiven Zirkonoxiden aufgebaut ist, entsteht ein positiver Ladungsüberschuss, der ausgeglichen werden muss. Es entstehen Leerstellen an Gitterplätzen, an denen eigentlich Sauerstoff-Ionen sitzen müssten. Diese Leerstellen sind essentiell für die Leitung der Ionen und ohne sie wäre die Ionenleitung nicht

<sup>18</sup> Fleig, 2002, S13

<sup>19</sup> Fleig, 2002, S13

möglich.<sup>20</sup>

### 2.3.3. Temperaturabhängigkeit der Ionenleitfähigkeit

Man kann sich die Leitung von Ionen durch ein Material bildlich sehr einfach vorstellen: Ein Ion „hüpft“ von einer Leerstelle im Ionengitter zur nächsten.

Jeder Sprung eines Ions erfordert aber ein gewisses Maß an Energie, die von Atomsorte zu Atomsorte unterschiedlich ist, um die Bindungsenergie zu überwinden und seinen Platz zu verlassen.

Daher hängt die Leitfähigkeit einer bestimmten Art von Teilchen von ihrer Konzentration im Material und von ihrer Beweglichkeit ab. Durch die Zunahme von Temperatur wird die Energie der Teilchen im Kristall erhöht und somit wird ihre Beweglichkeit größer. Daraus folgt, dass die ionische Leitfähigkeit stark von der Temperatur abhängig ist.<sup>21</sup>

Ein Experiment dazu:<sup>22</sup>

In einen Stromkreis, bestehend aus einer Spannungsquelle von 30 V, einer Glühlampe als Verbraucher und einem Voltmeter, das parallel zum Verbraucher geschaltet war, wurde ein YSZ Element eingebaut (siehe Skizze).

Der Stromkreis wurde geschlossen und es konnte deutlich beobachtet werden, dass kein Stromfluss stattfand, weil weder die Glühlampe leuchtete noch das Voltmeter einen Ausschlag zeigte.

Der Versuch wurde wiederholt nachdem man das YSZ Element für ca. 1 Minute mit einem Gasbrenner erhitzt hatte. Nun konnte eindeutig ein Stromfluss festgestellt werden, da die Glühlampe leuchtete und das Voltmeter einen deutlichen Ausschlag zeigte.

### 2.3.4. Reaktionsschritte an der LSC Elektrode

In der SOFC wird LSC als Kathodenmaterial eingesetzt. Da es sich bei LSC um einen gemischten Leiter handelt, der sowohl Elektronen als

---

<sup>20</sup> Opitz , 2008, S19

<sup>21</sup> Opitz , 2008, S24

<sup>22</sup> Experiment am 4.8.08

auch Ionen leitet, sollen hier kurz die einzelnen Reaktionsschritte erläutert werden:

Eine wesentliche Voraussetzung für die Leitung der Sauerstoff-Ionen durch LSC ist selbstverständlich eine ausreichende Sättigung der Umgebung mit Sauerstoff. Der normale Sauerstoffgehalt der Luft (ca. 20%) ist im Allgemeinen ausreichend, aber je nach verwendetem Material gibt es bestimmte Optimalwerte, bei denen die Leitung am besten funktioniert.

Um den Ionenleitungsvorgang zu verstehen, ist es am besten die Reaktion des Wasserstoff-Ions mit dem Sauerstoff-Ion an der Anode zu betrachten: Ein Sauerstoff-Ion reagiert mit zwei Wasserstoff-Ionen und verlässt dadurch das Gitter. Eine Leerstelle entsteht, die von einem anderen Sauerstoff-Ion im Gitter eingenommen werden kann. Die Bedingungen für diese Reaktion werden in 2.3 ausführlich beschrieben. Das Sauerstoff-Ion, das den Platz der Leerstelle eingenommen hat, hinterlässt eine andere Leerstelle, die wiederum von einem Sauerstoff-Ion eingenommen werden kann. Daher ist es nicht falsch zu sagen, dass eigentlich die Leerstellen wandert.

Nach einiger Zeit des Leitungsvorgangs herrscht ein so großes Ungleichgewicht in den Ionenleitern, dass neuer Sauerstoff eingebaut werden muss.

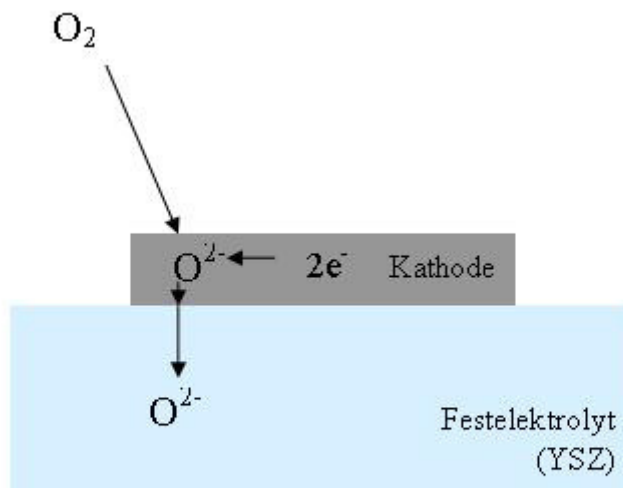


Abbildung 9:  
Reaktionspfad  
des Sauerstoff-  
Ions an der LSC  
Elektrode  
2.4.4.  
Widerstände  
Ein

wesentliches Problem bei SOFCs ist der Energieverlust der beim Einbau von Sauerstoff in die Gitterstruktur der verwendeten Materialien entsteht. Er wird von verschiedenen Faktoren verursacht und beeinflusst:

Ein wichtiger Punkt ist die Trennung des Sauerstoff-Moleküls: Sauerstoff kommt in seiner natürlichen Form, also in der Art in der er für die Brennstoffzelle verwendet wird, nur als Molekül  $O_2$  vor. Dieses Molekül muss nun erst einmal dazubewogen werden sich zu Sauerstoff-Atomen zu trennen und anschließend zwei Elektronen aufzunehmen wenn er an die Oberfläche der Kathode kommt.

Das geschieht einerseits ständig, da das Material in einem chemischen, das heißt dynamischem, Gleichgewicht vorliegt, wobei ständig Reaktionen erfolgen. Andererseits wird diese Entwicklung durch den unterschiedlichen Sauerstoffdruck auf beiden Seiten der Elektrode (bzw. der SOFC) begünstigt:

Auf der einen Seite der LSC Elektrode herrscht ein gewisser, durch den in der Umgebung vorliegenden bewirkten, Sauerstoffdruck. Auf der anderen Seite der Zelle wird Wasserstoff zugeleitet, was einer Senkung des Sauerstoffdrucks entspricht. Dadurch entsteht ein Ungleichgewicht, das zusätzlich mit der Vervielfältigung der Leerstellen für eine stärkere Leitung von Sauerstoff-Ionen sorgt.

Dasselbe Ungleichgewicht entsteht auch, wenn Spannung an die Zelle angelegt wird. Dieses Prinzip wird bei der Charakterisierung mittels Impedanzspektroskopie angewendet.

Danach erfolgt die Leitung durch die Kathode: Dabei ist muss dem Ion wieder Energie zugeführt werden, damit es die Gitterbindungsenergie, die alle Ionen an ihrem Platz im Gitter hält, überwindet und sich von seinem Platz fortbewegt.

Die nächste Stelle an dem dem Ion Energie zugeführt werden muss, ist die Grenze zwischen der Kathode und dem Elektrolyten. Hier muss Energie zugeführt werden da sich die Gitterstrukturen ändern.

Der Austritt an der Anode wiederum verlangt wenig Energie, er geschieht fast zur Gänze vollständig, da die Verbindung mit Wasserstoff

zu Wasser ( $H_2O$ ) aufgrund des niedrigeren Energieniveaus von Wasser freiwillig vor sich geht. Aus diesem Grund ist der Anodenprozess an der SOFC auch noch relativ wenig erforscht.

Die Kathoden werden sowohl bei Gleich- als auch bei Wechselspannung charakterisiert. Die Charakterisierung der Widerstände bei Wechselspannung, der Impedanzen, ist vor allem gebräuchlich weil sich mit Hilfe der Impedanzspektroskopie die verschiedenen Widerstände aufschlüsseln und so ersichtlich ist wo die Widerstände tatsächlich auftreten. Im Gegensatz erfährt man mit Widerstandsmessungen bei Gleichstrom den gesamten Widerstand und muss anschließend auf den Wechselstromwiderstand zurückrechnen, was aufwendig und oft auch gar nicht möglich ist.

## 3. Durchführung

### 3.1 Arbeitsvorschriften

#### 3.1.1. Arbeitsvorschrift für die Herstellung von Perowskiten<sup>23</sup>

Für die Herstellung von Perowskiten ist das Pecchini Verfahren empfehlenswert. Um eine Zusammensetzung von  $(\text{La}_{0,4};\text{Sr}_{0,6})\text{CoO}_3$  zu erhalten müssen 2,657g  $\text{SrCO}_3$ , 1,955g  $\text{La}_2\text{O}_3$  und 1,780g metallisches Kobalt vermischt und anschließend in Salpetersäure gelöst werden. Dann wird die Mischung mit einem Komplexbildner versetzt und anschließend erhitzt bis alles Wasser verdampft ist und sie sich von selbst entzündet. Das dabei entstandene Pulver wird in einem Mörser verrieben und anschließend für 6 Stunden bei 1000°C gesintert, um sämtliche eventuell vorhandene Kohlenstoff- und Wasserreste zu beseitigen

Nach der Sinterung wird das erhaltene Pulver bei hohem Druck zu Tabletten gepresst, die abermals bei 1200°C für 6-8 Stunden gesintert werden.

