

Protokoll zum „verfahrenstechnischen Labor“

ELEKTRODENFERTIGUNG

Gruppen- Nr. : _____

Erteiltes Thema : _____

Datum der Abgabe : _____

Institut : iPAT

Betreuer : Gerrit Schälicke, Eike Wiegmann, Daniel Vogt

Ansprechpartner der Gruppe für dieses Protokoll

Name : _____

E-Mail : _____

Mit meiner Unterschrift erkläre ich, dass ich mit dem gesamten Inhalt des Protokolls einverstanden bin und den Leitfaden zur Protokollerstellung beachtet habe.

Name	Vorname	Matrikel-Nr.	Studiengang	Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

I	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	4
II	Einleitung	5
III	Literaturrecherche	6
1	Analysemethoden in der Batterieverfahrenstechnik	6
1.1	XPS methode bei der Untersuchung des Kathodenmaterials LiCoO_2	6
1.1.1	XPS Methode	6
1.1.2	Charakterisierung	7
1.1.3	Ergebniss	7
1.2	Modellparametrierung durch EIS	9
1.2.1	EIS Methode	9
1.2.2	Einfaches Ersatzschaltbildmodell	10
1.2.3	Modellparametrierung	11
2	Einfluss der Trocknung der lösungsmittelhaltigen Beschichtung	13
2.1	Temperatur	13
2.2	Massebeladung	14
2.3	Düsengeschwindigkeit / Luftstrom	15
2.4	Trocknungsgrad	15
IV	Material und Methoden	16
3	Versuchsmaterial	16
4	Versuchsschritte	17
V	Auswertung der Laborversuche	18
5	Rohdaten	18
6	Datenverarbeitung	18
6.1	Flächengewicht	18
6.2	Beschichtungsdicke	19
6.3	Haftfestigkeit	19

7	Ergebnisse und Diskussion	21
7.1	Flächengewicht	21
7.2	Beschichtungsdicke	22
7.3	Haftfestigkeit	23
VI	Zusammenfassung	24
VII	Literaturverzeichnis	25
VIII	Anhang	26
8	Quelltexten	26
8.1	Teil Flächengewicht	26
8.2	Teil Beschichtungsdicke	26
8.3	Teil Haftfestigkeit	27

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
RS	Rakelspalt	μm
m_{Stl}	Gewicht des Stanzlings	μg
Symbol	Bedeutung	Einheit
A_0	Fläche des Stanzlings	cm^2
m_i	Gewicht von $Probe_i$	μg
\overline{m}	Mittelwert von m_i	μg
σ_m	Standardabweichung von m_i	μg
ρ_i	Flächengewicht von $Probe_i$	$\mu g/cm^2$
$\overline{\rho}$	Mittelwert von ρ_i	$\mu g/cm^2$
σ_ρ	Standardabweichung von ρ_i	$\mu g/cm^2$
$h_{Sch.,i}$	Schichtungsdicke von $Probe_i$	μm
$\overline{h_{Sch.}}$	Mittelwert von $h_{Sch.,i}$	μm
$\sigma_{h_{Sch.}}$	Standardabweichung von $h_{Sch.,i}$	μm
$h_{Besch.}$	Beschichtungsdicke von $Probe_i$	μm
$\overline{h_{Besch.,i}}$	Mittelwert von $h_{Besch.}$	μm
$\sigma_{h_{Besch.}}$	Standardabweichung von $h_{Besch.}$	μm
$h_{Sub.}$	Substratdicke	μm
$F_{min,i}$	Abrisskraft von $Probe_i$	N
$\overline{F_{min}}$	Mittelwert von F_{min}	N
$\sigma_{F_{min}}$	Standardabweichung von F_{min}	N
$\sigma_{Zug,max,i}$	Maximale Zugspannung von $Probe_i$	kPa
$\overline{\sigma_{Zug,max}}$	Mittelwert von $\sigma_{Zug,max,i}$	kPa
$\sigma_{\sigma_{Zug,max}}$	Standardabweichung von $\sigma_{Zug,max,i}$	kPa

Teil II

Einleitung

Literaturrecherche

1 Analysemethoden in der Batterieverfahrenstechnik

1.1 XPS methode bei der Untersuchung des Kathodenmaterials LiCoO₂

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Eigenschaften des Kathodenmaterials LiCoO₂ beschrieben, welches mittels photoelektronenspektroskopie(XPS) hergestellt wurde.

1.1.1 XPS Methode

XPS basiert darauf, dass Elektronen aus gebundenen Zuständen in das Vakuum emittiert werden, wenn elektromagnetische Strahlung auf sie einwirkt. Aus der Energie der emittierten Elektronen kann dabei auf die Bindungszustände der Probe geschlossen werden.

Hier trifft Röntgenstrahlung der Energie $h\nu$ auf eine Probe. Die Röntgenstrahlung wird dabei entweder durch die monochromatisierte Röntgenbremsstrahlung von Aluminium, durch Helium-Gasentladung oder durch Synchrotronstrahlung erzeugt. Hierbei bietet das Synchrotron die Möglichkeit, die Energie frei zu variieren, während bei den anderen Methoden nur bestimmte, diskrete Anregungsenergien zur Verfügung stehen. Diese Strahlung emittiert ein Elektron aus der Probe, von wo es dann über einen Analysator energiedispersiv aufgelöst und an einem Channeltron detektiert wird. Aus der Energie der emittierten Elektronen kann anschließend die Bindungsenergie gewonnen werden.

