

Masterarbeit

**KONZEPT ZUR PROZESSOPTIMIERUNG
DER WARENEINGANGSKONTROLLE VON
BATTERIEZELLEN**

ausgeführt am



FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Claudia Pritz, BSc

1710322033

betreut und begutachtet von
FH-Prof. Dipl.-Ing. Dieter Lutzmayr

Graz, im Januar 2019

.....
Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....
Unterschrift

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben. Ganz besonders bedanken möchte ich mich auch bei meinem Freund, Ing. Markus Neuhold, MSc, für den starken emotionalen Rückhalt über die Dauer meines gesamten Studiums.

Von meinem Betreuer FH-Prof. Dipl.-Ing. Dieter Lutzmayr durfte ich große Unterstützung auf fachlicher und methodischer Ebene erfahren, wofür ich mich recht herzlich bedanken möchte.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Studienkollegen bedanken, die mich immer motiviert haben und mit denen ich eine tolle gemeinsame Zeit am CAMPUS 02 verbringen durfte.

KURZFASSUNG

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es, einen beim Unternehmen AVL List GmbH bis dato manuell durchgeführten Wareneingangskontrollprozess von Batteriezellen zu optimieren. Dazu werden zuerst grundlegende Informationen rund um das Thema Lithium-Ionen-Batterien vorgestellt, die wichtig für den Kontrollprozess sind. Dabei wird vor allem detailliert auf die unterschiedlichen technischen Kriterien wie z. B. Zellspannung, Energiedichte, Zellaalterung und Sicherheit eingegangen. Des Weiteren werden die in der Literatur beschriebenen verschiedenen Methoden zur Prozessoptimierung im Supply Chain Management näher erläutert, um daraus die weitere Vorgehensweise bei der Prozessanalyse zu definieren. Im nächsten Schritt wird dann der aktuelle Prozess analysiert und beschrieben, um auf Basis dessen Ablauf eine mögliche Definition für einen automatisierten Prozess zu generieren. Anhand dieser Analyse stellt sich heraus, dass derzeit die Dimensionsmessung in einem unzureichenden Umfang durchgeführt wird. Deshalb ist es notwendig, ausgewählte Methoden zur Geometrievermessung im Detail zu beschreiben. Dazu zählen grundlegende Begriffe der Messtechnik, sowie verschiedene taktile und optische Verfahren.

Anhand der Ergebnisse aus der Prozessanalyse und der Beschreibung der Messmethoden werden drei Konzepte erstellt, die passende Lösungen für den Wareneingangsprozess sein können – zusätzlich wird ein Testaufbau erstellt, um erste Ergebnisse aus der Praxis zu sammeln. Nach genauerer Betrachtung der Konzepte kann ein halb-automatisierter Prozess mit einem Lichtschnittverfahren als optimale Lösung definiert werden. Mit dieser Lösung kann die AVL die Kundenanforderungen in puncto Qualität, Sicherheit und Zeit erfüllen. Zudem ist dieser Messaufbau auch für andere Anwendungen einsetzbar.

ABSTRACT

This master's thesis aims to introduce an optimized process for the incoming inspection of battery cells at the company AVL List GmbH that to date is being done manually. To begin with, basic information on the subject of lithium-ion cells – which is necessary to understand the inspection process – is being presented. The importance of the different technical criteria such as cell voltage, energy density, self-discharge and safety is being explained in depth. Furthermore, it is necessary to analyse different possibilities of process optimization in the supply chain management described in the literature to determine the further strategy for the process analysis. The next step is to thoroughly examine and describe the current execution of the process to generate a definition of a possible automated process based on the handling of the manual process. Based on this analysis, it turns out that currently the dimensional measurement of the cells is being processed in an insufficient way. Therefore, it is necessary that selected geometry measurement methods and devices are being described in greater detail. These include basic terms of measurement technology as well as various tactile and optical methods.

Based on the results of the process analysis and the description of the measurement methods, three different concepts are being created which could be suitable solutions for the inspection process – additionally, a test setup has been built to gather practical results. After having examined the concepts more closely, a semi-automated process with light-section method can be identified as the optimal approach. With this solution, AVL can meet the customer requirements in terms of quality, safety and time frame. Furthermore, it is possible to use this measurement setup for other tasks.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Zielsetzung.....	1
1.3	Festlegung des Automatisierungsgrades	2
1.4	Aufbau der Arbeit.....	6
2	Lithium-Ionen-Batterien.....	7
2.1	Aufbau und Funktionsweise.....	8
2.2	Typen und Bauweisen	10
2.2.1	Rundzelle	10
2.2.2	Prismatische Zelle	11
2.2.3	Pouch-Zelle.....	12
2.3	Technische Kriterien	12
2.3.1	Energiedichte	13
2.3.2	Zellspannung	14
2.3.3	Selbstentladung und Lagerung.....	15
2.3.4	Lebensdauer und Alterung	15
2.4	Probleme und Nachteile	16
2.4.1	Sicherheit.....	17
2.4.2	Systembelastungen	18
2.4.3	Umweltaspekte und Nachhaltigkeit	18
3	Prozessoptimierung im Supply Chain Management.....	20
3.1	Grundbegriffe und Optimierungsebenen	20
3.1.1	Supply Chain Management	20
3.1.2	Prozess und Prozessoptimierung	21
3.1.3	Optimierungsebenen	21
3.2	Prozesse und Automatisierungssysteme	22
3.3	Methoden zur Prozessoptimierung.....	24
3.3.1	Prozess-Reengineering	24
3.3.2	Prozessoptimierung	25
3.3.3	Prozessmusterwechsel.....	25
3.3.4	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (Kaizen).....	25
3.4	Prinzipien der Prozessverbesserung	26
4	Prozessanalyse	28
4.1	Beschreibung Ist-Situation.....	29
4.1.1	Identifikation.....	29
4.1.2	Messungen	29
4.1.2.1	Dimensionsmessung	29
4.1.2.2	Längenmessung	30
4.1.2.3	Gewichtsmessung	30

4.1.2.4	Erste Spannungsmessung	31
4.1.3	Einlagerung.....	31
4.1.4	Zweite Spannungsmessung vor Zusammenbau	31
4.1.5	Datenerfassung und -auswertung.....	32
4.1.6	Datenquellen.....	33
4.1.7	Zusammenführen und Kalkulation der Kennwerte	33
4.1.8	Identifikation von Schlechtzellen.....	33
4.1.9	Überblick	34
4.2	Anforderungen und Ziele	36
4.2.1	Spannungswerte.....	36
4.2.2	Geometrische Daten.....	36
4.2.3	Lagerung.....	38
4.2.4	Gewichts- und Längenmessung	38
4.3	Analyse Teilprozesse.....	38
4.3.1	Prototypenbau versus Kleinserienfertigung.....	38
4.3.2	Schnittstellen und zeitlicher Aufwand	39
4.3.3	Messwerte.....	39
4.3.4	Erkenntnisse	40
4.3.4.1	Priorisierung	40
4.3.4.2	Automatisierungspotential	40
5	Ausgewählte Geometriemessverfahren	42
5.1	Grundlagen Messtechnik und Qualitätsmanagement.....	42
5.1.1	Toleranz.....	43
5.1.2	Freiheitsgrad.....	43
5.1.3	Abbesche Grundsatz	44
5.1.4	Messunsicherheit.....	45
5.2	Koordinatenmesstechnik	46
5.2.1	Taktile Koordinatenmesstechnik.....	48
5.2.2	Optische Koordinatenmesstechnik	50
5.2.3	Multisensor-Koordinatenmesstechnik.....	51
5.3	Form- und Lagemesstechnik	52
5.4	Berührungslose Messverfahren.....	56
5.4.1	Automatisierte Sichtprüfung und Bildverarbeitung	57
5.4.2	Lasertriangulation	60
5.4.3	Lichtschnittverfahren.....	62
5.5	Zusammenfassung	63
6	Konzeptansätze.....	64
6.1	Konzept 1: Prozessoptimierung mit vorhandenem Equipment	64
6.2	Konzept 2: Taktile Geometrievermessung	67
6.3	Konzept 3: 3D-Geometrievermessung	69
6.4	Testaufbau zu Konzept 1.....	71
6.5	Option: Roboterhandling.....	72

6.6	Bewertung der Konzepte	73
6.6.1	Messgenauigkeit	74
6.6.2	Messdauer	74
6.6.3	Messumfang	74
6.6.4	Universelle Einsetzbarkeit	74
6.6.5	Automatisiertes Handling	74
6.6.6	Erkennen von Formveränderungen	75
6.6.7	Auswertung und Analyse	75
7	Resümee	76
7.1	Zusammenfassung und Erkenntnisse	76
7.2	Ausblick.....	77
	Literaturverzeichnis	78
	Abbildungsverzeichnis	82
	Tabellenverzeichnis	85
	Abkürzungsverzeichnis.....	86

1 EINLEITUNG

1.1 Aufgabenstellung

Die AVL ist als unabhängiges Entwicklungsunternehmen in der Automotive-Branche Vorreiter in puncto Elektro-Antriebe und entwickelt seit mehr als 15 Jahren Hybrid- und E-Motoren. Die Batterieentwicklung ist dynamisch und wächst weltweit rasant an. Die AVL als Entwicklungspartner muss flexibel auf die Veränderungen der Markt- und Kundenanforderungen, sowie auf gesetzliche Vorschriften reagieren. In Zukunft wird sich das Unternehmen auch auf die Produktion von Klein- und Vorserien von Batteriesystemen fokussieren und mit zunehmender technischer Komplexität müssen weiterhin die hohen Qualitätsansprüche der Kunden effizient und kostengünstig umgesetzt werden.