Das erhaltene Target wird nun abgeschliffen und kann mittels PLD auf beliebige Substrate aufgetragen werden.

#### 3.1.2. Herstellung von Mikroelektroden durch Fotolithographie<sup>24</sup>

Um Mikroelektroden aus LSC auf dem YSZ zu erhalten, ist eine Mikrostrukturierung erforderlich, die durch Fotolithographie erreicht werden kann. Das kann mit dem Standard oder dem Lift-off Verfahren geschehen; die untersuchten Proben wurden mittels Standard Verfahren hergestellt.

Fotolithographie ist ein Verfahren bei dem durch Belichtung Strukturen

---

<sup>23</sup> Vgl.: Synthesis of Perovskite Materials and Preperation of PLD targets

<sup>24</sup> Opitz , 2008, S39

von einer Maske auf Materialien übertragen werden.

Auf die zu strukturierende Schicht LSC wird dabei zuerst lichtempfindlicher Lack durch Rotationsbeschichtung (spin-coating) in flüssiger Form aufgetragen und danach ausgebacken, wodurch eine gleichmäßige Lackschicht entsteht.

Im nächsten Schritt erfolgt die Belichtung des Fotolacks durch eine Maske, die die gewünschten Strukturinformationen enthält. Dadurch wird das Negativ der Maske (als latentes Bild im Fotolack) auf die LSC Schicht gebracht.

Die unbelichteten Regionen werden danach mit einem Agens aufgelöst, das die belichteten Regionen aber unbeschädigt lässt.

Die Strukturinformation wird nun auf die darunterliegende Schichte des Materials übertragen, indem das nicht vom Lack bedeckte LSC entfernt wird (durch chemisches oder Ionenstrahlätzen).

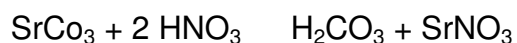
Zuletzt wird der Lack mit Aceton entfernt.

## 3.2. Durchführung

### 3.2.1. Herstellung von $(\text{La}_{0,4};\text{Sr}_{0,6})\text{CoO}_3$ <sup>25</sup>

Es wurden 2,657g  $\text{SrCO}_3$ , 1,954g  $\text{La}_2\text{O}_3$  und 1,782g metallisches Kobalt zuerst vermischt und dann in Salpetersäure (Konzentration: 65%) aufgelöst. Als Komplexbilder wurde Zitronensäure (Trihydrat) gewählt, von der 12g hinzugefügt wurden. Anschließend wurde die Mischung (im Abzug) erhitzt wobei überschüssiges Nitrat als  $\text{NO}_x$  ausgetrieben wurde und die Mischung eine immer größere Viskosität erhielt, bis sie sich selbst entzündete und verkohlte (siehe Abbildung 10). Nachdem das erhaltene Pulver ausgekühlt war, wurde es bei  $1000^\circ\text{C}$  für 6 Stunden in einem Platintiegel gegläht.

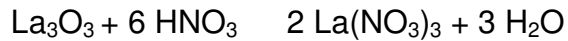
Reaktionsgleichungen:




---

<sup>25</sup> Experiment: 11.8.2008





### 3.2.2. Herstellung des Targets<sup>26</sup>

Das Pulver wurde in einem Porzellanmörser im Abzug und mit aufgesetztem Atemschutz verrieben und anschließend in einer Presse mit 13bar Druck zu einem Zylinder gepresst. Danach wurde die erhaltene Tablette verrieben und anschließend das Pulver von 3 erhaltenen Tabletten wiederum gepresst(. Der so erhaltene Zylinder wurde wieder für 8 Stunden bei 1200 °C in einem Platintiegel gesintert. Nach der Sinterung wurde das Target abgeschliffen, um die beim Sintern entstandene Nitridschicht zu entfernen. Das erhaltene Target hatte ein Gewicht von 2,546g.

### 3.2.3. Herstellung der Mikroelektroden<sup>27</sup>

Die Herstellung der Mikroelektroden gliedert sich in 2 Stufen: Das Auftragen des  $(\text{La}_{0,4};\text{Sr}_{0,6})\text{CoO}_3$  (LSC) auf ein YSZ Substrat und das anschließende Mikrostrukturieren.

#### **3.2.3.1. Auftragen des LSC auf YSZ**

Dies wurde mit Hilfe des PLD (pulsed laser deposition- Laserstrahlverdampfen) Verfahrens erreicht. Dabei wurden sowohl das Target (LSC) als auch das Substrat (YSZ) in einer Vakuumkammer platziert. Dann wird das Substrat aufgeheizt, mit Maximaltemperaturen von 700 °C-750 °C. Das Material des Targets wurde mit Laserstrahlung von hoher Intensität bestrahlt und dabei atomisiert, das heißt in seine Grundbausteine zerlegt. Dadurch wird erreicht, dass die Zusammensetzung des LSC auf dem Substrat genau die gleiche ist wie die auf dem Target. Teile des abgetragenen LSC treten bei diesem Prozess in Wechselwirkung mit der Laserstrahlung und werden dabei

---

<sup>26</sup> Experiment: 12.8.2008; 13.8.2008

<sup>27</sup> Experiment: 19.8.2008; 20.8.2008

ionisiert und beschleunigt, was zu dem optischen Effekt der Plasmafackel führt. Während des ganzen Vorgangs wurde Sauerstoff zugeführt, damit das abgetragene Material als Oxid auf dem Substrat vorliegt. Die Menge des Sauerstoffs kann beliebig variiert werden, um den Anteil des Sauerstoffs im LSC zu steuern