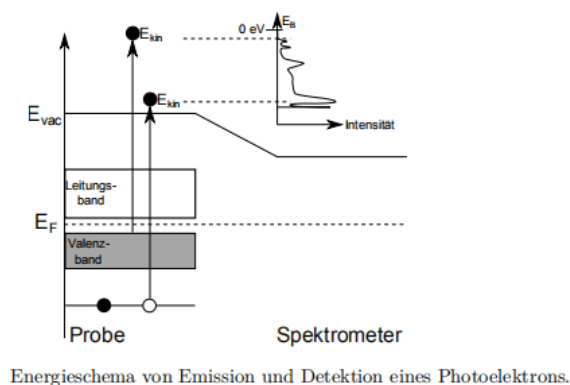


Abbildung 1

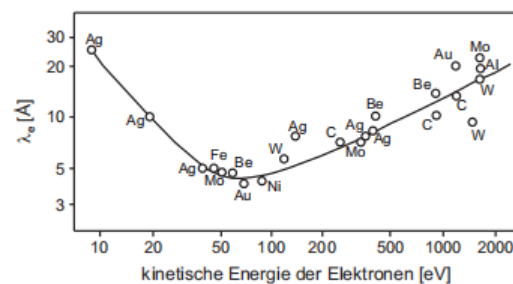


Abbildung 2

1.1.2 Charakterisierung

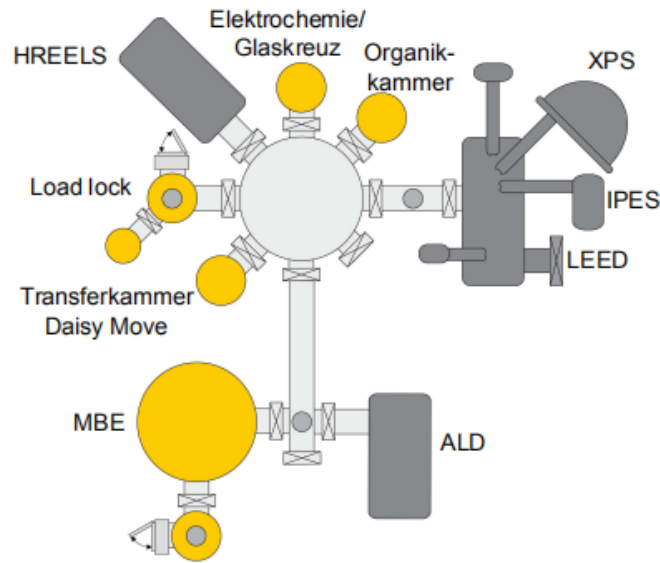


Abbildung 3

Für beide XPS-Messsysteme wurde zur Kalibrierung eine metallische Silberprobe vermessen. Die Messdaten wurden anschließend anhand der Verschiebung der Fermikante korrigiert. Ein Fit mit der Fermifunktion:

$$A \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \Delta E}{k_B T}\right) + 1} \quad (1)$$

Für die Auswertung der gemessenen Spektren wurde der Untergrund in Form einer Shirley Funktion [100] abgezogen. Für die Fits wurde eine Gauß-Lorentz-Funktion mit einem konstanten Lorentz-Anteil von 30 Prozent ($m = 0,3$) verwendet, da dieses Verhältnis die Messdaten am besten widerspiegelte:

$$\frac{\exp\left(-4 \ln 2 (1 - m) \frac{(x - E)^2}{w^2}\right)}{1 + 4m \frac{(x - E)^2}{w^2}} \quad (2)$$

1.1.3 Ergebniss

In Abbildung 3-4 ist eine Übersicht von XP-Spektren der gesputterten LiCoO₂ Schichten gezeigt, welche mit verschiedenen Anregungsenergien gemessen wurde: Hier werden für Lithium, Cobalt, Sauerstoff und dem Valenzband Messungen mit einer Aluminium-Röntgenquelle sowie Messungen am Synchrotron gezeigt, wo die Proben oberflächensensitiv vermessen wurden.

Im Co2p Spektrum können zwei Hauptemissionen bei 779,8 eV und 794,7 eV beobachtet werden. Hier kann eine Komponente, die verglichen zur Hauptkomponente um 1,1 eV zu höheren Bindungsenergien verschoben ist, der Oxidationsstufe 2+ zugeordnet werden, eine Komponente mit Abstand von 6,0 eV der Oxidation 4+ und eine Komponente mit Abstand von 9,5 eV der Oxidationsstufe 3+ . Da die Cobaltspek-

tren nur eine Komponente im Abstand von 9,5 eV zeigen, kommt im Wesentlichen nur die Oxidationsstufe 3+ vor, wie dies für stöchiometrisches LiCoO₂ erwartet wird.

Im Sauerstoffspektrum gibt es zwei Komponenten bei 529,5 eV und 531,3 eV. Bei 531,3 eV ist in den Messungen am Synchrotron deutlich intensitätsstärker. Diese Komponente wird hauptsächlich auf Atome an der Oberfläche zurückgeführt, die eine unterschiedliche Ladung im Vergleich zu den Atomen im Festkörper besitzen.

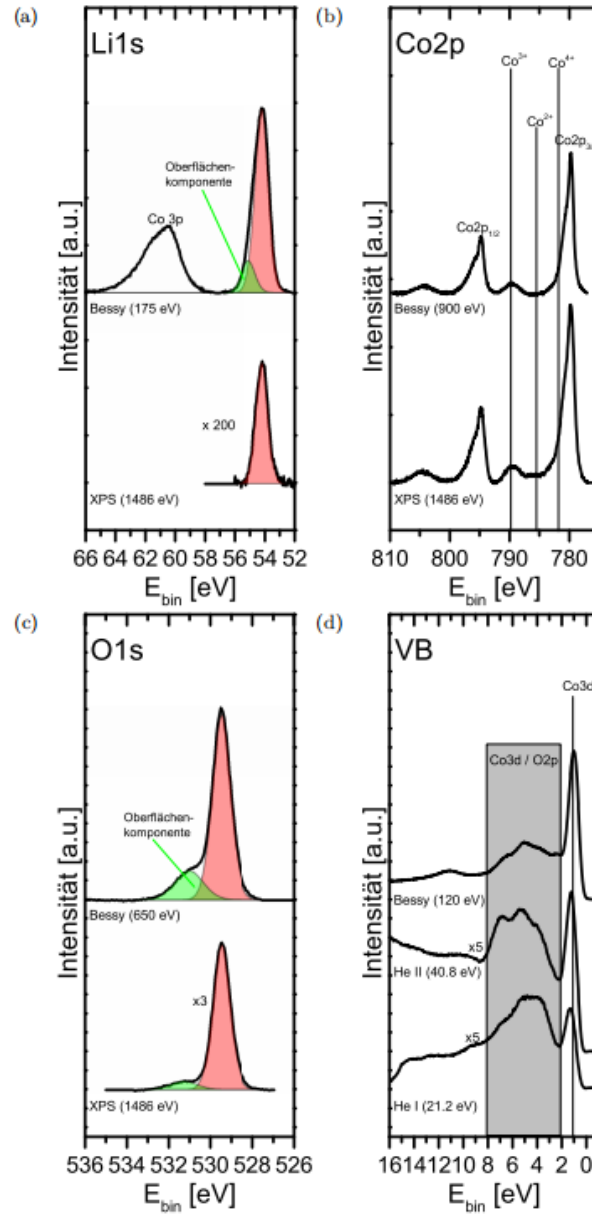


Abbildung 4

Für das Valenzband von LiCoO₂ wurden UPS-Messungen mit zwei Anregungsenergien (He I: 21,2 eV, He II: 40,8 eV) durchgeführt. Durch die unterschiedlichen Wirkungsquerschnitte bei den verschiedenen Anregungsenergien unterscheiden sich Form und Intensität dieser Spektren.