Die gelieferten Zellen werden im Zuge der Wareneingangskontrolle genauestens geprüft und vermessen. Dieser Vorgang passiert im Moment rein manuell und ist daher nur für kleine Volumina geeignet. Zukünftig sollen aber Projekte mit einer Stückzahl von ca. 100.000 Batteriezellen abgewickelt werden, daher ist eine Automatisierung dieses Prüfprozesses unumgänglich.

Die Wareneingangsprüfung der gelieferten Zellen passiert zurzeit manuell. Folgende Prozessschritte werden dabei durchgeführt: Zuerst wird der Typ bestimmt, da es unterschiedliche Bauweisen gibt, wie z. B. Rundzellen oder prismatische Zellen. Da es sich um Vorserien-Teile handelt, sind auch die Dimensionen genau zu messen. Es muss geprüft werden, ob diese der Konstruktionszeichnung entsprechen, um sicherzustellen, dass die Zelle auch später in das vorgesehene Batteriedesign integriert werden kann. Elektrische Messungen zur Feststellung von elektrischen Kenngrößen, wie z. B. der Grad der Selbstentladung oder der Zellalterung, werden ebenfalls durchgeführt. Nach dem Prüfvorgang werden die Zellen schließlich noch sortiert und entsprechend eingelagert. Da diese Kontrolle momentan vollständig manuell durchgeführt wird, zukünftig aber Kleinserien bei AVL produziert werden sollen, ist es notwendig, den bestehenden Prozess zu analysieren und zu prüfen, welche Möglichkeiten eines standardisierten und automatisierten Ablaufes umgesetzt werden können und welche Hard- und Software-Komponenten dafür benötigt werden.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, ein Konzept zur automatisierten Wareneingangsprüfung von Batteriezellen zu erarbeiten, welches die Möglichkeiten vom manuellen, semi- und bis hin zum vollautomatisierten Prozess unter den Aspekten Zeit und Qualität aufzeigt und bewertet. Mit der Analyse der Ist-Situation und einer Evaluierung der vorhandenen technischen Möglichkeiten am Markt soll eine für die AVL passende Lösung gefunden, sowie ein Testaufbau erstellt werden. Die Ergebnisse der Arbeit sollen dann in weiterer Folge als Entscheidungsgrundlage für das Management dienen, um die verschiedenen Varianten und deren Risiken sowie Vor- und Nachteile darzulegen.

1.3 Festlegung des Automatisierungsgrades

Zur Festlegung des Automatisierungsgrades zur Optimierung des vorliegenden Prozesses muss zuerst festgelegt werden, was unter dem Begriff „Automatisierung“ zu verstehen ist. In der Literatur findet man eine Vielzahl an Definitionen. Die nachfolgende Erklärung beschreibt die Automatisierung aber sehr ausführlich:

„Automatisieren heißt künstliche Mittel einsetzen, damit ein Vorgang automatisch abläuft. Bei einer Anlage bedeutet dies, sie mit Automaten so auszurüsten, dass sie automatisch arbeitet. Die Automatisierung ist das Ergebnis des Automatisierens. Automatisch heißt, nach Art eines Automaten arbeitend. Ein Automat ist ein künstliches System, das selbsttätig ein Programm befolgt. Auf Grund des Programms trifft das System Entscheidungen, die auf der Verknüpfung von Eingaben mit den jeweiligen Zuständen des Systems beruhen und Ausgaben zur Folge haben.“¹

Für diese Arbeit ist darüber hinaus noch ein spezieller Begriff wichtig, und zwar jener der Prozessautomatisierung. Es handelt sich dabei um das Fachgebiet der Automatisierung von beliebigen technischen Prozessen.² Bei technischen Prozessen handelt es sich immer um Prozesse, die einen gewissen Grad an Komplexität aufweisen und so in mittleren und größeren Unternehmen vorkommen. Beispiele für technische Prozesse sind das Lackieren von Karosserieteilen eines Kraftfahrzeuges, die Montage eines Kraftfahrzeuges oder auch das Drucken einer Zeitung.³ Die Komponenten eines Prozessautomatisierungssystems sind somit ein technisches System (Produkt oder Anlage), ein Rechner- und Kommunikationssystem und der Mensch, welcher das System bedient, wartet und kontrolliert. Bei diesen Prozessen geht es um die Änderung, Verarbeitung und den Transport von Materie, Energie und Information.⁴

Die nachfolgende Grafik zeigt das Grundbild der Automatisierungstechnik mit den bereits erwähnten Komponenten Mensch, Prozess und Automatik und deren Zusammenhänge.

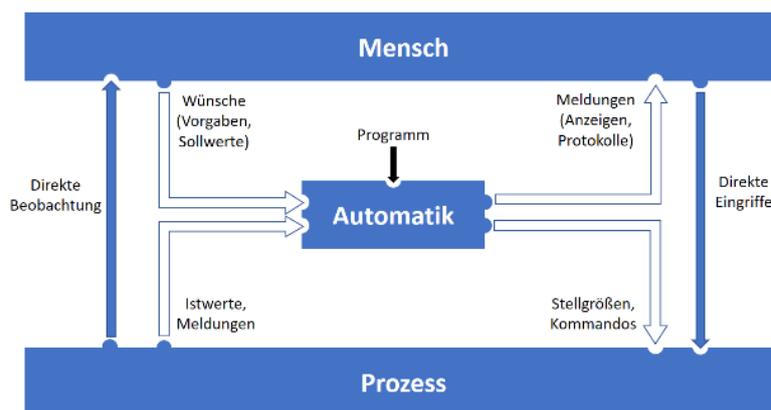


Abbildung 1: Grundbild der Automatisierungstechnik, Quelle: Heidepriem (2000), S. 5 (leicht modifiziert).

¹ Favre-Bulle (2004), S. 1.

² Vgl. Favre-Bulle (2004), S. 2.

³ Vgl. Heidepriem (2000), S. 5 f.

⁴ Vgl. Favre-Bulle (2004), S. 2.

Für die vorliegende Arbeit gilt es nun zu klären, welche und wie viele Schritte des derzeitigen Wareneingangsprozesses automatisiert werden können, und in welchem Ausmaß. Dazu muss der Automatisierungsgrad festgelegt werden. In der Literatur wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass bei einem Automatisierungsverfahren die Frage zu klären ist, „*wie einfach oder wie schwierig es ist, einzelne Vorgänge des betreffenden technischen Prozesses zu erfassen und zu beeinflussen, und welche Kosten bei der Automatisierung dieser Vorgänge anfallen.*“⁵ Der Automatisierungsgrad ist null, wenn kein Prozessschritt automatisiert wird. Wenn alle Vorgänge des Prozesses selbsttätig ausgeführt werden, wird von einem vollautomatischen Betrieb gesprochen – also von einem Automatisierungsgrad von 100 %. Der Mensch ist aber auch in einem vollautomatisierten Prozess integriert, und zwar nimmt er die Aufgaben der Vorgabe von Sollwerten wahr und er greift bei Störfällen ein.⁶

Je nach Rechner-Einsatzart wird in der Literatur zwischen drei Automatisierungsgraden unterschieden:

- **Offline-Betrieb:** Betrieb mit indirekter Prozesskopplung und dem geringsten Automatisierungsgrad. Dabei wird ein Rechner als Unterstützung für Berechnungen und Auswertungen verwendet. Die Prozessausführung selbst erfolgt noch manuell. Gekennzeichnet ist dieser Betrieb dadurch, dass eine zeitliche und gerätetmäßige Entkopplung zwischen dem Prozessgeschehen und dem Rechner vorliegt.⁷