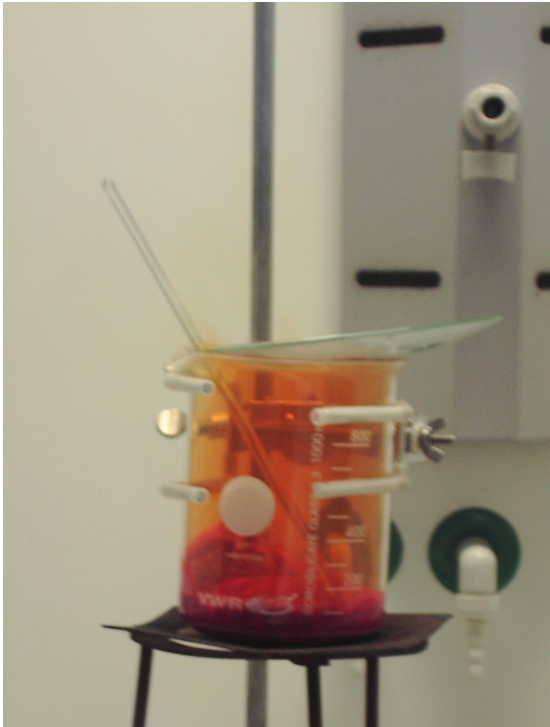


Abbildung 10: Herstellung des LSC mittels Pecchini-Verfahren

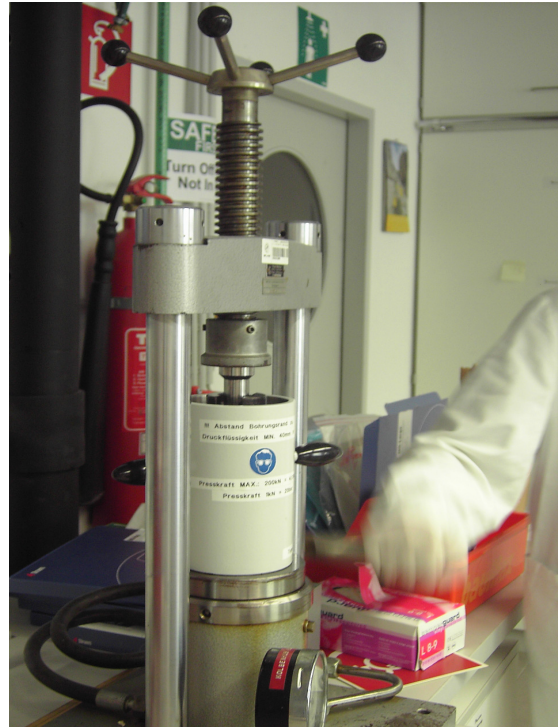


Abbildung 11: Pressen des Targets

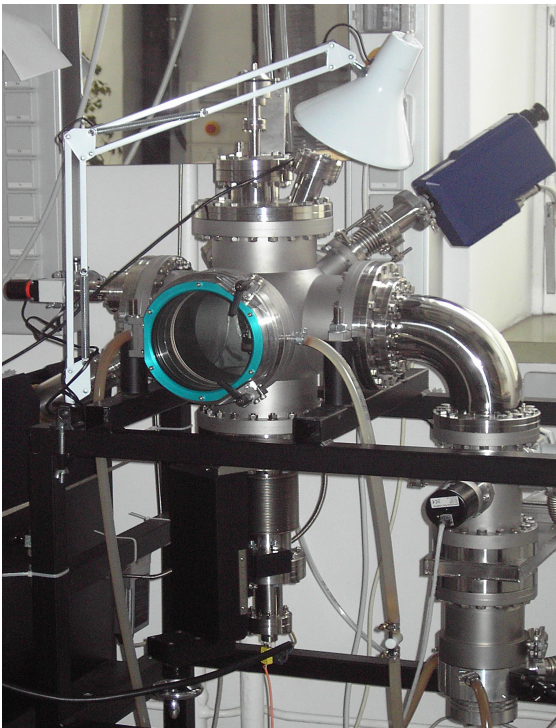


Abbildung 12: „PLD-Maschine“

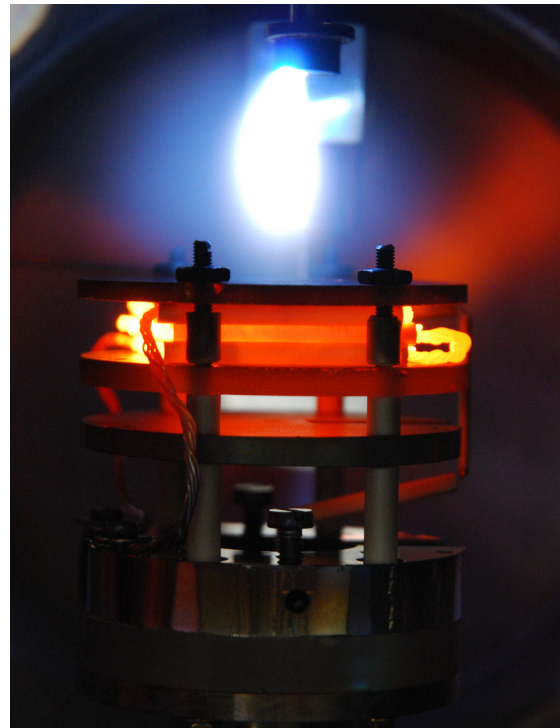


Abbildung 13: der Plasmafackel-Effekt

### 3.2.3.2. Mikrostrukturieren

Anschließend erfolgte die Mikrostrukturierung der Proben durch Fotolithographie im Standard Verfahren.

Auf die zu strukturierende Schicht LSC wurde lichtempfindlicher Lack durch Rotationsbeschichtung aufgetragen und dann ausgehärtet wodurch eine gleichmäßige Lackschicht entstand.



Abbildung 14:  
Die Zukünftigen Elektroden nach  
Auftragung der Lackschicht

Die Plättchen wurden unter eine Maske gelegt und danach mit UV Licht belichtet um den Fotolack auszuhärten. So wurde das Negativ der Maske (als latentes Bild im Fotolack) auf die LSC Schicht gebracht.

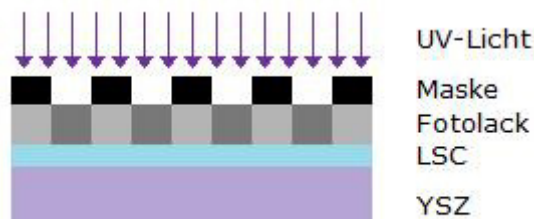


Abbildung 15:  
Belichtung durch die Maske

Die unbelichteten Regionen wurden danach mit Entwicklerlösung aufgelöst, die die belichteten Regionen aber unbeschädigt zurückließ.

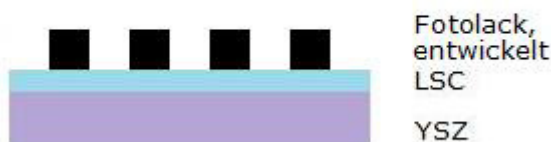
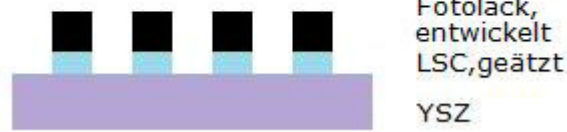


Abbildung 16:  
Der entwickelte Fotolack

Die Strukturinformation wurde nun auf die darunterliegende Schichte des Materials übertragen, indem das nicht vom Lack bedeckte LSC mit Ionenstrahlätzung entfernt wurde.



Aceton entfernt.

Abbildung 17:

Mikroelektroden nach Ätzung des LSC

Zuletzt wurde der Lack mit



Abbildung 18:

Die fertigen  
Mikroelektroden

Zur gleichen Zeit entsteht dabei eine Gegenelektrode ( nicht in den Abbildungen dargestellt) , die wichtig für die Kontaktierung ist, da elektrischer Strom der durch die Elektrode geleitet wird, der wieder austreten muss, damit der Spannungsabfall überhaupt gemessen werden kann.

Die Gegenelektrode entsteht schon bei der Rotationsbeschichtung, da sich der Lack ja von einem Punkt des Substrates auf die ganze Platte ringförmig ausbreitet. Die Maske reicht nicht aus um das ganze Plättchen zu bedecken, wodurch ein Ring um die fertig mikrostrukturierten Elektroden bleibt.

### **3.2.3.3. Gründe der Verwendung von Mikroelektroden**

Der Aufwand, den die Herstellung der Mikroelektroden verursacht wirft natürlich die Frage nach den Gründen der Verwendung von Mikroelektroden auf. Diese sind vielfältig, die wichtigsten werden hier kurz erwähnt:

Zum einen ist die Größe (beziehungsweise Kleinheit) der Mikroelektroden: auf einem kleinen Plättchen befinden sich mehrere Dutzend Mikroelektroden. Sollte eine Elektrode bei einer Messung beschädigt werden ist es kein Problem ohne erhebliche Zeitverzögerung eine weitere Elektrode zu kontaktieren.

Ein weiterer Grund für die Verwendung von Mikroelektroden ist das

Verhältnis der Mikroelektrode zur Gegenelektrode [siehe 3.2.3.2].  
Dadurch dass nur ein (verhältnismäßig) großer Ring um die Elektroden gelegt ist, die Mikroelektrode im Vergleich aber klein ist, ist es möglich praktisch nur die Impedanz der Mikroelektrode zu messen, fast ohne Einfluss der Gegenelektrode.<sup>28</sup>

### 3.2.4. Messung der Impedanz

Zur Messung der Impedanz, also des Widerstandes der Elektroden bei Wechselstrom, wurden die Mikroelektroden auf eine Heizplatte gelegt, die sich unter einem Mikroskop befand. Die Platte wurde erhitzt und anschließend wurde jeweils eine Mikroelektrode und die Gegenelektrode mit Nadeln aus einer Platin-Iridium-Legierung (auch Wolframnadeln sind gebräuchlich) kontaktiert, die mit dem Impedanzanalysator verbunden waren. Die Messung der Impedanz erfolgte bei verschiedenen Frequenzen; die Daten wurden computerunterstützt aufgezeichnet. Die Temperatur, die Frequenz, und die Dauer der Messung können je nach dem Aufbau und/oder der Vorbehandlung der Elektrode variieren. [genauerer: siehe Auswertung]

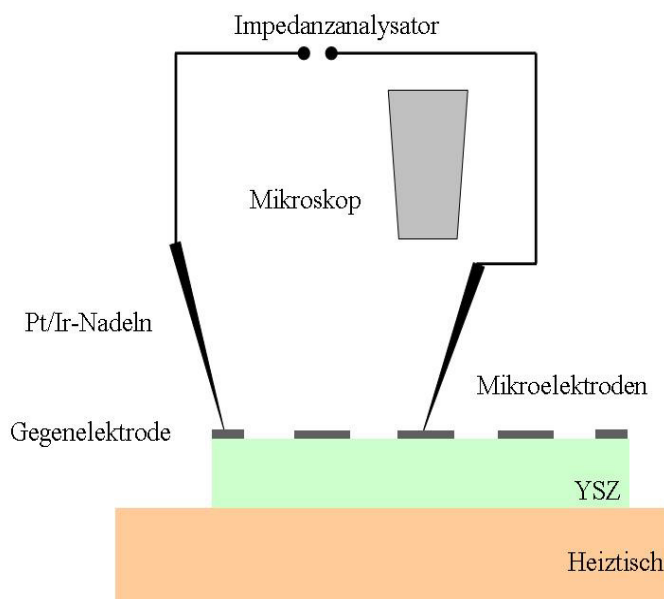


Abbildung 19:  
schematische Darstellung  
des Messvorgangs

<sup>28</sup> Opitz , 2008, S34

## 4 Auswertung

### 4.1. Allgemeine Erläuterungen

Die Impedanz der Mikroelektroden wurde wie in 3.2.3.3 beschrieben gemessen. Dies erfolgte bei verschiedenen Temperaturen in verschiedenen Zeitabständen.

Das Ziel dieser Messungen ist es durch das Anlegen von Spannung durch die Mikroelektroden den Sauerstoffeinbau zu erreichen, und zu messen wie groß der Spannungsabfall bei dem Einbau des Sauerstoffs in das Kristallgitter und seiner Leitung durch die Mikroelektrode und den Elektrolyten ist.

Dabei stößt man auf drei wesentliche Widerstände (siehe 2.4.4.):

- 1) der Einbau des Sauerstoffs in das LSC (R surface)
- 2) den Übergang zwischen YSZ und LSC (R Interface) und
- 3) die Leitung durch das YSZ (R YSZ)

Der bei der Leitung des Ions durch das LSC entstehende Spannungsabfall ist wegen der geringen Dicke der Mikroelektroden nicht messbar. Der Spannungsabfall bei der Leitung durch YSZ ist messbar weil YSZ (im Vergleich mit LSC) in größerer Menge vorliegt.

Der Widerstand wird in  $\text{ohm.cm}^2$  angegeben, um einen Vergleich verschiedener Proben mit verschiedener Größe zu ermöglichen.

### 4.2. Die Proben

#### 4.2.1. Veränderung des Widerstandes mit der Zeit

Um einen allgemeinen Eindruck über das Verhalten von LSC im Laufe seiner Verwendungszeit zu gewinnen, ist es nötig zuerst eine Probe ohne spezielle Vorbehandlung zu charakterisieren

##### 4.2.1.1. JJ039C

Die Probe JJ039C (Zusammensetzung  $(\text{La}_{0,6};\text{Sr}_{0,4})\text{CoO}_3$ ) wurde direkt nach ihrer Herstellung bei  $600^\circ\text{C}$  in regelmäßigen Abständen

von 9 Minuten 115 mal gemessen.