Tabelle 1

	LiCoO ₂	Li ₂ O	Li ₂ CO ₃
Target	LiCoO ₂	Li ₂ O	Li ₂ O
Kammer	Anode	Anode	Elektrolyt
Druck	8·10 ⁻³ mbar	8·10 ⁻³ mbar	1·10 ⁻² mbar
Fluss Argon	6sccm	10sccm	0sccm
Fluss Sauerstoff	6sccm	0sccm	0sccm
Fluss Stickstoff	0sccm	0sccm	0sccm
Fluss Kohlenstoffdioxid	0sccm	0sccm	8sccm
Temperatur	550°C	300°C	300°C
Abstand	6,3cm	6,3cm	6,8cm
Leistung	50W	50W	50W

1.2 Modellparametrierung durch EIS

1.2.1 EIS Methode

Meist benutzen wir die elektrochemische Impedanzspektroskopie(EIS), um den Wechselstromwiderstand von der elektrochemischen Systeme zu bestimmen.

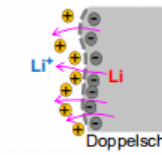
Da müssen wir zuerst einen ESB annehmen. Einfache ESB-Modelle zur Beschreibung des Innenwiderstands.Transportprozesse und Reaktionen in der Zelle sind verlustbehaftet und tragen zum Innenwiderstand der Zelle bei

Es gibt drei Verlustpfade in Lithium-Ionen Zellen:

1. Ladungstransfer elektrochemische Reaktionen am Übergang Elektrode/Elektrolyt
2. ohmsch ionische/elektronische Leitung in Elektrolyt und Elektroden
3. Diffusion diffusiver Stofftransport von Reaktanden und Reaktionsprodukten

Ladungstransfer

elektrochemische Reaktionen am Übergang Elektrode/Elektrolyt



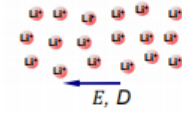
$$j = j_0 \cdot \left(e^{\frac{\alpha \cdot z \cdot F}{RT} \eta_{ct}} - e^{\frac{(\alpha-1) \cdot z \cdot F}{RT} \eta_{ct}} \right)$$

Butler Volmer Gleichung

$$\frac{1}{C_{dl}} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{diff}}$$

ohmsch

ionische/elektronische Leitung in Elektrolyt und Elektroden



$$j = \sigma \cdot E$$

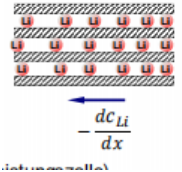
$$\eta_{\Omega} = R_{\Omega} \cdot I$$

ohmsches Gesetz

$$C_{diel} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Diffusion

diffusiver Stofftransport von Reaktanden und Reaktionsprodukten



$$J = -D_{Li} \cdot \frac{dc_{Li}}{dx}$$

$$\eta_{diff} = \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{c_{Li,el}}{c_{Li}}$$

Diffusions- und Nernst-Gleichung

$$C_s = \frac{dc_{Li}}{d\phi}$$

Abbildung 5

1.2.2 Einfaches Ersatzschaltbildmodell

Für verschiedene Arten von Widerstand in der Batterie können wir die folgende Grundstruktur vereinfachen. Beispiel:

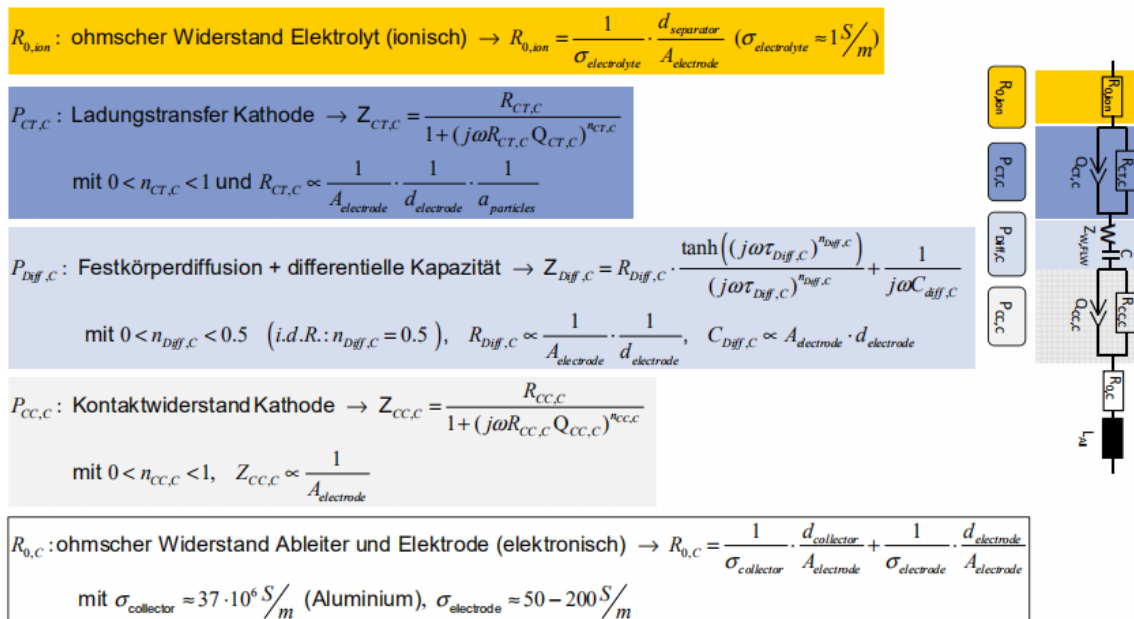


Abbildung 6

Wir wissen, dass in verschiedenen Anwendungen Zellen mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgewählt werden sollten. Dünne Elektroden kann besser n bei kurze Transportwege in den kleineren Elektroden angewandt werden. Dicke Elektroden haben größere Elektrodenvolumen : Batterievolumen Verhältnisse, welcher zur große Menge von Speicherung möglich führen. Durch das REM können wir den Unterschied in der Mikrostruktur der Zellen in verschiedenen Anwendungen sehen.

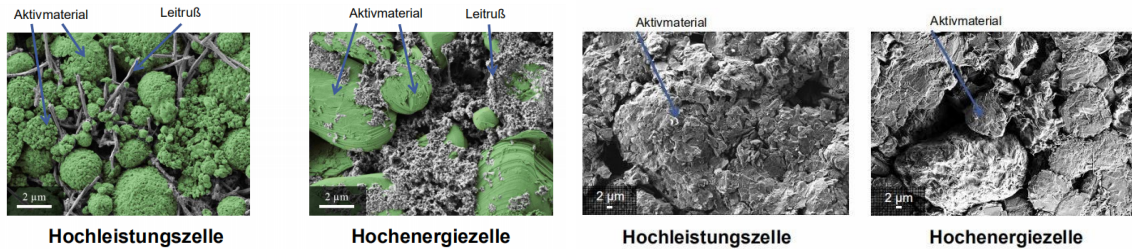


Abbildung 7

1.2.3 Modellparametrierung

Messung des Potentialverlaufs $\varphi(r) = f(r, \sigma_{el}, eff)$ und Maßder Fit Bewährte behördliche Leitfähigkeit und Kontaktwiderstand. Beim Untersuchung benutzen wir einzelner Elektroden in Experimentalzellen Öffnung & Präparation kommerzieller Lithium-Ionen Batterien. Dann können wir einige Impedanzspektren von Anode bzw Kathode erstellen.