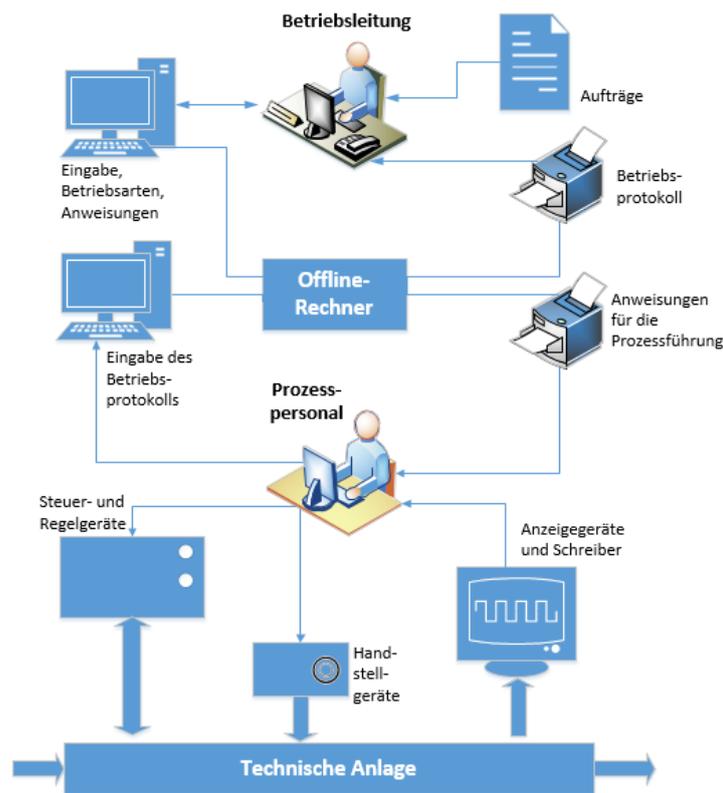


Abbildung 2: Offline-Einsatz eines Rechners, Quelle: Lauber/Peter (1999) S. 18 (leicht modifiziert).

⁵⁵ Lauber/Peter (1999), S. 15.

⁶ Vgl. Lauber/Peter (1999), S. 15 f.

⁷ Vgl. Lauber/Peter (1999), S. 16.

- Online-/closed loop-Betrieb: Geschlossener prozessgekoppelter Betrieb mit einem hohen Automatisierungsgrad. Hier wird der vorher noch offene Wirkungskreis geschlossen und das Rechnersystem übernimmt nun auch die Beeinflussung des technischen Prozesses. Dies bedeutet, dass jetzt auch Vorgänge automatisiert werden, für die bis dahin noch das Prozesspersonal verantwortlich war. Dazu gehören die Aufgaben des Steuerns, Regelns und des Stelleingriffs für die Führung des technischen Prozesses.⁸

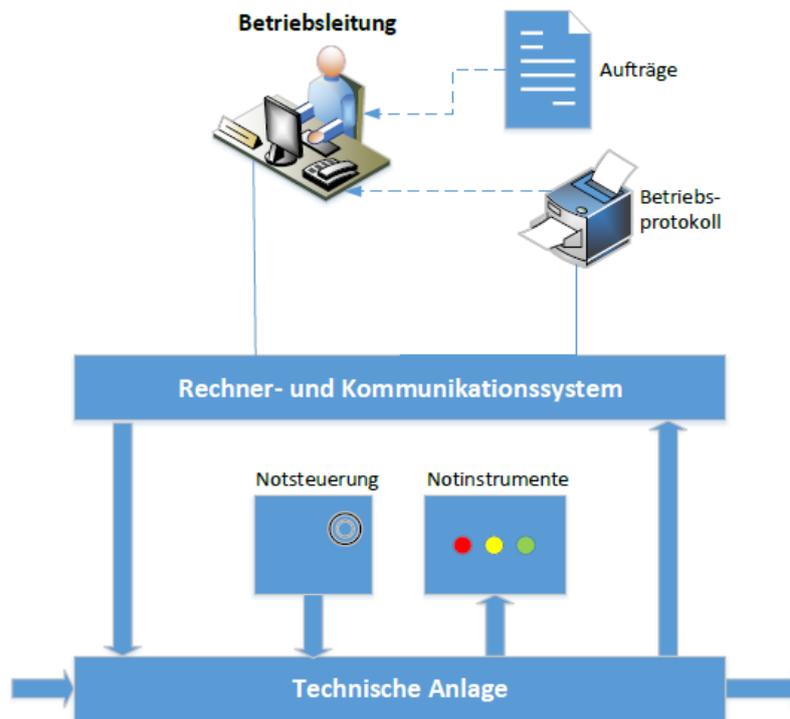


Abbildung 4: Online/closed loop-Betrieb eines Rechnersystems, Quelle: Lauber/Peter (1999) S. 21 (leicht modifiziert).

Beim vorliegenden Prozess, der in Kapitel 4 näher erläutert wird, handelt es sich um einen derzeit rein manuell ausgeführten „Offline“-Prozess. Somit ist derzeit der Automatisierungsgrad gleich null. Aufgrund der Tatsache, dass sich viele Parameter, wie z. B. der Batterietyp, die Häufigkeit der Durchführungen und die Batterieanzahlen, laufend ändern, kann als Ziel keine Vollautomatisierung angestrebt werden. Zur Effizienzsteigerung und Fehlervermeidung ist es allerdings sinnvoll, einzelne Prozessschritte zu automatisieren.

⁸ Vgl. Lauber/Peter (1999), S. 20.

1.4 Aufbau der Arbeit

Da sich die Arbeit mit dem Wareneingangsprozess von Batteriezellen beschäftigt, wird zum besseren Verständnis zu Beginn auf die Grundlagen von Lithium-Ionen-Batterien eingegangen. Dabei wird erläutert, wie diese Technologie funktioniert, welche Bauweisen es gibt, und es werden wichtige technische Kriterien betrachtet, sowie sicherheits- und umwelttechnische Aspekte.

In dieser Arbeit soll ein Konzept zur Prozessoptimierung erarbeitet werden, daher ist es wichtig, auf die verschiedenen Prozessoptimierungsmöglichkeiten näher einzugehen, die speziell im Bereich Supply Chain Management von Relevanz sind. Dazu gehört, dass im ersten Schritt wichtige Begriffsdefinitionen erörtert werden und anschließend ausgewählte Optimierungsmethoden und Prinzipien der Prozessverbesserung.

Anhand dieser theoretischen Herangehensweise an das Thema wird im darauffolgenden Praxisteil die Prozessanalyse durchgeführt. Hier wird zunächst der Ist-Zustand beschrieben. Dazu werden alle Einzelschritte detailliert erläutert. Im Anschluss daran werden daraus Anforderungen und Ziele an den optimierten Prozess definiert, um in weiterer Folge in die Analyse der Teilprozesse zu gehen. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen werden Prozessteile festgelegt, die priorisiert behandelt werden müssen, sowie das Automatisierungspotential im Prozess.

Da bei der aktuellen Vorgehensweise die Dimensionsmessung nicht ausreichend durchgeführt wird, werden im nachfolgenden Kapitel verschiedene Ansätze zur Geometrievermessung vorgestellt. Davor sind einige grundlegende Begriffe rund um das Thema Messtechnik zu erklären. Danach werden ausgewählte Messmethoden vorgestellt, die für die Messaufgaben der vorliegenden Arbeit geeignet wären. Dazu zählen verschiedene Varianten der Koordinatenmesstechnik, sowie taktile und optische Verfahren.

Abschließend werden basierend auf den Erkenntnissen aus der Prozessanalyse und den Geometriemessverfahren drei Konzepte erstellt, die nach bestimmten Kriterien bewertet und analysiert werden.

2 LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Die vorliegende Arbeit begrenzt sich auf die Anwendung von Batterien im Bereich der Elektromobilität; die nachfolgenden Grundlagen sind allgemeine Definitionen, die einen Überblick über den Aufbau, die Funktionsweise, sowie technische Kennwerte über Batterien geben sollen, die für die weiteren Kapitel in dieser Arbeit wichtig sind. Der Fokus liegt hierbei auf Lithium-Ionen-Batterien, da nur dieser Typ für den Prozess relevant ist.

Batterien sind elektrochemische Speichersysteme, die in vielen Bereichen des täglichen Lebens immer mehr an Bedeutung gewinnen, wie z. B. für die Energieversorgung von mobilen Geräten, für Elektrofahrzeuge bis hin zur stationären Speicherung von erneuerbaren Energien.⁹

Batterien werden grundsätzlich in zwei Typen unterschieden, in Primär- und Sekundärzellen.