Sie zeigt hervorragend das Verhalten der Widerstände mit der Zeit unter längerem Einfluss hoher Temperaturen (siehe dazu Abbildung 20):

R YSZ und R Interface blieben dabei relativ stabil, die auftretenden Schwankungen sind auf Ungenauigkeiten der Messapparaturen zurückzuführen.

R surface jedoch stieg sehr schnell an, die Größenordnung verändert sich sogar um eine 10er Potenz und ab der 70 Messung machte die Auswertung der Oberflächenwiderstände sogar keinen Sinn mehr, da wegen der hohen Widerstände eine zu große Fehlerbehaftung auftrat.

#### 4.2.1.2. JJ044B

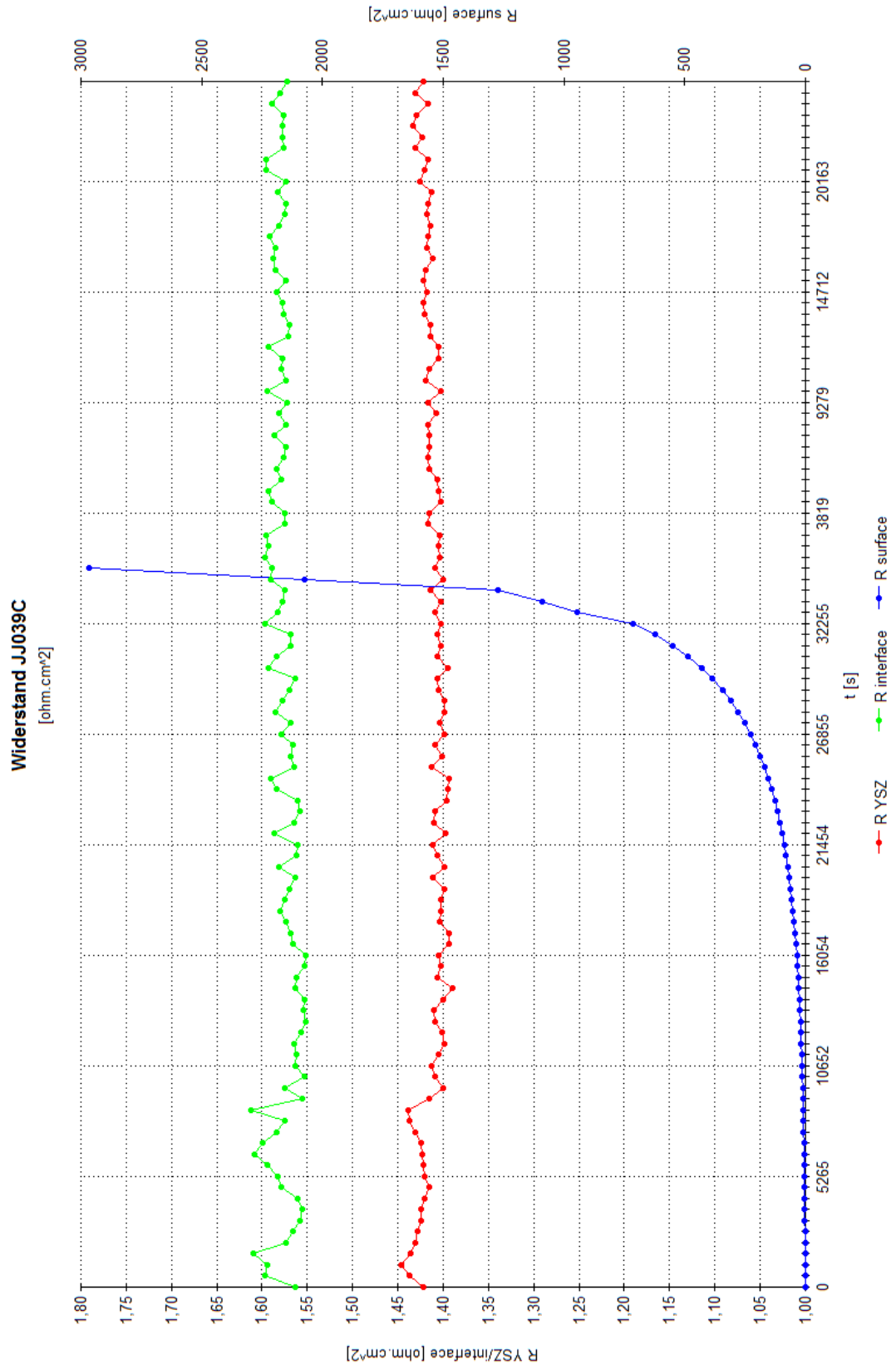
Hat die Zusammensetzung  $(\text{La}_{0,4};\text{Sr}_{0,6})\text{CoO}_3$ . Die Probe wurde bei  $470^\circ\text{C}$  für 5 min beschichtet, hat eine Schichtdicke von 40nm und wurde bei  $600^\circ\text{C}$  charakterisiert

Kurz nach der Herstellung erfolgte die Messung der Impedanz von 2 Mikroelektroden (1mal und 2-mal), wobei keine klare Auswertung möglich war

Dann wurde die Impedanz von 4 Mikroelektroden jeweils 2mal gemessen und zuletzt erfolgte die Messung der Impedanz einer fünften Mikroelektrode in einem Zyklus von insgesamt 222 Messungen mit Abstand von ca. 7Min mit einer Gesamtdauer von ca. 17,5 Stunden

Dabei war zu beobachten, dass die Auswertung der Surface - Widerstände nur bis zur 57Messung sinnvoll war, weil danach die Widerstände zu groß und dabei zu wenige Messpunkte für eine genaue Auswertung vorhanden waren (vergleiche Abbildung 21).





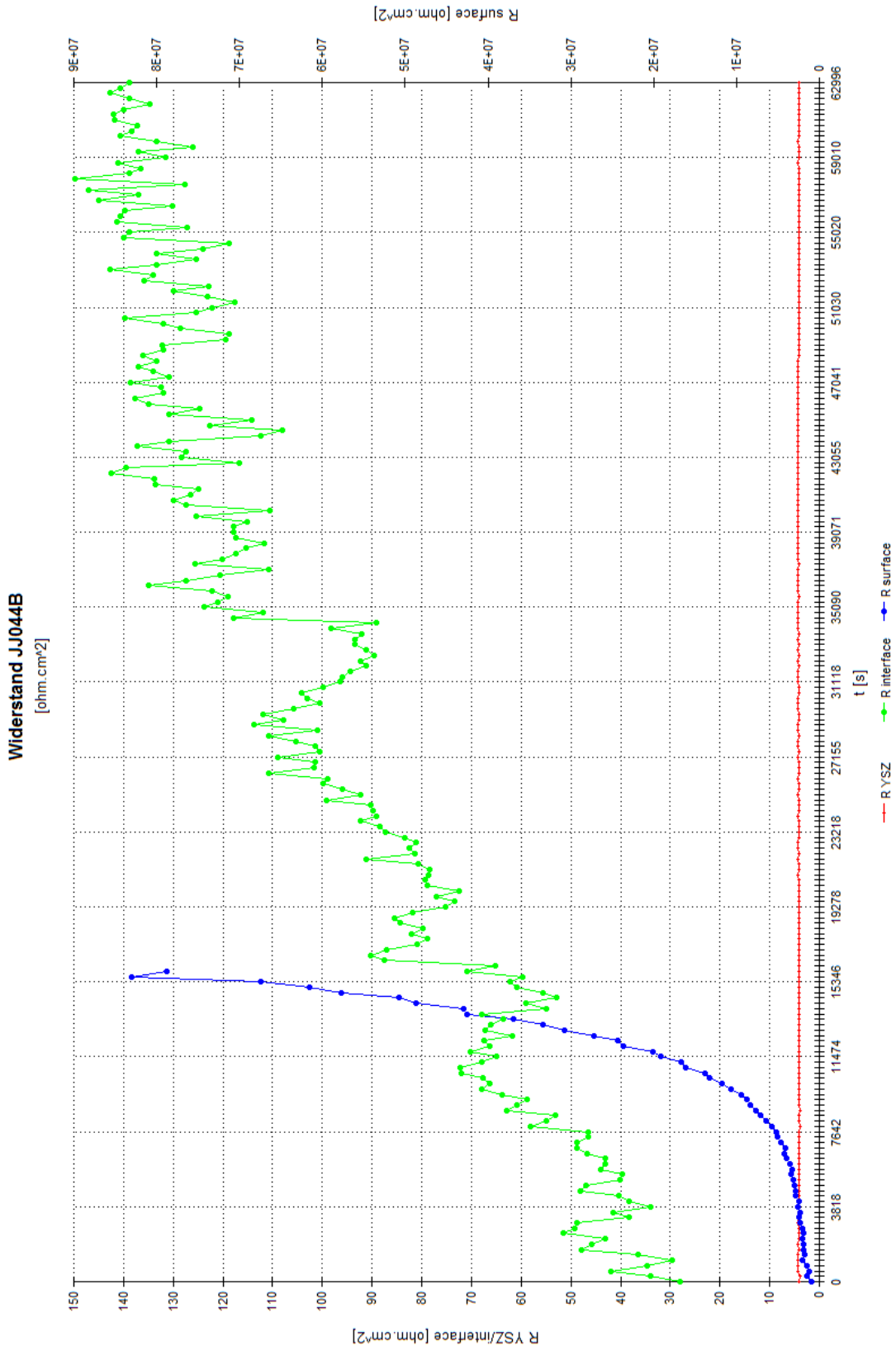


Abbildung 21:  
Diagramm zu JJ044B

#### 4.2.2. Veränderung des Widerstandes durch Ätzung

Da bei LSC Elektroden vor allem der Oberflächenwiderstand ( $R_{\text{surface}}$ ) rasch ansteigt, wie in 4.2.1. deutlich zu sehen, wird eine Ablagerung von Materialien an der Oberfläche der Probe vermutet. Welche Substanzen sich an der Oberfläche ablagern und warum sie es tun ist bis jetzt noch ungeklärt, es existieren aber verschiedene Theorien: Eine Hypothese besagt, dass sich Strontium aus dem inneren des Kristalls an der Oberfläche ablagert und sie somit versiegelt.