Beispiel: Ni_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2} Kathode

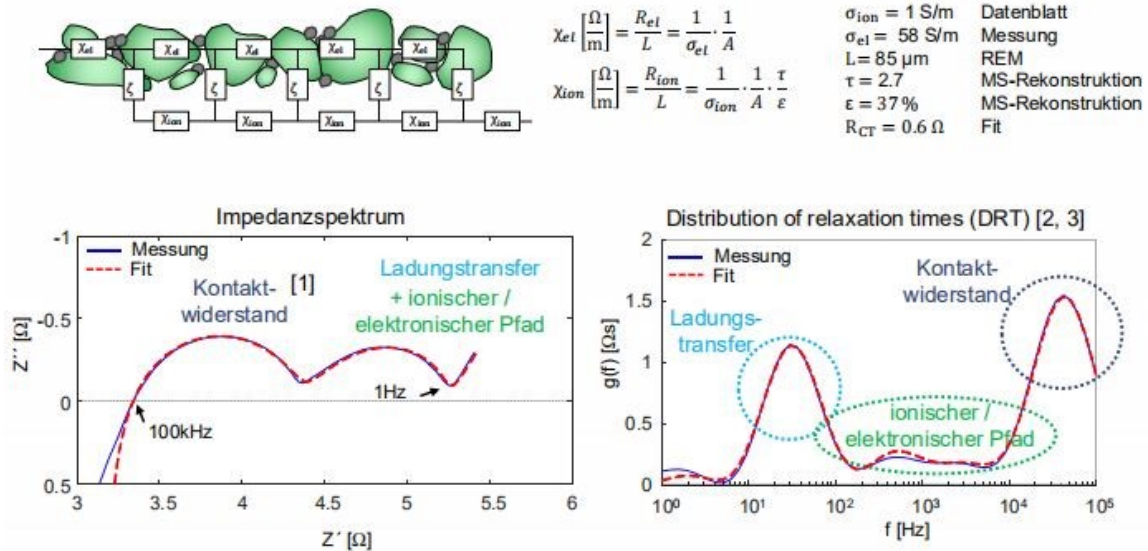


Abbildung 8

Durch Anpassen an den tatsächlichen Wert können wir das ESB der Elektrode durch die vorhergesagte Modelltopologie ableiten.

Quantifizierung der : Voxel insgesamt Mikrostrukturparameter

1. Vergleich von Strukturen
2. Einsatz in homogenisierten
3. Modellen

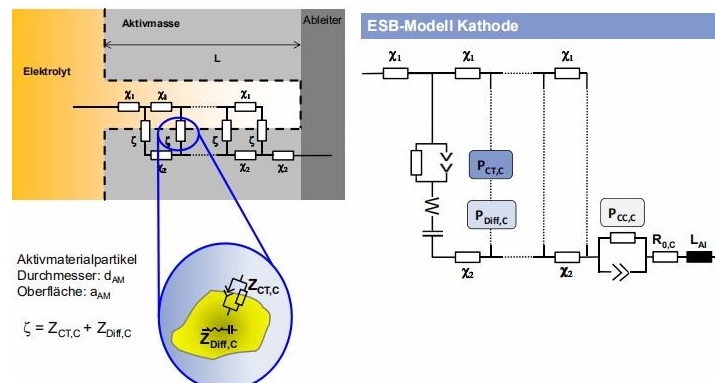


Abbildung 9

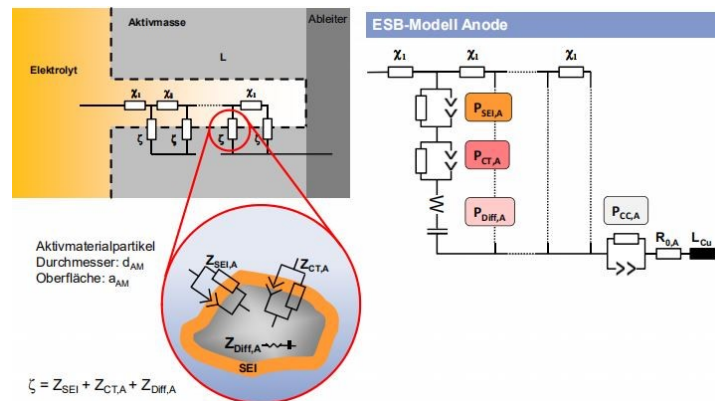


Abbildung 10

2 Einfluss der Trocknung der lösungsmittelhaltigen Beschichtung

In der Verfahrenstechnik für den Produktion der Batterie werden wesentliche 2 Teile umfasst. Der erste Teil ist die Elektrodenproduktion, welche einschließlich Suspensionsherstellung, Beschichten/Trocknen und Kalandrieren. Die zweiten Teile ist Zellproduktion. Es handelt sich um Konfektionierung, Herstellung Elektrodenpackage und Kontaktierung und Einhausung. Die Trocknung spielt ein wichtiges Rollen in der Prozesskette, weil Schichtmorphologie und die Eigenschaften der Elektrode in der Batteriezelle durch Trocknungsprozess beeinflusst werden. Das Ziel der Trocknung ist zur Entfernung des Lösemittels bei vergleichsweise hohen Lösemittelanteilen in der Größenordnung von 40 – 60Gew.-%, welche bezogen auf die Gesamtslurrymasse. [X1] In der Folgenden werden über den Einfluss der Beschichtungs- und Trochnungsprozessschritte beschreiben.

2.1 Temperatur

Nach der Suspensionsherstellung kommt es zu den Beschichtungs- und Trocknungsprozess. Während dieser Prozess wird die vorbereitete Suspension auf das Substrat aufgebracht. Um eine feine Schicht zu entstehen ist den Einfluss von Trocknungstemperatur zu beachten. Abb.3.1 zeigt die Verteilung des Verhältnisses von elastisch zu total für unterschiedliche Trocknungstemperaturen. Eine beobachtete Erhöhung entsteht nach dem Mittelwert des Verhältnisses mit steigender Temperatur. Dies ist ein Ergebnis des Anstiegs bei der Entmischung des Bindemittels und sind der Ruß verantwortlich für die Elastizität in einer Elektrode. Daher ist die höhere Bindemittelkonzentration an der Elektrodenoberfläche auf die Erhöhung des elastischen Verhaltens zurückzuführen. [X1]