Primärzellen

Bei Primärzellen handelt es sich um elektrochemische Stromquellen, die chemische Energie in elektrische Energie umwandeln. Nach der Energieentnahme kann diese Zelle allerdings nicht mehr genutzt, bzw. nicht mehr wieder aufgeladen werden. Die Redoxreaktion ist irreversibel und nach der Entladung muss die Zelle über ein Rücknahmesystem entsorgt werden.¹⁰ Aufgrund seiner hohen spezifischen Ladung und die für den Einsatz in wässrigen Elektrolyten hohe negative Spannung dient metallisches Zink häufig als Anodenmaterial, wie z. B. in Zink-Luft-Zellen bei Hörgeräten. Allerdings ist es der Forschung nicht gelungen, wegen der morphologisch schlechten Abscheidbarkeit des Zinks eine elektrochemische Wiederaufladbarkeit zu erreichen. Ein optimaleres Material für Anoden hingegen ist Lithium, das als ein sehr leichtes Element eine spezifische Ladung von 3.862 Ah/kg und ein sehr negativ liegendes Redoxpotential besitzt. Wässrige Elektrolyte sind allerdings nicht nutzbar, sondern nur Elektrolyte auf Basis organischer Lösungsmittel. Unter Einsatz von Braunstein als Kathodenmaterial lassen sich gut Spannungen von 3 V erreichen. Diese Zellen finden sich oft in Uhren und Kameras. Im Allgemeinen sind Zellen mit metallischem Lithium nicht wiederaufladbar. Der Grund liegt, ebenfalls wie bei Zink-Zellen, in der morphologisch schlechten Abscheidbarkeit.¹¹

Sekundärzellen

Sekundärzellen werden auch Akkumulatoren genannt und zählen zu den wiederaufladbaren elektrochemischen Energiespeichern. Damit ist eine Mehrfachnutzung möglich. Beim Laden wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt – beim Entladen passiert der umgekehrte Vorgang. Wenn ein jeweils zusammenhängender kompletter Lade- und Entladeprozess durchgeführt wird, spricht man von einem sogenannten Zyklus. Die Anzahl der Zyklen gibt die Lebensdauer einer Sekundärzelle wieder, die je nach Anwendung und Einsatzgebiet unterschiedlich, meist zwischen 100 bis weit über 1.000 Zyklen sein kann.¹²

⁹ Vgl. Möller (2013), S. 3.

¹⁰ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 2.

¹¹ Vgl. Möller (2013), S. 4.

¹² Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 2.

Nachfolgend werden die Spezifika (Aufbau, Typen, etc.) von wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterien dargestellt.

2.1 Aufbau und Funktionsweise

Die nachfolgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise einer wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterie beim Lade- bzw. Entladevorgang. Beim Entladevorgang besteht jede Zelle aus einer negativen Elektrode, der Anode, und einer positiv geladenen Elektrode, der Kathode. Die beiden Elektroden sind zusammengesetzt aus einem Stromableiter und einem Aktivmaterial, das darauf aufgebracht ist.¹³ Zwischen den Elektroden befindet sich ein ionenleitfähiger Elektrolyt, sowie eine poröse Membran (= Separator), die die beiden Elektroden voneinander trennt. Beim Laden und Entladen wandern die einzelnen Lithium-Ionen zwischen den Elektroden hin und her und dabei werden sie in Aktivmaterialien eingelagert.¹⁴ Dabei lässt der Separator nur die Lithium-Ionen durch, nicht aber die Elektronen – damit wird ein Kurzschluss verhindert. Mithilfe des Elektrolyten wird die Beweglichkeit der Ionen sichergestellt. Es handelt sich dabei meist um eine nicht-wässrige Lösung.¹⁵

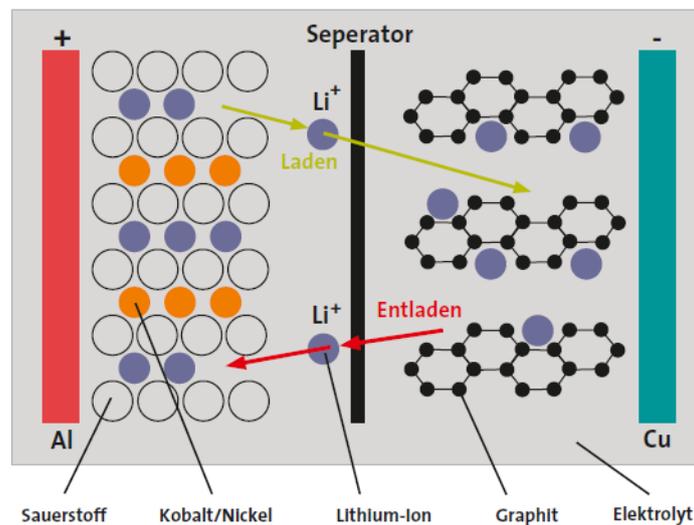


Abbildung 5: Aufbau Lithium-Ionen-Batterie, Quelle: Karle (2015) S. 77.

Die Anode besteht aus einer Kupferfolie, sowie einer Graphitschicht oder einer Schicht aus lithium-legiertem Material. Während des Ladens werden in der Anode die positiv geladenen Lithium-Ionen gelagert, die für die Leistungsbereitstellung notwendig sind. Die Kathode besteht aus auf einem Aluminiumkollektor aufgetragenen Mischoxiden. Die gängigsten Verbindungen sind dabei Übergangsmetalloxide mit Kobalt, Mangan oder Nickel. Bei der Zellladung dient diese Schicht als Lithiumquelle.¹⁶

¹³ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 2.

¹⁴ Vgl. Leuthner (2013), S. 14.

¹⁵ Vgl. Karle (2015), S. 77.

¹⁶ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018] S. 3 f.

Lithium-Ionen-Batterien bieten eine Vielzahl von Vorteilen, wie z. B. eine hohe Energie- und Leistungsdichte, eine geringe Selbstentladung und aufgrund des geringen Innenwiderstands haben Lithium-Ionen-Batterien einen hohen Wirkungsgrad. Außerdem besitzen sie keinen sogenannten Memoryeffekt, der beschreibt, dass Akkus nicht mehr ihre volle Kapazität nutzen können, wenn sie aus einem nicht vollständigen Entladezustand wieder aufgeladen werden. Dies bedeutet für Lithium-Ionen-Akkus, dass sie ohne negative Auswirkung auf deren Leistungsfähigkeit aus jedem Ladezustand wieder aufgeladen werden können.¹⁷

Es wird je nach Anwendungsfall entschieden, ob nur eine Batteriezelle oder mehrere Zellen verwendet werden, die dann in Serie in einem Modul¹⁸ zu verschalten sind. Außerdem ist es möglich, dass mehrere Batteriezellen parallel verschaltet werden können, in Abhängigkeit von der geforderten Kapazität. Mehrere Packs zusammen ergeben dann ein sogenanntes Batteriesystem. Im Automotive-Bereich besitzen solche Batteriesysteme für die Steuerung ein Batteriemanagementsystem, kurz BMS genannt. Ein solches BMS enthält Zellüberwachungseinheiten, Sensoren für Temperatur und Zellspannung und es ermöglicht das Zu- und Abschalten des Batteriesystems.¹⁹ Weitere wichtige mechanische Komponenten sind das isolierte Gehäuse sowie eine Kühlung und Befestigungssysteme.²⁰

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau und die Komponenten einer Batterie bis hin zum BMS.

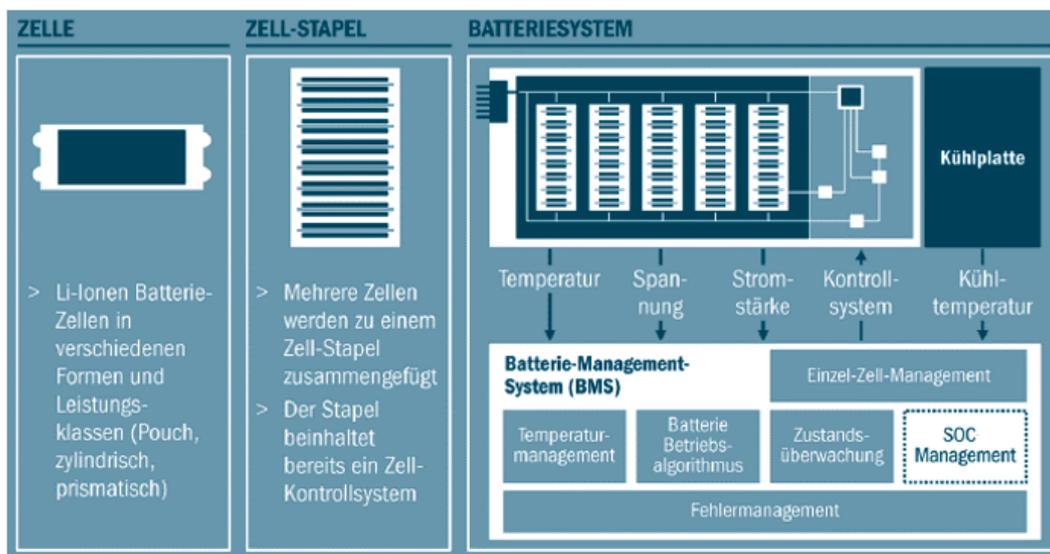


Abbildung 6: Automotive-Batterien - Aufbau und Komponenten, Quelle: Schlick/Hertel/Hagemann/Maiser/Kramer (2011), Online-Quelle [22.Juli.2018], S. 16 (leicht modifiziert).