Neuere Messungen mittels AFM legen nahe, dass es sich um LSC selbst handelt, das unter Einfluss der Hitze bei Messtemperaturen auskristallisiert und somit die Oberflächenstruktur verändert, wodurch der Einbau von Sauerstoff erschwert wird. Da die Messungen aber nicht an allen Proben durchgeführt wurden, ist keine Eindeutige Aussage möglich.

##### 4.2.2.1 JJ022A

Um die Entfernung der störenden Schichten zu ermöglichen wurde die Probe mit Salzsäure geätzt.

An der Probe JJ022A mit der Zusammensetzung  $(\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4})\text{CoO}_3$  wurden 10 Messungen bei  $625^\circ\text{C}$  vorgenommen, nachdem sie zuvor mehrere Stunden lang bei  $600^\circ\text{C}$  getempert wurde. Die Messungen dauerten insgesamt ca. eine Stunde.

Danach wurde die Probe für neun Sekunden in Salzsäure (2ml konzentrierte HCl auf 140ml Wasser) getaucht und die Impedanz erneut gemessen. Gesamt wurden 72 Messungen vorgenommen die im Abstand von 14 Minuten vorgenommen wurden und insgesamt 14,5 Stunden dauerten.

Diese Ätzung wurde noch zweimal vorgenommen, einmal für 20 Sekunden mit 73 anschließenden Messungen (gesamt ca. 15 Stunden) und einmal für 5 Sekunden mit 301 anschließenden Messungen (gesamt ca. 72,5 Stunden).

⌘ *Beobachtungen (vergleiche dazu Abbildungen 22-24):*

Der Oberflächenwiderstand konnte durch die Behandlung mit Salzsäure gesenkt werden, er stieg allerdings wieder an, nach der ersten Ätzung sogar um ein Vielfaches des höchsten Startwertes. Nach der 2 und 3 Ätzung stieg er zwar wieder, aber nicht mehr auf den ursprünglichen Wert, am Ende schien er sogar zu sinken.

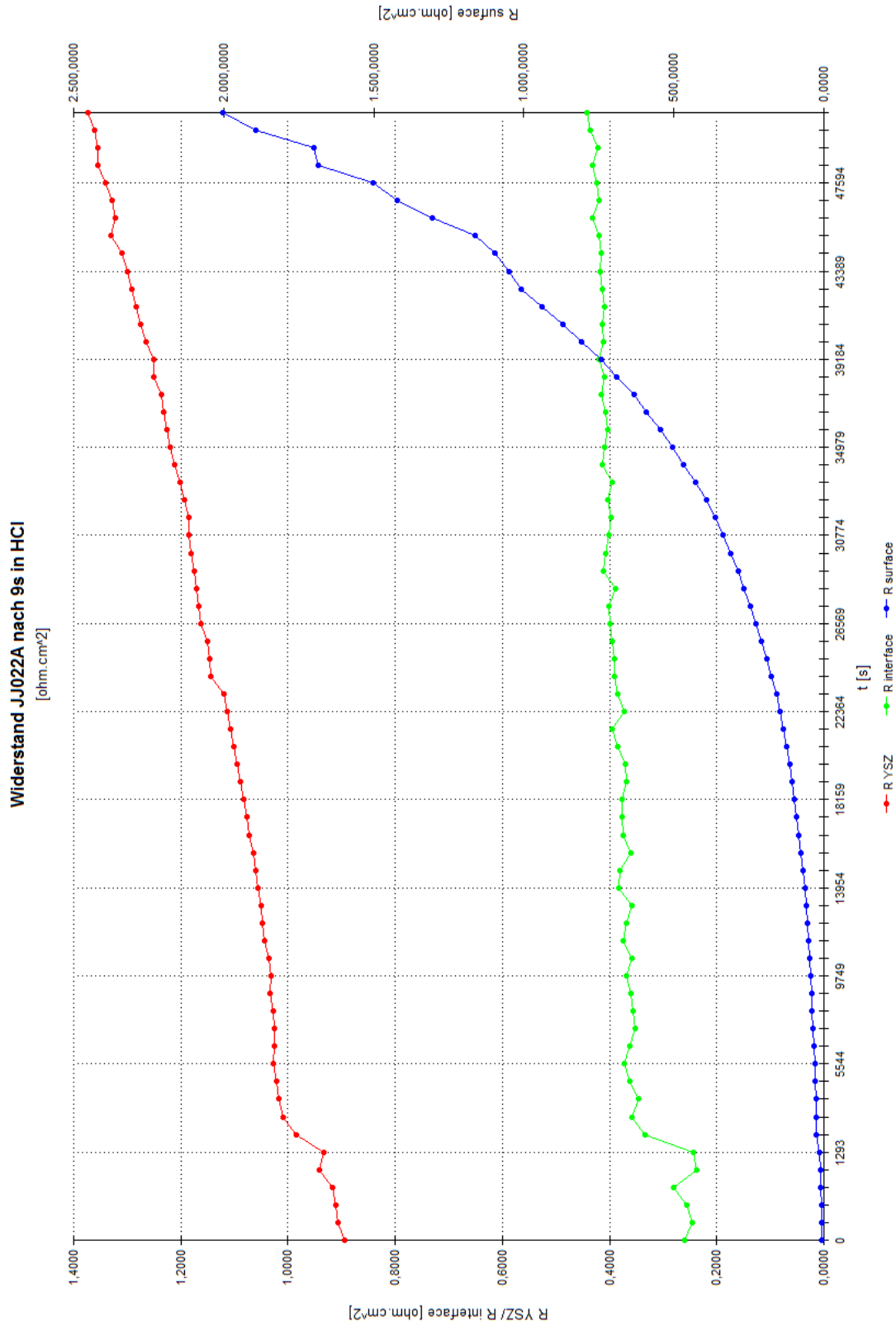


Abbildung 22:  
Diagramm I zu JJ022A

Widerstand JJ022A nach 20s in HCl  
[ohm.cm<sup>2</sup>]

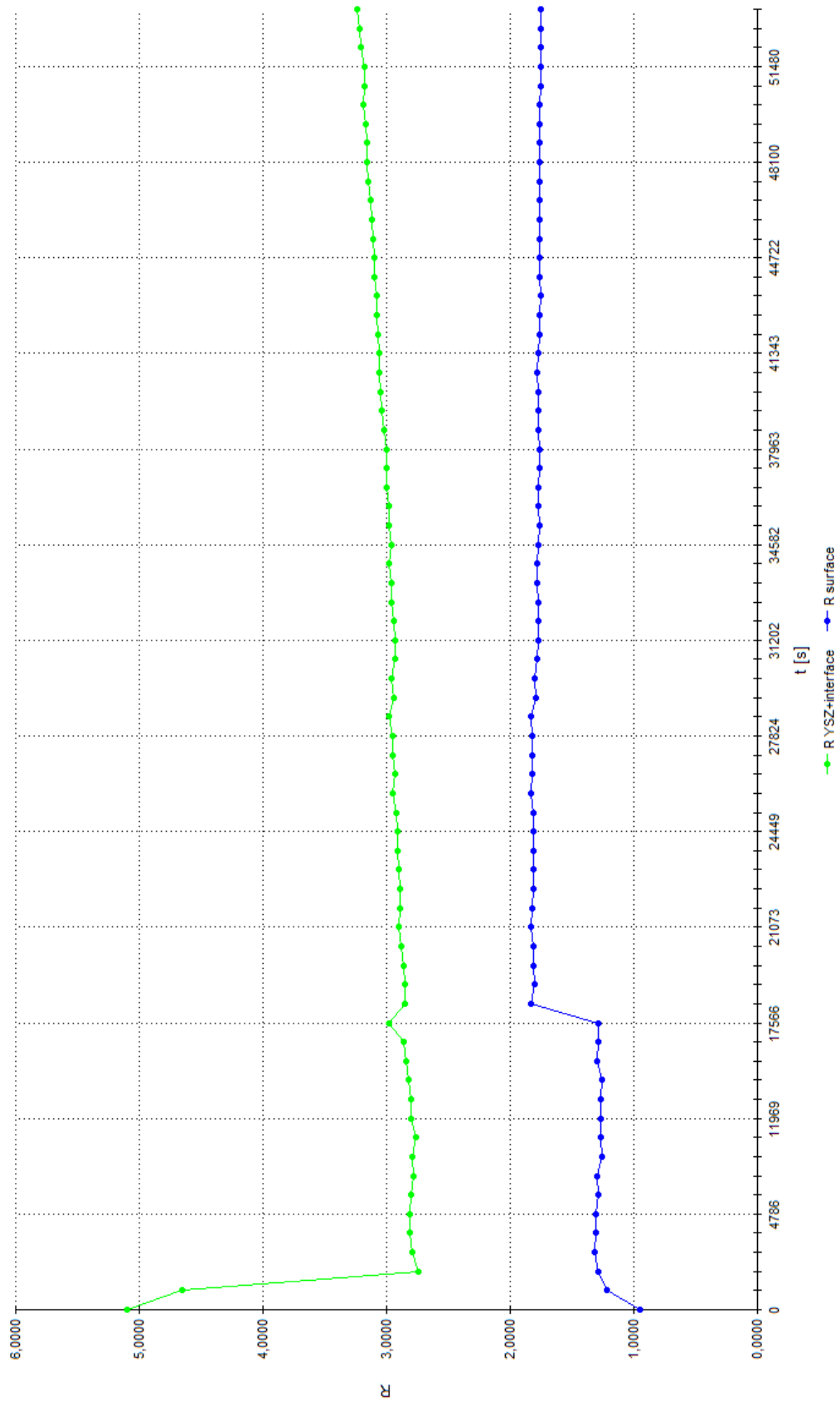


Abbildung 23:  
Diagramm Ii zu JJ022A

Widerstand JJ022A nach 5s in HCl

[ohm.cm<sup>2</sup>]