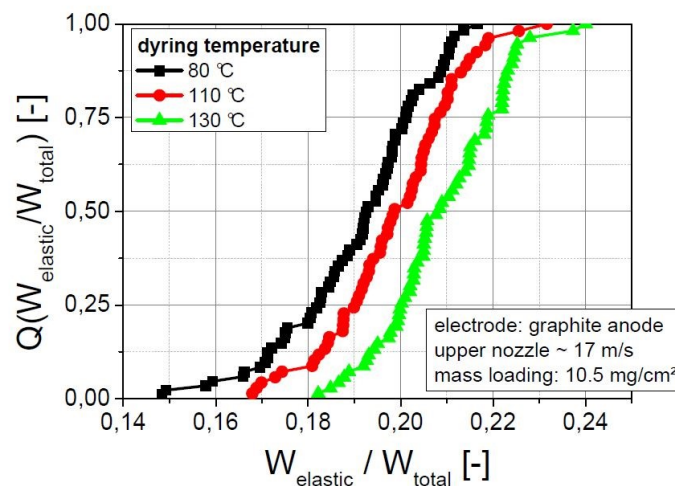


Abbildung 11

Außerdem hat die Trockentemperatur ein Einfluss auf den Haftkraft der Beschichtung auf dem Substrat. Ein aus Experiment resultierende Abbildung mit unkalandrierten Elektrodenschichten zeigt, dass die Haftkraft mit steigender Temperatur abnimmt. Der Haftung zwischen den Partikeln und an der Substratfolie für die Leistung der Batteriezelle hat eine große Bedeutung. Delamination zwischen Aktivmaterialschicht und Stromleiter senkt die Leistungsfähigkeit der Batterie. Das ablösende einzelne Aktivmaterialpartikel

bzw. größere Aktivmaterialdomänen kann einer deutlichen Absenkung der verfügbaren Zellkapazität zur Folge. [X2]

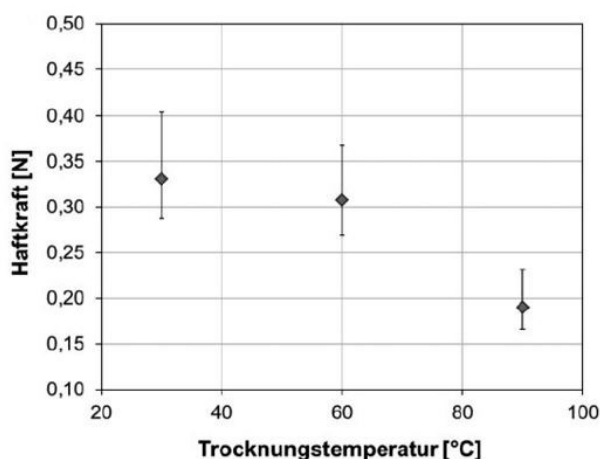


Abbildung 12

2.2 Massebeladung

Weiterhin ist die Massebeladung einer Trocknungsprozess ein Einfluss an die Widerstand an der Elektrode nachgewiesen. Abb. 3.4 zeigt, dass 5 zeigt, dass der elektrische Widerstand mit geringe Massebeladung fast kein Einfluss durch die steigende Temperatur hat, da die Gesamtmenge an Lösungsmittel gering ist und die Strukturimmobilisierung zu schnell ist, um eine signifikante Entmischung des Bindemittels zu bewirken. Aber die Elektrode mit hoher Massebeladung ist in Gegenseite. Einer höheren Antriebskraft für das Entmischen des Bindemittels und schließlich einem zunehmenden Widerstand ist wegen des Anstieges der Temperatur verantwortlich. [X1]

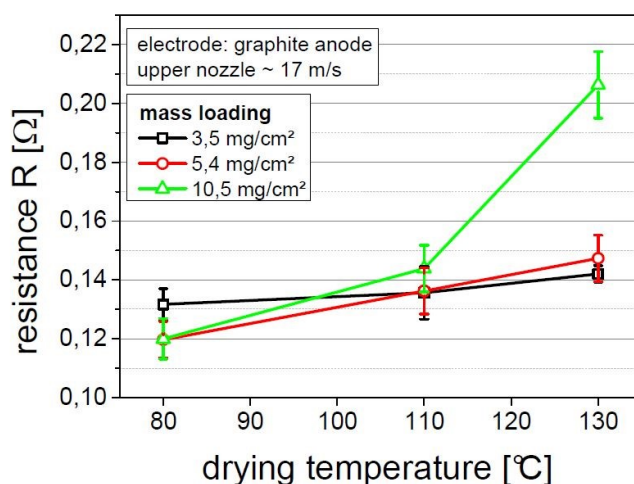


Abbildung 13

2.3 Düsengeschwindigkeit / Luftstrom

Düsen sind ein wichtiges Werkzeug in der Trocknungsprozess. Zu kontrollieren die Geschwindigkeit der Düsen hat eine große Bedeutung für die Trocknung. Es gibt 2 Arten der Düsen, nämlich die direkte (als hohe Geschwindigkeit) und diffuse (als niedrige Geschwindigkeit) Düsen. Führe Experiment hat zusammengefasst, dass die Geschwindigkeit auch Einfluss hat. Abb 3.4 zeigt die Haftkraft über Geschwindigkeit mit verschiedene Massenbeladung. Es ist zu beobachten, dass einen Abfall entsteht, wenn Massenbelastung und Trocknungszeit hoch genug. In der Gegenseite werden geringere Massenbelastungen fast nicht von der höhere

Düsengeschwindigkeit beeinflusst, da die Trocknung zu schnell ist. Die Bindemittelgradienten werden durch Entmischen nicht hergestellt. [x1]

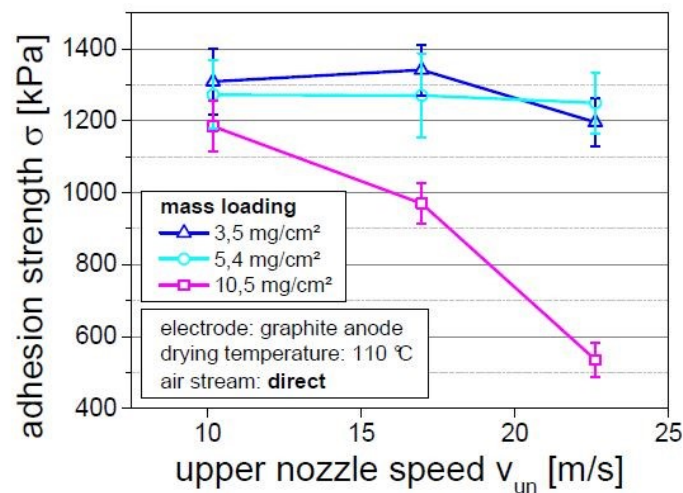


Abbildung 14

2.4 Trocknungsgrad

Die Trocknungsrate hat sich auf die Kinetik der Strukturbildung und damit auf die Elektrodeneneigenschaften ausgewirkt. Sie ist Basis auf dem Wärme- und Stofftransportbedingungen, welche eine Seite ein Einfluss von den Strömungsbedingungen der Trocknerluft haben und andere Seite von der Trocknungstemperatur über den Dampfdruck des Lösungsmittels. [X1]