Aktuell werden in einzelnen Zellen Spannungswerte von 2,2 V bis max. 4,2 V erreicht. Für die meisten Anwendungen im Automotive-Bereich reicht diese Spannung nicht aus, deshalb werden diese zu dem oben bereits erwähnten Pack in Reihe geschaltet. Multipliziert man die Anzahl an Zellen mit der Zellspannung, erhält man die Gesamtspannung. Somit ergibt sich beispielsweise für ein Modul, bestehend aus sechs

¹⁷ Vgl. Karle (2015), S. 77.

¹⁸ Modul = wird auch „Pack“ genannt

¹⁹ Vgl. Leuthner (2013), S. 14 f.

²⁰ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 9.

Lithium-Ionen-Batteriezellen mit nominell 3,6 V, eine Nennspannung von 21,6 V. Im Gegensatz dazu wird bei einer Parallelschaltung bei gleichbleibender Spannung und gleichzeitiger Erhöhung des maximalen Entladestroms eine höhere Ladungsmenge (Ah) des Batteriemoduls erreicht.²¹

2.2 Typen und Bauweisen

Hersteller von Lithium-Ionen-Zellen fokussieren sich auf drei Aufbauarten, die jeweils Vor- und Nachteile bieten. Diese Bauweisen inkl. Anwendungsbeispielen werden nachfolgend dargelegt.



Abbildung 7: Verschiedene Zelltypen und Anwendungsmöglichkeiten, Quelle: Wöhrle (2013) S. 112.

2.2.1 Rundzelle

Die zylindrische Form ist jener Typ, der am häufigsten verbreitet ist, insbesondere im Consumer-Bereich. Die Standardausführung ist eine 18650-Zelle mit einem Durchmesser von 18 mm und einer Höhe von 65 mm.²² Die Rundzelle weist eine sehr hohe Energiedichte auf, ist sehr stabil und einfach zu produzieren. Nachteilig ist aber, dass dieser Zelltyp aufgrund der runden Form Wärme schlecht abführen kann. Im Inneren ist die Zelle hohl, um zu gewährleisten, dass sich die Batterie bei Erwärmung (Belastung) nicht nach außen ausdehnen kann.²³ Sie werden in Rundwickeltechnik gefertigt. Dabei werden die Elektroden und Separatoren mit einer entsprechenden Zugkraft aneinandergespreßt und abschließend wird der Wickel mit einem Klebeband fixiert. Der Herstellungsprozess ist auch sehr effizient, da ca. sechs Zellen pro Minute produziert werden können.²⁴ Im Automotive-Bereich werden diese Zelltypen zum Beispiel beim Tesla Model S verwendet. Für einen gesamten Antriebsstrang müssen allerdings mehrere tausende Rundzellen miteinander verbunden werden.²⁵

²¹ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018] S. 6.

²² Vgl. Wöhrle (2013), S. 112.

²³ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 18 f.

²⁴ Vgl. Pettinger (2013), S. 227.

²⁵ Vgl. Karle (2015), S. 80.

Für einen 85 kWh-Akku werden bei Tesla etwas mehr als 7.000 Rundzellen des Typs 18650 verbaut. Es gibt Bestrebungen, größere Rundzellen des Typs 26650 zu verwenden, um die Anzahl an Zellen zu reduzieren.²⁶

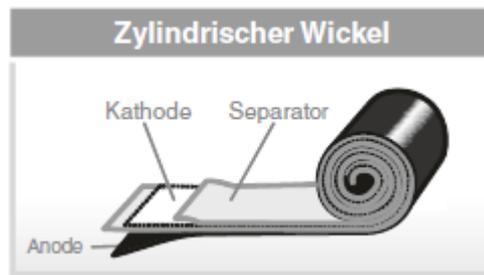


Abbildung 8: Zylindrischer Wickel, Quelle: Wöhrle (2013) S. 114 (leicht modifiziert).

2.2.2 Prismatische Zelle

Die prismatische Zelle ist der Rundzelle vom Aufbau her sehr ähnlich. Sie wird mittels Flachwickeltechnik hergestellt. Die Elektroden werden vorkonfektioniert und vereinzelt entlang des Separatorbandes entsprechend der späteren Wickelradien positioniert und durch Lamination auf dem Separator fixiert. Dieses Band wird dann um einen Wickelkern zu einem prismatischen Zellverbund gewickelt²⁷ – in der Abfolge Anode – Separator – Kathode – Separator. Es wird ein festes Gehäuse als Verpackung verwendet. Aufgrund der flachen und rechteckigen Form kann eine bessere Wärmeabfuhr erreicht werden. Allerdings ist die Zellproduktion aufwändiger als bei der Rundzelle.²⁸ Um prismatische Zellen mit Hardcase herzustellen, sind mehrstufige Tiefziehwerkzeuge und Schnittwerkzeuge notwendig, dies rechnet sich daher erst bei großen Stückzahlen. Für den Verschluss des Gehäuses müssen komplexe Technologien wie Laser- oder Ultraschallschweißen eingesetzt werden. Deshalb werden prismatische Zellen mit einem Metallgehäuse eher nicht für Kleinserien gefertigt.²⁹

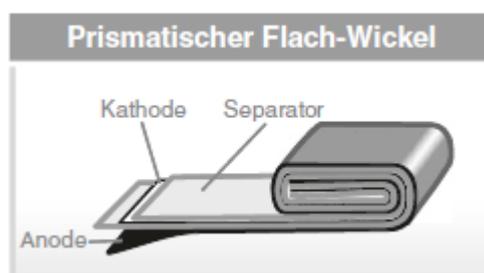


Abbildung 9: Prismatischer Flachwickel, Quelle: Wöhrle (2013) S. 114 (leicht modifiziert).

²⁶ Vgl. Sorge (2014), Online-Quelle [24.November.2018].

²⁷ Vgl. Pettinger (2013), S. 227.

²⁸ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 20.

²⁹ Vgl. Pettinger (2013), S 233.

2.2.3 Pouch-Zelle

Pouch-Zellen sind wie prismatische Zellen rechteckig, besitzen dafür ein flexibles Gehäuse und sie werden daher auch oft „Coffeebag-Zelle“ oder „Softpack“ genannt. Das Gehäuse besteht meist beidseitig aus kunststoffbeschichteter Aluminiumfolie. Diese Zellen werden auch nicht gewickelt, sondern gestapelt und zwar in der Abfolge Anode – Separator – Kathode.³⁰

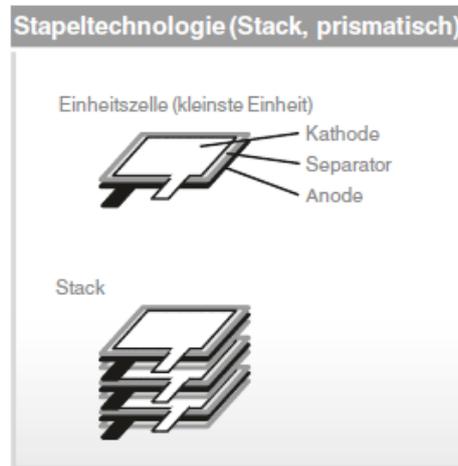


Abbildung 10: Stapeltechnologie bei Pouch-Zellen, Quelle: Wöhrle (2013) S. 114 (leicht modifiziert).

Pouch-Zellen sind günstiger in der Herstellung als prismatische Zellen mit Metallgehäuse, da keine komplexen Werkzeuge notwendig sind. Weitere Vorteile sind das niedrige Gewicht, die gute Skalierbarkeit, eine hohe Energiedichte und eine gute Wärmeableitung. Obwohl sich die Dichtheit in den letzten Jahren stark verbessert hat, ist diese bei Pouch-Zellen immer noch ein negativer Aspekt.³¹ Ein weiterer Nachteil dieser Zellbauart ist das Thema automatisierte Handhabung: Das flexible Gehäuse der Pouch-Zellen ist aufwändiger zu greifen und zu positionieren. Das Metallgehäuse einer prismatischen Zelle ist hier wesentlich robuster und unterliegt weniger Toleranzen. In der Planungs- und Designphase sind daher Zellen mit einem starren Gehäuse vorteilhafter und sie sind in weiterer Folge beim Batteriezusammenbau auch einfacher handzuhaben.³²

2.3 Technische Kriterien

Je nach Einsatzgebiet sind unterschiedliche Kriterien bei Batteriezellen zu beachten. Nachfolgend werden die wichtigsten Eigenschaften und deren Bedeutung, vor allem in Hinblick auf die Automotive-Branche, beschrieben.

³⁰ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 2

³¹ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 20.