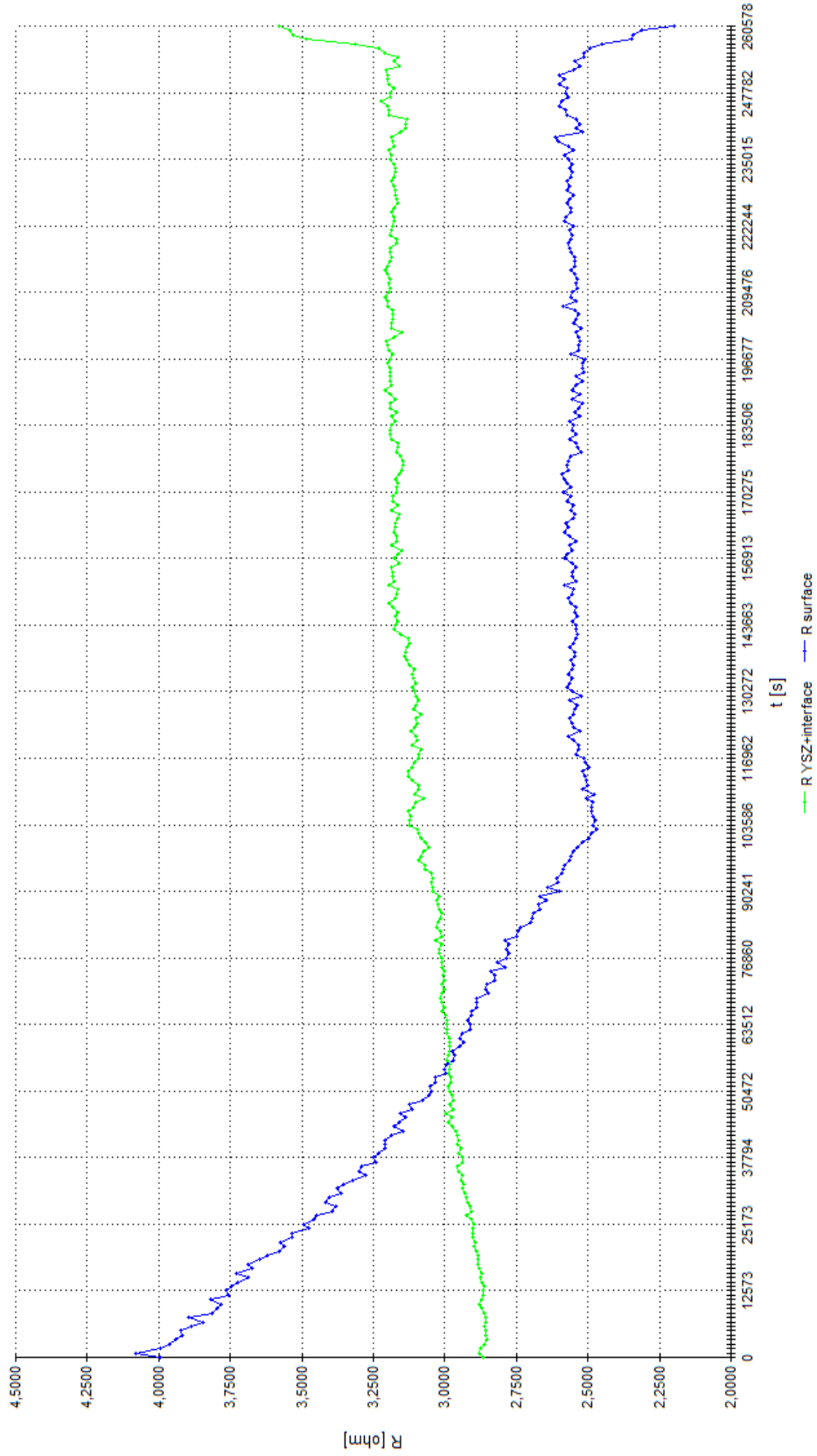


Abbildung 24:  
Diagramm III zu JJ022A

### 4.2.3 Einfluss der Herstellung.

Wie in 3.2.3.1 beschrieben wird, wird LSC mit Hilfe des PLD Verfahrens auf eine YSZ Schicht aufgetragen. Dabei lassen sich einige Parameter verändern:

- 1) die Zeit: wie lange das Substrat in der Maschine verbleibt
- 2) die Temperatur: bei welcher Temperatur beschichtet wird
- 3) der Sauerstoff: bei welcher Konzentration von Sauerstoff das LSC aufgetragen wird

Um den Einfluss von 1) und 2) auf die Widerstände zu untersuchen wurden Proben bei unterschiedlicher Temperatur unterschiedlich lange hergestellt. Danach wurde die Impedanz mehrerer Elektroden auf dem Plättchen gemessen und der Mittelwert der verschiedenen Widerstände sowie die dazugehörige Standardabweichung (als Maß für die Beständigkeit der Proben) berechnet.

#### 4.2.3.1. Die Proben JJ031-JJ036

##### **JJ031C**

Hat die Zusammensetzung  $(La_{0,6};Sr_{0,4})CoO_3$ . Die Probe wurde bei 520 °C für 5min beschichtet und bei 600 °C charakterisiert. Die Schichtdicke beträgt 40nm.

Die Impedanz von 4 Mikroelektroden wurde jeweils 2-mal gemessen.

<i>Widerstand</i>	<i>Mittelwert [ohm.cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Standardabweichung</i>
YSZ	1,67	0,069
Interface	0,47	0.021
Surface	2,68	0,168

##### **JJ032A**

Hat die Zusammensetzung  $(La_{0,6}Sr_{0,4})CoO_3$ . Die Probe wurde bei 500 °C für 10min beschichtet und bei 660 °C charakterisiert. Die LSC-Schicht ist 80 nm hoch.

Die Impedanz von 4 Mikroelektroden wurde jeweils 1-mal gemessen



<i>Widerstand</i>	<i>Mittelwert [ohm.cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Standardabweichung</i>
YSZ+Interface	1,34	0,24
Surface	0,24	0,69

Auffallend bei dieser Probe ist, dass der Widerstand des Substrats und der Widerstand des Zwischenraums zwischen Substrat und Kathode auf dem Spektrum nicht unterscheidbar waren. Über die Gründe für dieses Verhalten herrscht derzeit noch Unklarheit, möglicherweise liegt das Problem bei der Messmethode, da mit der Impedanzspektroskopie keine sehr kleinen Widerstände gemessen werden können.

### **JJ033A**

Hat die Zusammensetzung  $(La_{0,6}Sr_{0,4})CoO_3$ . Die Probe wurde bei 500 °C für 20min beschichtet und hat eine Schichtdicke von 160nm. Die Impedanz von 3 Mikroelektroden wurde zuerst jeweils 2-mal bei 625 °C gemessen

In der zweiten Messreihe wurde die Impedanz einer Mikroelektrode 2-mal bei 650 °C gemessen

Zuletzt wurde die Impedanz einer Mikroelektrode 2-mal bei 660 °C gemessen

<i>Widerstand</i>	<i>Mittelwert [ohm.cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Standardabweichung</i>
YSZ+Interface	2,62	0,53
Surface	1,47	0,69

Auch bei dieser Elektrode lassen sich die Widerstände nicht unterscheiden, über die Gründe für dieses Verhalten herrscht gänzliche Unklarheit, da hier die Widerstände groß genug wären, um sie getrennt anzuzeigen.

### **JJ034A**

Hat die Zusammensetzung  $(La_{0,6}Sr_{0,4})CoO_3$ . Die Probe wurde bei

730 °C für 5 min beschichtet und bei 600 °C charakterisiert Die Schichtdicke beträgt 40nm.

Die Messung der Impedanz erfolgte jeweils 2 Mal an 7 Mikroelektroden.

<i>Widerstand</i>	<i>Mittelwert [ohm.cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Standardabweichung</i>
YSZ+Interface	1,46	0,54
Surface	304,05	12,42

Auch bei dieser Elektrode lassen sich die Widerstände nicht unterscheiden, die Ursache könnte bei der Messmethode liegen, das Verhalten ist aber noch nicht gänzlich erforscht (siehe JJ032A)

### **JJ035A**

Hat die Zusammensetzung  $(La_{0,6}Sr_{0,4})CoO_3$  . Die Probe wurde bei 730 °C für 10 min beschichtet, hat eine Schichtdicke von 80nm und wurde bei 600 °C charakterisiert

Die Impedanz von 4 Mikroelektroden wurde jeweils 2mal gemessen.