Teil IV

Material und Methoden

3 Versuchsmaterial

4 Versuchsschritte

Teil V

Auswertung der Laborversuche

5 Rohdaten

Tabelle 2: Rohdaten

		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
$m_{Stl}[mg]$	$50\mu m RS$	15.2	14.1	13.1	13.7	12.8
	$100\mu m RS$	16.2	16.1	16.1	15.6	16.1
	$150\mu m RS$	19.0	18.7	18.8	18.9	18.8
$h_{Sch.}[\mu m]$	$50\mu m RS$	64	58	52	53	46
	$100\mu m RS$	74	74	73	68	69
	$150\mu m RS$	94	88	94	92	91
$F_{min}[N]$	$50\mu m RS$	-79.24736023	-74.66591644	-70.60778809	-65.46820068	-65.46820068
	$100\mu m RS$	-50.39896393	-51.10709763	-52.73678589	-48.65811539	-51.68948746
	$150\mu m RS$	-40.67362213	-41.86125565	-30.47481155	-52.01008987	-48.30031204
A_0	$alle. RS$	$1.13cm^2$				

6 Datenverarbeitung

In dieser Arbeit ist die Datenverarbeitung zweistufig. Ersten wird eine direkte numerische Verbindung zwischen Rohdaten und gewünschten Werten mathematisch etabliert. Danach wird Matlab benutzt für Zahlenberechnung und Diagrammgeneration. Folgende sind die Ableitungsschritte, und die Quelltexte sind im Anhang anzuschauen.

6.1 Flächengewicht

Grundsätzlich haben wir für gleichen Rakelspalt:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_i = \frac{m_i}{A_0} - \frac{m_{Sub.}}{A_0}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \\ \bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i}{N} \\ \bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{N} \\ \frac{m_{Sub.}}{A_0} = 8.73 \cdot 10^3 \frac{mg}{cm^3} \cdot 10 \cdot 10^{-4} cm = 8.73 \frac{mg}{cm^2} \end{array} \right. \quad (3)$$

Nach Formableitung haben wir:

$$\begin{cases} \bar{\rho} = \frac{\bar{m}}{A_0} - \frac{m_{Sub.}}{A_0} \\ \sigma_{\rho} = \frac{\sigma_m}{A_0} \end{cases} \quad (4)$$

Mit geeignete Einheiten gewählt haben wir:

$$\begin{cases} \bar{\rho}[mg/cm^2] = \frac{\bar{m}[\mu g]}{A_0[cm^2]} - 8.73 \frac{mg}{cm^2} \\ \sigma_{\rho}[\mu g/cm^2] = \frac{\sigma_m[\mu g]}{A_0[cm^2]} \end{cases} \quad (5)$$

6.2 Beschichtungsdicke

Grundsätzlich haben wir für gleichen Rakelspalt:

$$\begin{cases} h_{Besch.,i} = h_{Sch.,i} - h_{Sub.}, & i = 1, 2, \dots, N. \\ \overline{h_{Besch.}} = \frac{\sum_{i=1}^N h_{Besch.,i}}{N} \\ \overline{h_{Sch.}} = \frac{\sum_{i=1}^N h_{Sch.,i}}{N} \end{cases} \quad (6)$$

Nach Formableitung haben wir:

$$\begin{cases} \overline{h_{Besch.}} = \overline{h_{Sch.}} - h_{Sub.} \\ \sigma_{h_{Besch.}} = \sigma_{h_{Sch.}} \end{cases} \quad (7)$$

Mit geeignete Einheiten gewählt haben wir:

$$\begin{cases} \overline{h_{Besch.}}[\mu m] = \overline{h_{Sch.}}[\mu m] - h_{Sub.}[\mu m] \\ \sigma_{h_{Besch.}}[\mu m] = \sigma_{h_{Sch.}}[\mu m] \end{cases} \quad (8)$$

6.3 Haftfestigkeit

Die Haftfestigkeit bezieht sich auf die Fähigkeit eines Klebstoffs, an einer Oberfläche zu haften und zwei Oberflächen miteinander zu verbinden. Sie wird gemessen, indem die maximale Zugspannung bewertet wird, die zum Ablösen oder Lösen des Klebstoffs senkrecht zum Substrat erforderlich ist. Die Haftfestigkeit ist die maximal mögliche Zugspannung an der Grenzfläche. Es wird durch die Schichtdicke und

die Retention des Lösemittels beeinflusst, wenn lösungsmittelhaltige Beschichtungen verwendet werden. In diesem Experiment ist der Einfluss des Rakelspalts auf Haftfestigkeit gesucht. Der Rakelspalt bewirkt unmittelbar die Beschichtungsdicke, was an früherer Stelle in diesem Bereich schon eingegangen ist. In diesem Teil ist die Haftfestigkeit der Elektroden mit Hilfe von Abrisskraft gemessen. Die gemessenen Zugkräfte F_{min} bei verschiedenen Rakelspalten mit jeweils 5 Proben sind in folgenden Tabelle dargestellt.

Grundsätzlich haben wir für gleichen Rakelspalt:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{Zug,max,i} = -\frac{F_{min,i}}{A_0}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \\ \overline{\sigma_{Zug,max}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{Zug,max,i}}{N} \\ \overline{F_{min}} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{min,i}}{N} \end{array} \right. \quad (9)$$

Nach Formableitung haben wir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\sigma_{Zug,max}} = \frac{\overline{F_{min}}}{A_0} \\ \sigma_{\sigma_{Zug,max}} = \frac{\sigma_{F_{min}}}{A_0} \end{array} \right. \quad (10)$$

Mit geeignete Einheiten gewählt haben wir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\sigma_{Zug,max}}[kPa] = \frac{\overline{F_{min}}[N]}{A_0[cm^2]/10} \\ \sigma_{\sigma_{Zug,max}}[kPa] = \frac{\sigma_{F_{min}}[N]}{A_0[cm^2]/10} \end{array} \right. \quad (11)$$