³² Vgl. Pettinger (2013), S. 234.

2.3.1 Energiedichte

Aus dem Produkt der nominalen Kapazität und nominalen Spannung ergibt sich die Energie einer Zelle in der Einheit Wh. Die spezifische Energie und die Energiedichte sind wichtige Batteriekennzahlen und auch ein Maß für die nutzbare elektrische Energie – bezogen auf die Masse (Wh/kg) oder das Volumen (Wh/l). Wie die nachfolgende Abbildung zeigt, kann die Energiedichte erhöht werden, wenn man Materialien verwendet, mit denen höhere Zellspannungen realisiert werden können, oder mit Materialien, die eine höhere spezifische Kapazität (Ah/kg) besitzen.³³

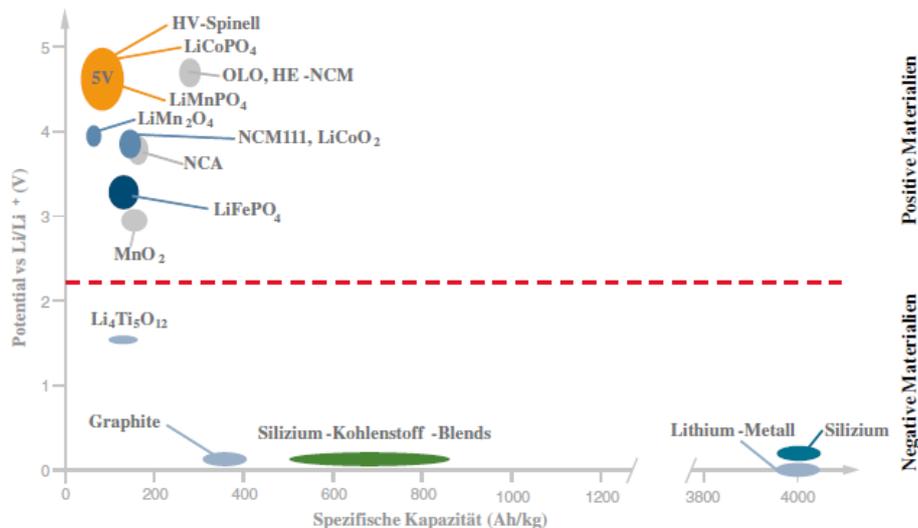


Abbildung 11: Potentiale und spezifische Kapazitäten verschiedener positiver und negativer aktiver Materialien für Lithium-Ionen-Zellen, Quelle: Wöhrle (2013) S. 110.

Die Energiedichte ist eine wichtige Kennzahl für die Reichweite von elektrisch betriebenen Fahrzeugen. Wird die Energiedichte größer, können bei gleichbleibender Kapazität kleinere bzw. leichtere Akkus verwendet werden.³⁴ Die theoretische gravimetrische Energiedichte liegt bei Lithium-Ionen-Batteriezellen aktuell meist zwischen 350 und 400 Wh/kg. Allerdings muss mit der praktischen gravimetrischen Energiedichte gerechnet werden, bei der die weiteren Komponenten der Zelle wie Elektrolyt, Separator, Stromableiter, Gehäuse zu einer Verringerung der Energiedichte um die Hälfte führen. Beim Übergang der Einzelzelle zur Batterie ergeben sich noch weitere Reduktionen – damit werden aktuell in Fahrzeugen Werte zwischen 80 und 120 Wh/kg erreicht. Allerdings ist die Technik bei Lithium-Ionen-Akkus schon derart ausgereift, dass in diesem Bereich keine signifikanten Verbesserungen mehr erreicht werden können.³⁵ Es wird an neuen Akkuarten geforscht, wie z. B. dem Lithium-Luft- oder dem Lithium-Schwefel-Akku. Mit diesen Typen können weit höhere Energiedichten, sogar um den Faktor neun, erreicht werden. Zudem bieten diese Batteriezellen weitere Vorteile, vor allem das Gewicht und die Herstellungskosten betreffend. Es gibt

³³ Vgl. Wöhrle (2013), S. 110.

³⁴ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 9.

³⁵ Vgl. Janek/Adelheim (2013), S. 199 f.

aber auch noch zahlreiche Probleme bei diesen Technologien in puncto Sicherheit und Lebensdauer, weshalb für die Automotive-Branche erst ab dem Jahr 2025 mit diesen neuen Batterien gerechnet werden kann.³⁶

2.3.2 Zellspannung

Bei der Zellspannung geht man von der sogenannten Ruhespannung aus. Damit ist jene Spannung gemeint, wenn keine Ströme fließen bzw. wenn gerade kein Lade- oder Entladevorgang passiert. Die tatsächliche Spannung weicht von diesem Wert ab, sobald Ströme fließen. Um die theoretische Ruhespannung zu ermitteln, werden die Elektrodenpotentiale der jeweils verwendeten Aktivmaterialien herangezogen. Für den Vergleich der unterschiedlichen Elektrodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien mit ihren Potentialen werden sie gegenüber einer Standardelektrode aus metallischem Lithium gemessen. Das Potential der Standardelektrode wird auf den Wert Null festgelegt und dient somit als Ausgangspunkt. Kombiniert man nun zwei Materialien, wie z. B. Graphit mit LiMn_2O_4 , wie die nachfolgende Abbildung zeigt, erhält man die Zellspannung als Differenz der beiden Elektrodenpotentiale, welche für das genannte Beispiel dann bei ca. 3,7 V liegt.³⁷ In Abhängigkeit vom Kathodenmaterial liegt die Zellspannung von Lithium-Ionen-Batterien bei bis zu ca. 4 V. Herkömmliche Batteriesysteme erreichen im Vergleich dazu nur rund 1,2 bis 1,5 V.³⁸

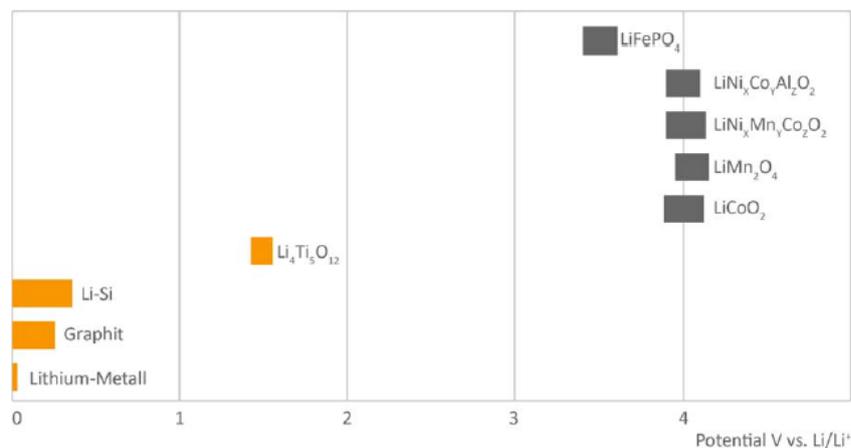


Abbildung 12: Übersicht der Elektrodenpotentiale verschiedener Aktivmaterialien (orange = negative Elektrode, dunkelgrau = positive Elektrode), Quelle: Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 12.

Üblicherweise beträgt die Ladeschlussspannung einer Lithium-Ionen-Zelle ca. 4,2 V, die typische Entladeschlussspannung liegt bei ca. 2,5 V. Im Falle einer Überladung oder einer Tiefenentladung können irreversible Schäden entstehen bzw. ist mit Kapazitätsverlusten zu rechnen.³⁹

³⁶ Vgl. Ecker (2015), S. 64.

³⁷ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 12.

³⁸ Vgl. Bottke (2013), Online-Quelle [8.September.2018], S. 12.

³⁹ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 12.