<i>Widerstand</i>	<i>Mittelwert [ohm.cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Standardabweichung</i>
YSZ	1,76	0,046
Interface	0,32	0,031
Surface	2,55	0,329

### **JJ036A**

Hat die Zusammensetzung  $(La_{0,6}Sr_{0,4})CoO_3$  . Die Probe wurde bei 730 °C für 20 min beschichtet und bei 600 °C charakterisiert

Die Schichtdicke beträgt 160nm.

Die Impedanz von 6 Mikroelektroden wurde jeweils 2-mal gemessen.

<i>Widerstand</i>	<i>Mittelwert [ohm.cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Standardabweichung</i>
-------------------	--	---------------------------

YSZ+Interface	3,16	0,2
Surface	19964,20	10729,21

Auch hier verschmelzen die Widerstände von Substrat und Zwischenraum miteinander, und die Ursachen sind auch hier gänzlich unbekannt (siehe JJ033A). Weiters auffallend ist aber der große Wert der Oberflächenwiderstände sowie die enormen Schwankungen denen die Widerstände unterliegen)

↳ Beobachtungen (dargestellt in Abbildung 25):

Am auffälligsten ist wohl, dass es nur bei zwei von sechs Proben einen eindeutig zu bestimmenden Widerstand für das Substrat gibt. Die anderen Widerstände für Substrat und Zwischenraum verschmolzen ineinander und wurden im Diagramm dementsprechend auch als ein Balken gezeigt. Außerdem ist zu beobachten, dass die größten Oberflächenwiderstände bei den Proben auftraten, die bei der höchsten Temperatur hergestellt wurden. Auch bezüglich der Schichtdicke lässt sich eine Prognose stellen: die optimale Dicke scheint um die 80nm zu liegen. Bei den dünneren wie auch bei den dickeren Schichten wurden höhere Widerstände gemessen.

Widerstand JJ031-JJ036  
[ohm.cm<sup>2</sup>]

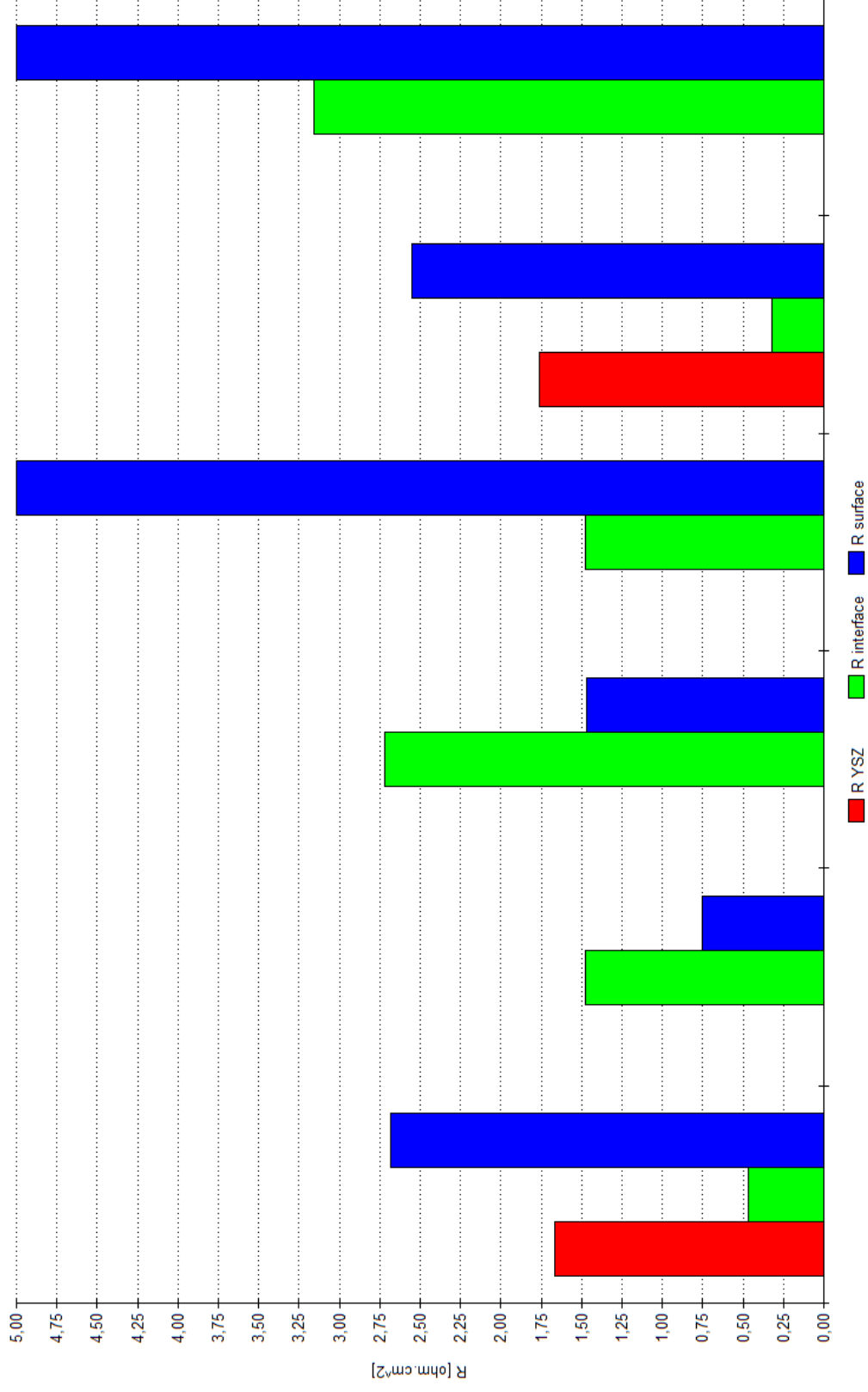


Abbildung 25:  
Diagramm zu  
JJ031C  
JJ032A  
JJ033A  
JJ034A  
JJ035A und  
JJ036A (von links)

## 5. Resümee und Ausblick

### 5.1 Ausblick

Bei Brennstoffzellen kann die Verbrennungsenergie der Brennstoffe theoretisch zu 100% in elektrische Energie umgewandelt werden. In der Praxis wird heute eine Umwandlungsquote von 60%-70% erreicht, was aber immer noch fast doppelt so viel ist, wie bei normalen Kraftwerken freigesetzt wird<sup>29</sup>

LSC findet in der SOFC Verwendung, daher soll ein kleiner Ausblick über die Verwendung der SOFC gegeben werden. Die SOFC ist eine Brennstoffzelle, die sehr robust und nutzerfreundlich ist. Sie verträgt Schwefelsäure besser als jeder andere Brennstoffzellentyp und ist daher besonders geeignet für ihren Betrieb mit Erd- Bio und Kohlegas, da diese Stoffe üblicherweise einen gewissen Schwefelgehalt aufweisen, der auch durch Entschwefelung nicht sofort vollständig entfernt werden kann. Eine wichtige Art der Verwendung ist der Einsatz der SOFC als Kraftwerk, an dem von verschiedenen Seiten intensiv geforscht wird. Dabei kann die entstehende Wärme (Abwärme) als Nah- oder Fernwärme genutzt werden oder in einen nachgeschalteten Gas- und Dampfturbinenprozess gespeist werden, der bereits heute 65% Wirkungsgrad (mit möglichen Steigerungen) erreicht. Als Vergleich: mit herkömmlichen kalorischen Kraftwerken wird ein Wirkungsgrad von 35%-40% erzielt.

Auch im KFZ Bereich sind Anwendungen der SOFC denkbar: BMW und Delphi Automotive Systems erforschen die SOFC als Ersatz für den herkömmlichen Bleiakкумуляtor im Auto. Mit der SOFC könnten nämlich einige progressive Anwendungen ermöglicht werden: Klimaanlage bei stehendem Motor, elektrisches Bremsen sowie elektrisches Lenken. Dazu muss jedoch die Betriebstemperatur gesenkt werden, da das Aufheizen auf eine Betriebstemperatur von 800°C 2 Liter Benzin verbraucht.<sup>30</sup>

Damit wäre auch der größte (derzeitige) Nachteil der SOFC angesprochen:

---

<sup>29</sup> Mortimer, Charles E.: Chemie; 7. Auflage - Stuttgart: Thieme Verlag, Jahr, S373

<sup>30</sup> Kurzweil, 2003, S185-187

Die Betriebstemperatur. Diese zu senken ist vorrangiges Ziel der Forschung, ein Ziel zu dessen Erlangung LSC eine wichtige Rolle spielen könnte. Die Widerstandsmessungen wurden alle bei ca. 600 °C durchgeführt und an weiteren Senkungen der Temperatur wird gearbeitet. Diese Temperatursenkung ist auch wichtig, weil die in der SOFC verwendeten Materialien bei zu hohen Temperaturen schnell sehr große Widerstände aufweisen.

## 5.2. Resümee

In dieser Fachbereichsarbeit wurde mit LSC ein Material in seiner Eigenschaft als Kathode eines elektrochemischen Elements vorgestellt, bei dem es sich um eines der vielversprechendsten und zukunftssträchigsten Materialien (überhaupt) handelt. Seine elektrischen Eigenschaften wurden aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet und auch auf den Herstellungsprozess wurde eingegangen. Dabei besonders faszinierend ist, wie sehr kleine Änderungen in der atomaren Zusammensetzung in der Anwendung eine große Rolle spielen können. Auch der enorme Aufwand, der hinter der Herstellung und Erforschung moderner Materialien steht, angefangen bei den theoretischen Vorkenntnissen bis hin zur schlussendlichen Herstellung sollte gezeigt werden.