7 Ergebnisse und Diskussion

7.1 Flächengewicht

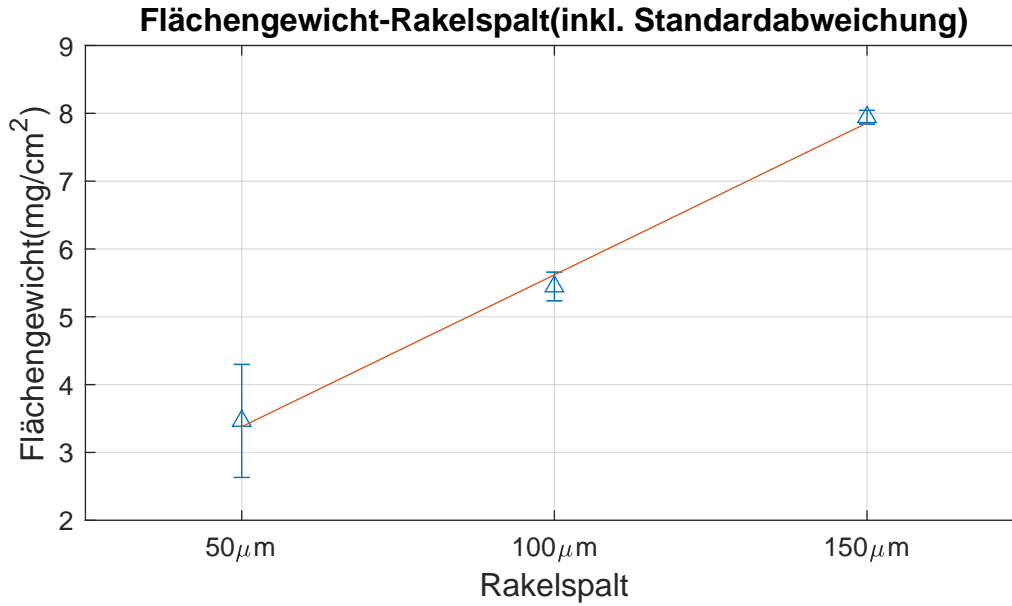


Tabelle 3: gewünschte Werte für Flächengewicht

Rakelspalt [μm]	$\bar{\rho} [\text{mg}/\text{cm}^2]$	$\sigma_{\rho} [\mu\text{g}/\text{cm}^2]$
50	3.465	0.833
100	5.447	0.211
150	7.943	0.101

Eine positive Korrelation zwischen Rakelspalt und Flächengewicht kann hier beobachtet werden. Im gegebenen Raum von Rakelspalt darf diese Koorelation linear beschrieben werden, nämlich

$$\begin{cases} \rho [\text{mg}/\text{cm}^2] = 0.0448 \cdot RS [\mu\text{m}] + 1.1402 \\ RS [\mu\text{m}] \in [50, 150] \end{cases} \quad (12)$$

Der Schnittpunkt von diese Linie mit y-Achse liegt auf positive Halbachse, und zwar auf $(0, 1.1402)$. Gleichzeitig ist die Standardabweichung bei $50\mu\text{m}$ deutlich größer als bei $100\mu\text{m}$ und $150\mu\text{m}$. Ein systematische Messfehler hat vielleicht passiert.

Wann wir diese Erscheinung nicht einfach als Fehler vernachlässigen, darf man spekulativ sagen, dass es auf eine Sedimentsschichte zurückzuführen ist, welche bei niedriger Rakelspalt sichtlicher Effekt hat. Für Nachprüfung wird aber mehr Data benötigt.

7.2 Beschichtungsdicke

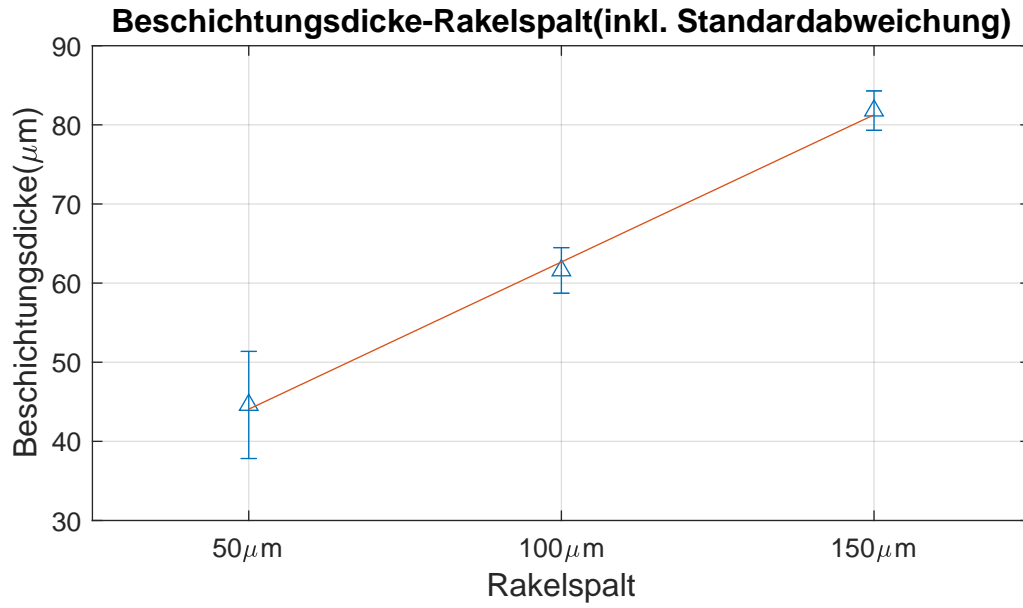


Tabelle 4: gewünschte Werte für Beschichtungsdicke

Rakelspalt[μm]	$\overline{h_{Besch.}}[\mu m]$	$\sigma_{h_{Besch.}}[\mu m]$
50	44.6	6.768
100	61.6	2.881
150	81.8	2.490

Eine positive Korrelation zwischen Rakelspalt und Beschichtungsdicke kann hier beobachtet werden. Im gegebenen Raum von Rakelspalt darf diese Koorelation linear beschrieben werden, nämlich

$$\begin{cases} h_{Besch.}[\mu m] = 0.372 \cdot RS[\mu m] + 25.4667 \\ RS[\mu m] \in [50, 150] \end{cases} \quad (13)$$

Die Daten von Beschichtung haben ähnliche Charakteristiken wie die von Flächengewicht. Also der Schnittpunkt von diese Linie und y-Achse liegt auch auf positive Achse, und die Standardabweichung bei $50\mu m$ ist auch deutlich größer als bei $100\mu m$ und $150\mu m$. Nochmal spekulieren wir dass der Grund dahinter entweder eine systematische Messfehler oder Existenz von eine Sedimentsschichte ist.