2.3.3 Selbstentladung und Lagerung

„Die Selbstentladung [...] ist die beim Lagern bei offenen Klemmen gemessene Abnahme der gespeicherten Ladung durch innere Vorgänge in der Batterie.“⁴⁰ Bei Lithium-Ionen-Zellen liegt die Selbstentladungsrate bei ca. 0,5 % der gespeicherten Ladung pro Woche (bei Annahme einer Lagertemperatur von 20 °C). Die Selbstentladungsrate steigt bei höheren Temperaturen entsprechend an: Bei einer Lagertemperatur von 60 °C liegt die wöchentliche Selbstentladung bei bereits 4-10 %. Dabei ist auch zu beachten, dass die Restkapazität näherungsweise exponentiell mit der Lagerzeit abnimmt. Daher ist die Selbstentladung bei einer vollständig geladenen Batteriezelle am Anfang größer als die darauffolgenden Teilentladungen in den kommenden Wochen. Die Selbstentladung hat somit auch Auswirkungen auf die Zell-Lebensdauer, die im nachfolgenden Kapitel näher erläutert wird.⁴¹

Für die Lagerung von Lithium-Ionen-Zellen empfiehlt sich eine kühle Raumtemperatur oberhalb des Gefrierpunktes. Außerdem sollten die Batterien nicht vollgeladen gelagert werden, denn vollständig geladene Zellen verlieren rund 6 % ihrer Kapazität (bei 0 °C) pro Jahr. Bei halber Ladung hingegen beträgt der Kapazitätsverlust (bei 0 °C) aufgrund der Nichtlinearität nur 2 % pro Jahr.⁴²

2.3.4 Lebensdauer und Alterung

Als Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Zelle bezeichnet man die Zeitspanne zwischen dem Produktionszeitpunkt (= BoL: Begin of Life) und jenem Zeitpunkt (= EoL: End of Life), zu dem die im Lastenheft definierten Kriterien einen vorher festgelegten Wert durch Alterung unterschreiten. Zum Beispiel kann definiert werden, dass bei Unterschreiten der Speicherfähigkeit auf weniger als 80 % das Lebensdauerende eintritt. Im Automotive-Bereich ist die Lebensdauer von Batterien eine wichtige Eigenschaft.⁴³

Die Lithium-Ionen-Zelle altert auch, wenn sie nicht genutzt wird, denn selbst im unbelasteten Zustand laufen chemische Prozesse ab. Diesen Umstand nennt man kalendarische Lebensdauer.⁴⁴ Weitere Faktoren, die die kalendarische Lebensdauer beeinflussen können, sind extreme äußere Temperaturen, die Elektrolyt-Zusammensetzung sowie die Qualität des Herstellungsprozesses. Die kalendarische Lebensdauer wird für Batterien in der Anzahl der zu erwarteten Einsatz-Jahre angegeben.⁴⁵

Zur Angabe der Gesamtlebensdauer ist noch der zyklische Alterungsprozess zu erwähnen: Dies geschieht beim Laden und Entladen der Batteriezelle. Auch hier spielt die Temperatur eine wichtige Rolle, aber die zyklische Alterung wird in erster Linie vom Energiedurchsatz bestimmt.⁴⁶ Definiert ist die zyklische Lebensdauer durch „die Anzahl der möglichen Zyklen einer Zelle oder eines Systems durch Nutzung bzw.

⁴⁰ Kurzweil/Dietlmeier (2018), S. 237.

⁴¹ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2018), S. 237 f.

⁴² Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2018), S. 238.

⁴³ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 13.

⁴⁴ Vgl. Lamp (2013), S. 410.

⁴⁵ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 13.

⁴⁶ Vgl. Lamp (2013), S. 410.

*Zyklisierung bis zum EoL.*⁴⁷ Ein Zyklus entspricht einem zusammenhängenden Lade- und Entladevorgang und hierbei wird noch zwischen Voll- und Teilzyklen unterschieden: Bei einem Vollzyklus erfolgt die Entladung bis auf eine Restkapazität von 0 % und anschließend wird eine Aufladung auf 100 % durchgeführt. Erfolgt hingegen eine unvollständige Entladung, spricht man von einem Teilzyklus. Für die zyklische Lebensdauer sind folgende Parameter, angegeben in Prozent, wichtig:

- Entladetiefe: Depth of Discharge (DOD)
- Ladezustand: State of Charge (SOC)

Die Lebensdauer einer Batteriezelle kann erhöht werden, indem der SOC auf ca. 80 – 90 % der Gesamtkapazität beschränkt wird und die Lithium-Ionen-Zelle mit Teilzyklen betrieben wird. Damit kann die im Fahrzeugbereich typische Lebensdauer von 10 Jahren bzw. mehr als 3.000 Zyklen erreicht werden.⁴⁸

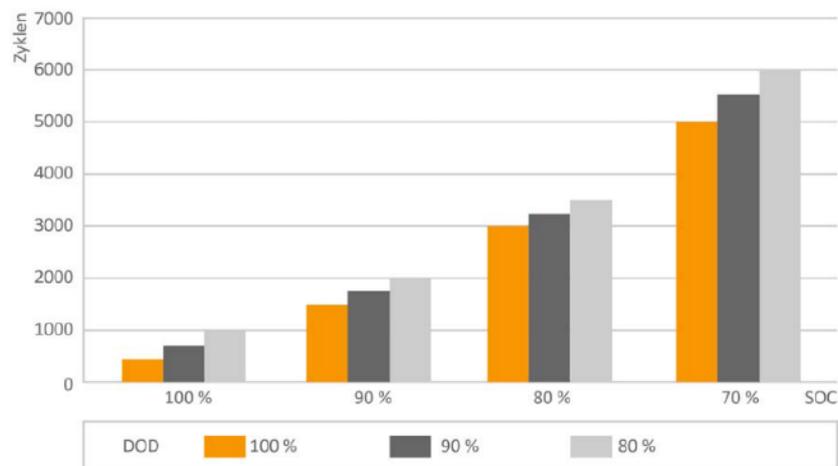


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Zyklenlebensdauer bei Beschränkung von SOC und DOD bis zur Restkapazität von 70 %, Quelle: Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018] S. 15.

Die in Abbildung 13 beispielhaft dargestellte Batteriezelle wird in Teilzyklen betrieben. Bei einer vollen Nutzung fällt nach 500 Zyklen die Kapazität auf 70 % der Ausgangskapazität. Beschränkt man den DOD auf 80 %, sind bereits 1.000 Zyklen möglich, wenn man zusätzlich den SOC auf 90 % begrenzt, fällt die Kapazität erst nach 1.500 Zyklen auf 70 % der ursprünglichen Kapazität. Somit sind dann mehr als 6.000 Zyklen erreichbar bei einem SOC von 70 % und einem DOD von 80 %.⁴⁹

2.4 Probleme und Nachteile

Bei der Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien im Automotive-Bereich gibt es einige Aspekte, die nachteilig sind und dementsprechende Probleme in der Praxis verursachen. Diese sollen im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert werden.

⁴⁷ Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 13

⁴⁸ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 14 f.

⁴⁹ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 15.

2.4.1 Sicherheit

Da bei Lithium-Ionen-Batterien Materialien mit hohen Energiegehalten und hoch entzündliche Elektrolyte kombiniert verwendet werden, birgt dies bei extremen äußeren Einflüssen wie z. B. bei einem Kurzschluss hohe sicherheitstechnische Risiken. Bereits in der Designphase gilt es diesen Umstand zu berücksichtigen, denn die Sicherheit einer Lithium-Ionen-Zelle ist ein zentrales Bewertungskriterium für die Wahl des geeigneten Batteriesystems.⁵⁰

Ein wichtiger Aspekt beim Thema Sicherheit ist das Verhalten der Batteriezelle im Falle einer Überladung, denn eine Überladung kann zu einer nicht kontrollierbaren Erhitzung der Zelle führen, die im ungünstigsten Fall zum Bersten und Zünden der Zelle führt. Deshalb muss dieses mögliche Ereignis in jedem Fall verhindert werden. Dazu gibt es konstruktive Maßnahmen, wie z. B. Sicherheitsventile oder eine aktive Kühlung, und den Elektrolyten werden Additive wie Biphenyl oder Cyclohexylbenzen beigemischt. Diese Additive werden erst bei Erreichen der kritischen Zellspannung aktiviert.⁵¹ Tiefentladungen können ebenfalls zu einem Brand, einem sogenannten „Thermal Runaway“, führen. Durch eine zellinterne exotherme Reaktion, die durch verschiedene Einflüsse entstehen kann, wird dieser Thermal Runaway ausgelöst. Wie bereits erwähnt, kann dieser Zustand zur Explosion der betroffenen Zelle führen und durch die Explosion werden auch die Zellen in direkter Nähe ebenfalls in Mitleidenschaft gezogen und könnten somit eine Kettenreaktion auslösen.⁵²

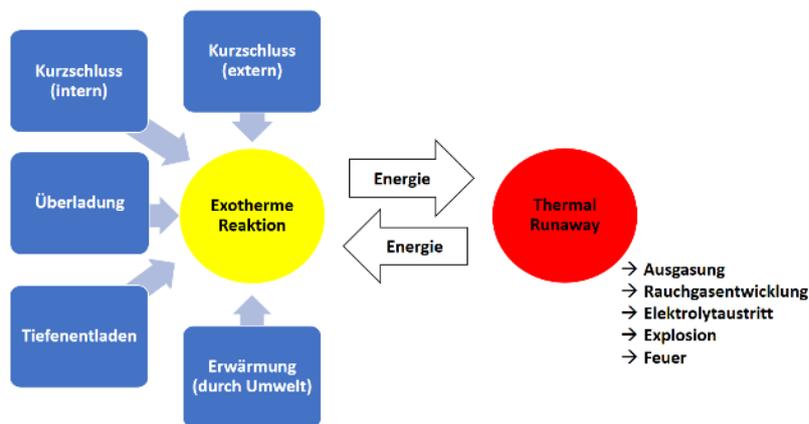


Abbildung 14: Einflussfaktoren Thermal Runaway einer Lithium-Ionen-Zelle, Quelle: Vogt (2013) S. 315 (leicht modifiziert).