LSC weist viele Eigenschaften auf, die es zu einem so erforschenswertem Material machen, aber selbstverständlich tauchen immer wieder Probleme mit dem Material und seinem Verhalten auf. Diese sollten jedoch absichtlich nicht verschwiegen werden, da es sich bei dieser Arbeit um keine endgültige Zusammenfassung über den Gebrauch von LSC in der Hochtemperaturbrennstoffzelle handelt, sondern vielmehr um einen Forschungsbericht, der vielleicht sogar bald überholt sein wird, da ständig neue Erkenntnisse gemacht werden.

Ein Punkt, der an dieser Stelle betont werden sollte ist, dass bei diesem Themenbereich die Chemie aus der ihr üblicherweise zugeschriebenen Rolle fällt: normalerweise wird sie als eine Wissenschaft betrachtet die -bei all ihrer Nützlichkeit- einen großen Beitrag zur Umweltzerstörung leistet. Doch hier ist eines klar zu erkennen: Mit Hilfe der Chemie werden neue,

saubere, Energiequellen erforscht und verbessert, um nicht nur dem Menschen kurzfristig zu helfen, sondern auch langfristig die Umwelt zu schonen und für uns zu erhalten.

Auch ein persönliches Resümee zu ziehen scheint mir angebracht zu sein: Ich habe durch meine Arbeit an der Technischen Universität Wien einen großen Einblick in die Forschung gewonnen, der zu einer unschätzbaren Erfahrung wurde. Forschung hautnah mitzuerleben war für mich ein regelrechter Motivationsschub und die Arbeit mit den Menschen in der Forschungsgruppe war mir eine große Motivation für mein Studium und meine anschließende Berufslaufbahn.

Die Fachbereichsarbeit hat mir die Gelegenheit gegeben mich an das wissenschaftliche Arbeiten zu gewöhnen, an das Zitieren und den wissenschaftlichen Ton.

Alles in allem war es mir eine Freude und eine Bereicherung an diesem Thema zu arbeiten.

## 6. Quellenangaben

### 6.1. Literatur

Magyar, Roderich; Liebhart, Wolfgang; Jelinek, Gabriela: EL-MO. Elemente - Moleküle. 1. Auflage. - Wien: öbvhpt Verlagsgmbh&Co.KG, 2007, S72

Microsoft® Encarta® Enzyklopädie 2002. © 1993-2001 Microsoft Corporation

Mortimer, Charles E.:Chemie; 7.Auflage -Stuttgart: Thieme Verlag, Jahr, S373

Kurzweil, Peter: Brennstoffzellentechnik, 1. Auflage -Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2003, S172

J. F. Shackelford. *"Werkstofftechnologie für Ingenieure"*. 6.Auflage. - München: Pearson Studium, 2005, S109

Fleig, Habilitation thesis, *"Electrical and Electrochemical Investigations of Inhomogeneities in Solid State Ionics"* - Stuttgart: Fakultät für Naturwissenschaften der Universität Ulm, (Max-Planck-Institut für Festkörperforschung ) 2002

*E. Riedel. "Anorganische Chemie", 4 Auflage -New York, Berlin :de Gruyter, 1999,*

Opitz Alexander, Diplomarbeit: *„Die Kinetik der O<sub>2</sub>-Reduktion an mikrostrukturierten Platinschichten auf Yttrium-Stabilisiertem ZrO<sub>2</sub>“*, Inst. f. Chemische Technologien und Analytik der TU-Wien, 2008,



## 6.2. Abbildungen

Abbildung 1	Nach: Magyar, Roderich; Liebhart, Wolfgang; Jelinek, Gabriela: EL-MO. Elemente -Moleküle. 1. Auflage. - Wien: öbvhpt Verlagsgmbh&Co.KG, 2007; S 73-75
Abbildung 2	
Abbildung 3	
Abbildung 4	Eigenerstellung
Abbildung 5	Nach: J. F. Shackelford. "Werkstofftechnologie für Ingenieure". 6.Auflage. -München: Pearson Studium, 2005; S 160-161
Abbildung 6	
Abbildung 7	
Abbildung 8	
Abbildung 9	Opitz Alexander, Diplomarbeit: „Die Kinetik der O <sub>2</sub> -Reduktion an mikrostrukturierten Platinschichten auf Yttrium-Stabilisiertem ZrO <sub>2</sub> “, Inst. f. Chemische Technologien und Analytik der TU-Wien, 2008; S30
Abbildung 10	Eigenerstellung
Abbildung 11	Eigenerstellung
Abbildung 12	Eigenerstellung
Abbildung 13	nach: Opitz Alexander, Diplomarbeit: „Die Kinetik der O <sub>2</sub> -Reduktion an mikrostrukturierten Platinschichten auf Yttrium-Stabilisiertem ZrO <sub>2</sub> “, Inst. f. Chemische Technologien und Analytik der TU-Wien, 2008, S37-38
Abbildung 14	
Abbildung 15	
Abbildung 16	
Abbildung 17	
Abbildung 18	
Abbildung 19	nach: Opitz Alexander, Diplomarbeit: „Die Kinetik der O <sub>2</sub> -Reduktion an mikrostrukturierten Platinschichten auf Yttrium-Stabilisiertem ZrO <sub>2</sub> “, Inst. f. Chemische Technologien und Analytik der TU-Wien, 2008
Abbildung 20	Eigenerstellung
Abbildung 21	Eigenerstellung
Abbildung 22	Eigenerstellung
Abbildung 23	Eigenerstellung
Abbildung 24	Eigenerstellung
Abbildung 25	Eigenerstellung

### 6.3. Mündliche Quellen:

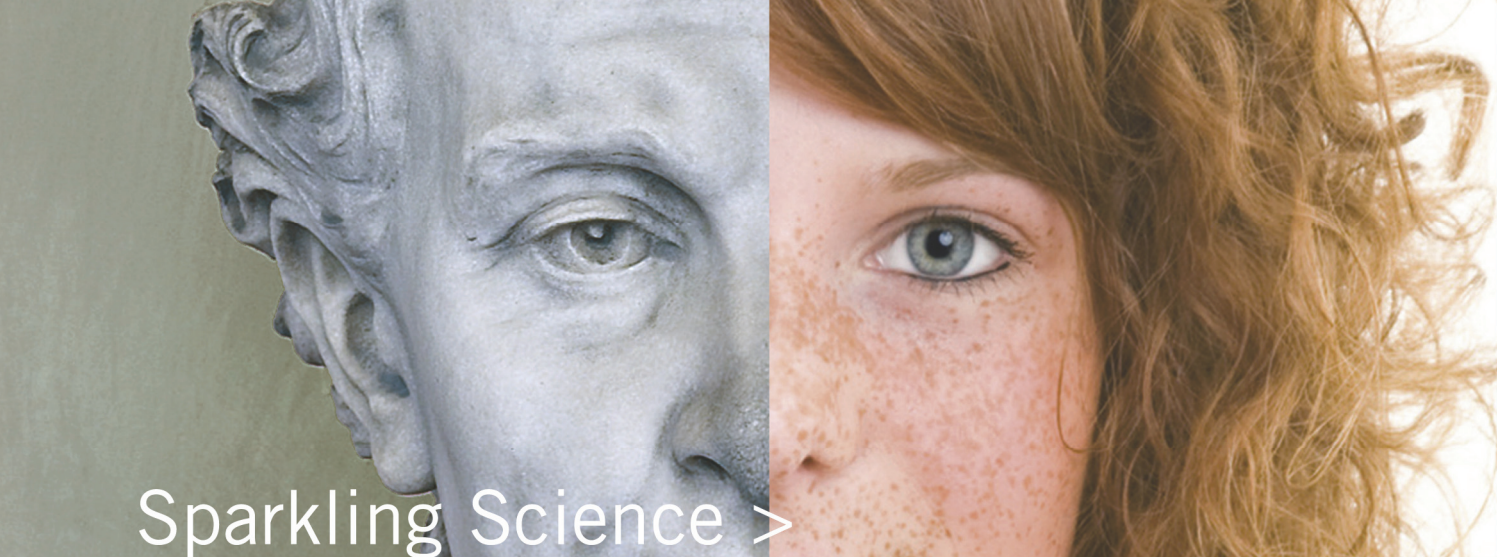
Dipl-ing Judith Januschefsky  
Dipl-Ing Alexander Opitz  
Univ-Prof Jürgen Fleig

## 7. Dank

Ich möchte mich besonders bei Alexander Opitz bedanken, dem ich sicherlich oft auf die Nerven gefallen bin, der mir aber trotzdem immer alles nicht Verstandene erklärt hat. Auch Judith Januschefky, der ich sicher nicht weniger lästig war gilt mein großer Dank.

Weiters möchte ich mich bei der Gesamten Chemischen Fakultät der TU Wien für die Gelegenheit des Praktikums bedanken, insbesondere bei Professor Mihovilovic, dem Initiator, und Professor Jürgen Fleig, dem Leiter der Abteilung für Elektrochemie.

Zuletzt natürlich gilt mein großer Dank meine Chemielehrerin Dr. Niel, ohne die ich nichts von diesem Projekt erfahren hätte, und meinen Eltern, die mich immer unterstützt haben



Sparkling Science >  
Wissenschaft ruft Schule  
Schule ruft Wissenschaft

oead 

[www.bmwf.gv.at](http://www.bmwf.gv.at)  
[www.sparklingscience.at](http://www.sparklingscience.at)

BMWF<sup>a</sup>

Bundesministerium für Wissenschaft  
und Forschung