7.3 Haftfestigkeit

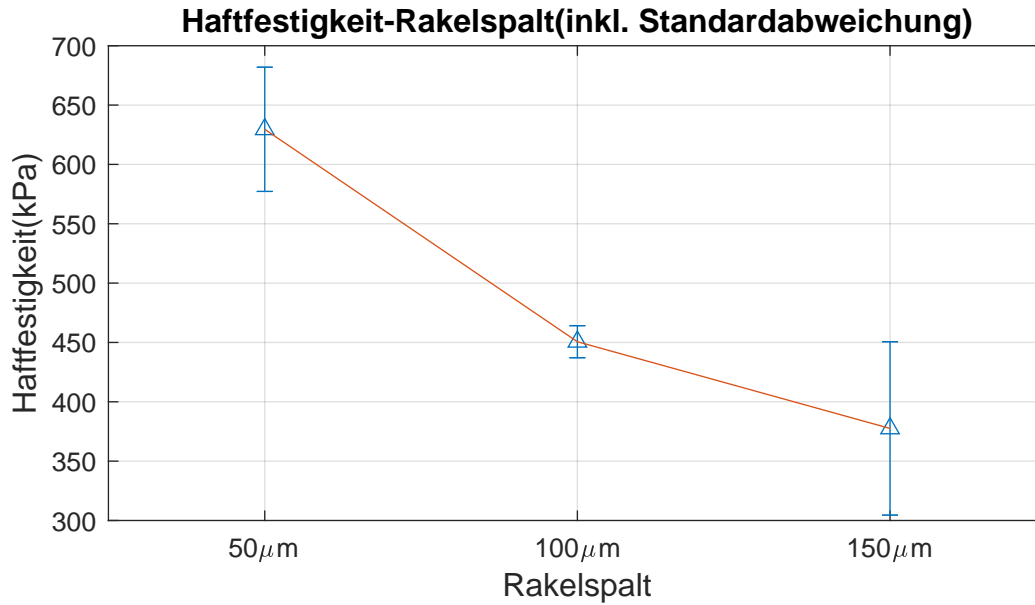


Tabelle 5: gewünschte Werte für Haftfestigkeit

Rakelspalt [μm]	$\overline{\sigma_{Zug,max}}$ [kPa]	$\sigma_{\sigma_{Zug,max}}$ [kPa]
50	629.58	52.341
100	450.60	13.505
150	377.56	73.016

Eine negative Korrelation zwischen Rakelspalt und maximale Zugspannung kann hier beobachtet werden. Im Experiment weist diese Beziehung zwischen Haftfestigkeit und Rakelspalt eine nichtlineare Kennlinie auf.

Mit Betrachtung der Messdaten sind die Standardabweichung bei Rakelspalt von $150\mu\text{m}$ relativ groß. Das heißt, dass die Daten über eine relativ große Dispersität verfügen, die die Genauigkeit und Plausibilität des Experimentes beschädigen kann. Um die Abweichungen zu verkleinern, sollen mehr Stanzlinge ausgetanzt und analysiert. Eine der Gründe für diese große Abweichung ist dass mit steigende Rakelspalt die Schichtdicke auch zunimmt, damit kann der Stanzverfahren schwieriger werden und dabei größerer Impakt auftreten, der die Qualität des Stanzlings beeinflussen kann.

Das herauskommende Ergebnis entspricht dem erwarteten Ergebnis, das mit Hilfe von Literaturstellen begründet wird. Eine der möglichen Gründe für die Abnahme der Haftfestigkeit liegt daran, dass mit dickerer Beschichtung die Trocknung der Schicht unhomogen wird. Damit wird die innere Struktur und die Qualität der Beschichtung beschädigt werden. Um die exakten Ursachen festzustellen, muss die Fehlerfläche weitergehend untersucht werden

Teil VI

Zusammenfassung

Teil VII

Literaturverzeichnis

Teil VIII

Anhang

8 Quelltexten

8.1 Teil Flächengewicht

```
1 D_050=[15.2 14.1 13.1 13.7 12.8];
2 D_100=[16.2 16.1 16.1 15.6 16.1];
3 D_150=[19.0 18.7 18.8 18.9 18.8];
4
5 x = 50:50:150;
6 y = [mean(D_050) mean(D_100) mean(D_150)]/1.13;
7 err =[std(D_050) std(D_100) std(D_150)]/1.13;
8
9 errorbar(x,y,err,'--^')
10 grid on
11 title('Flächengewicht–Rakelspalt (inkl. Standardabweichung)', 'FontSize',12)
12 xlabel('Rakelspalt', 'FontSize',12)
13 xlim([25 175])
14 xticks([50 100 150])
15 xticklabels({'50\mum', '100\mum', '150\mum'})
16 ylabel('Flächengewicht (\mug/cm^2)', 'FontSize',12)
17
18 fig=gcf;
19 fig.PaperUnits='centimeters';
20 fig.PaperPosition=[0 0 16 10];
21 saveas(fig, 'Flächengewicht', 'svg')
22 saveas(fig, 'Flächengewicht', 'png')
```

8.2 Teil Beschichtungsdicke

```
1 D_050=[64 58 52 53 46];
2 D_100=[74 74 73 68 69];
3 D_150=[94 88 94 92 91];
4
5 x = 50:50:150;
6 y = [mean(D_050)-10 mean(D_100)-10 mean(D_150)-10];
7 err =[std(D_050) std(D_100) std(D_150)];
```

```

8
9 errorbar(x,y,err , '--^')
10 grid on
11 title( 'Beschichtungsdicke–Rakelspalt (inkl. Standardabweichung) ', 'FontSize '
    ,12)
12 xlabel( 'Rakelspalt ', 'FontSize ',12)
13 xlim([25 175])
14 xticks([50 100 150])
15 xticklabels({ '50\mum', '100\mum', '150\mum' })
16 ylabel( 'Beschichtungsdicke (\mum) ', 'FontSize ',12)
17
18 fig=gcf;
19 fig.PaperUnits='centimeters';
20 fig.PaperPosition=[0 0 16 10];
21 saveas(fig , 'Beschichtungsdicke ', 'svg ')
22 saveas(fig , 'Beschichtungsdicke ', 'png ')

```

8.3 Teil Haftfestigkeit

```

1 D_050=[79.24736023 74.66591644 70.60778809 65.46820068 65.72544861];
2 D_100=[50.39896393 51.10709763 52.73698589 48.65811539 51.68948746];
3 D_150=[40.67362213 41.86125565 30.47481155 52.01008987 48.30031204];
4
5 x = 50:50:150;
6 y = [mean(D_050) mean(D_100) mean(D_150)]/0.113;
7 err =[std(D_050) std(D_100) std(D_150)]/0.113;
8
9 errorbar(x,y,err , '--^')
10 grid on
11 title( 'Haftfestigkeit–Rakelspalt (inkl. Standardabweichung) ', 'FontSize ',12)
12 xlabel( 'Rakelspalt ', 'FontSize ',12)
13 xlim([25 175])
14 xticks([50 100 150])
15 xticklabels({ '50\mum', '100\mum', '150\mum' })
16 ylabel( 'Haftfestigkeit (kPa) ', 'FontSize ',12)
17
18 fig=gcf;
19 fig.PaperUnits='centimeters';
20 fig.PaperPosition=[0 0 16 10];
21 saveas(fig , 'Haftfestigkeit ', 'svg ')

```

```
22 saveas(fig , 'Haftfestigkeit' , 'png')
```