Die bereits genannten Sicherheitsvorkehrungen betreffen die Sicherheit auf Zellebene. Weitere Möglichkeiten wären z. B. sogenannte Shutdown-Separatoren: Mikroporen, die sich unter Wärmeeinwirkung verschließen, um den weiteren Ionenfluss zu verhindern, damit der Stromfluss unterbrochen wird. Es könnte auch eine Schmelzsicherung verwendet werden, die im Stromkreislauf integriert ist und bei zu hohen Strömen schmilzt.⁵³

⁵⁰ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 16.

⁵¹ Vgl. Hartnig/Schmidt (2013), S. 74.

⁵² Vgl. Vogt (2013), S. 314 f.

⁵³ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 16 f.

Auf Systemebene ist in erster Linie das BMS für die Sicherheit zuständig, das z. B. per Mikrocontroller die Zellen überwacht und selbstständig die Batterien ausschaltet, wenn sicherheitsrelevante Grenzwerte überschritten werden.⁵⁴ Außerdem stellt das Thermomanagement des BMS sicher, dass die Batterie immer bei einer optimalen Temperatur betrieben wird. Dieser Aspekt ist nicht nur in Hinblick auf die Sicherheit wichtig, sondern auch für die Gewährleistung der gleichmäßigen Zellalterung.⁵⁵

2.4.2 Systembelastungen

Lithium-Ionen-Zellen sind unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt und damit ist mit bestimmten Sicherheitsrisiken zu rechnen. Die Folgen einer thermischen Belastung wurden bereits im vorherigen Punkt dargestellt. Nachfolgend werden weitere wichtige Belastungsarten und deren Einfluss auf die Batterien erläutert.

Auf mechanischer Ebene können Spannungen und Dehnungen, die bei der Einlagerung von Lithium-Ionen in das Elektrodenmaterial passieren, Risse hervorrufen oder zum Auseinanderbrechen der Elektrode führen. Außerdem kann eine mechanische Deformation aufgrund einer Kollision einen Kurzschluss auslösen. Eine weitere Belastung stellen hohe Ströme beim Laden und Entladen dar, denn diese beanspruchen die Zellchemie, führen zu einer hohen internen Wärmeproduktion und die Kapazität nimmt ab. Letztendlich trägt auch die Betriebsart und der Umgang einen wesentlichen Beitrag zur Systemsicherheit bei: Wenn die Lithium-Ionen-Batterie immer nur in Vollzyklen genutzt wird, kann dies zu Tiefenentladungen oder Überladungen führen und damit die Lebensdauer verringern oder im schlimmsten Fall die Batterie zerstören.⁵⁶

2.4.3 Umweltaspekte und Nachhaltigkeit

Der Fokus bei Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb liegt in erster Linie darauf, dass damit eine umweltschonende und nachhaltige Art und Weise der Fortbewegung möglich gemacht wird. Deshalb sind die Umweltaspekte und Themen wie Nachhaltigkeit und Recycling von Lithium-Ionen-Batterien enorm wichtig für die Automotive-Branche. Lithium-Ionen-Batterien enthalten keine umweltschädlichen Schwermetalle wie z. B. Quecksilber oder Blei und sind schon aus diesem Grund schonender für die Umwelt. Die verwendeten Materialien wie Kobalt oder Nickel können mit chemischen und physikalischen Verfahren zu einem großen Teil recycelt werden. Zurzeit wird der Wiederverwertung noch kein allzu hoher Stellenwert beigemessen, da das Recycling aufwändig ist. Allerdings wird dies vor allem für Europa ein immer wichtigeres Thema werden, da Europa die Rohstoffe, die zur Herstellung von Lithium-Ionen-Akkus notwendig sind, nicht besitzt, diese daher importieren muss, oder eben auf recycelte Materialien zurückgreifen muss⁵⁷ - und die Nachfrage für diese wertvollen Rohstoffe wächst rasant an: Der weltweite Bedarf an Kobalt wird im Jahr 2025 bei geschätzten 155.000 t liegen, der von Lithium wird im Jahr 2035 das dreifache Volumen des aktuellen Jahresbedarfs von 30.000 t betragen. Die Rohstoffe sind zwar genügend vorhanden, aber deren

⁵⁴ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 17.

⁵⁵ Vgl. Dorn/Schwartz/Steirich (2013), S. 179.

⁵⁶ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 18.

⁵⁷ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 21 f.

Abbau ist kein umweltfreundlicher Prozess, und nicht alle Länder mit einem hohen Rohstoffvorkommen sind auch bereit, mit dem Abbau zu beginnen.⁵⁸

Interessant sind auch sogenannte „Second Life“-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien, die sich im EoL-Stadium befinden. Diese haben meist noch eine ausreichende Kapazität und können daher für Zweitwendungen, die weniger Anforderungen haben, eingesetzt werden. Somit kann eine höhere Lebensdauer erreicht werden.⁵⁹

⁵⁸ Vgl. Endres (2017), Online-Quelle [10.September.2018]

⁵⁹ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 22.

3 PROZESSOPTIMIERUNG IM SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

3.1 Grundbegriffe und Optimierungsebenen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung eines Prozesses in der Wareneingangskontrolle und somit geht es im übergeordneten Sinn um eine Prozessoptimierung im Bereich Supply Chain Management. In diesem Kapitel werden nun zunächst die wichtigen Begriffe Prozess, Prozessoptimierung und Supply Chain Management definiert und die Zusammenhänge dieser Themengebiete für diese Arbeit beschrieben.

3.1.1 Supply Chain Management

In der Literatur wird Supply Chain Management (kurz SCM) als „*unternehmensgreifende Koordination und Optimierung der Material-, Informations-, und Wertflüsse über den gesamten Wertschöpfungsprozess von der Rohstoffgewinnung über die einzelnen Veredelungsstufen bis hin zum Endkunden mit dem Ziel, den Gesamtprozess unter Berücksichtigung der Kundenbedürfnisse sowohl zeit- als auch kostenoptimal zu gestalten.*“⁶⁰

Oberstes Ziel ist es immer, einen Wert zu generieren, dabei eine wettbewerbsfähige Infrastruktur aufzubauen und Angebot und Nachfrage zu synchronisieren.⁶¹ Dabei ist es wichtig zu verstehen, dass die „Versorgungskette“ vielmehr ein Netzwerk ist, das aus mehreren Partnern (Lieferanten, Kunden) besteht. Zudem ist ein zentraler Aspekt des SCM die Reduktion von Schnittstellen und Verbesserung der Flüsse, um eine tatsächliche Verbesserung der Wertschöpfungskette zu erzielen – und im Mittelpunkt steht immer der Kundennutzen.⁶²

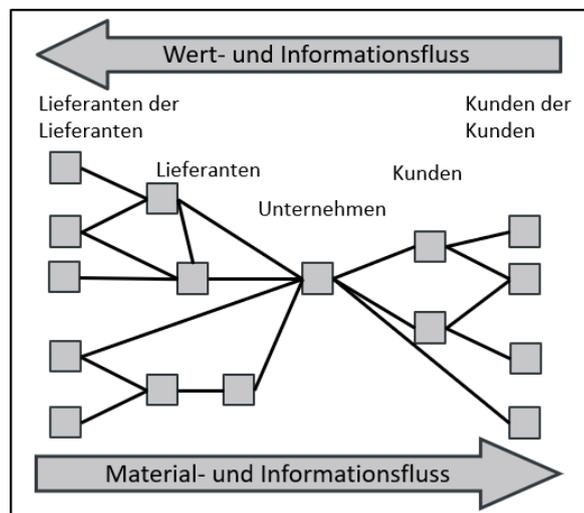


Abbildung 15: Supply Chain Management als Netzwerk, Quelle: Arndt (2008) S. 47 (leicht modifiziert).

⁶⁰ Arndt (2008), S. 47.

⁶¹ Vgl. Schönsleben (2016), S. 11.

⁶² Vgl. Arndt (2008), S. 47 f.

3.1.2 Prozess und Prozessoptimierung

Die Literatur bietet eine Vielzahl von Definitionen für den Begriff des Prozesses. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass es sich bei einem Prozess um eine geordnete Abfolge von Aktivitäten handelt, bei der ein definierter Input in einen definierten Output überführt wird. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht kann ein Prozess auch wie folgt definiert werden:⁶³ „Ein Geschäftsprozess ist eine von einer Kundenanforderung ausgelöste Folge von Aktivitäten, um das vom Kunden gewünschte Ergebnis zu erstellen.“⁶⁴

Daraus ist zu erkennen, dass ein Prozess immer ein Ergebnis – ein Objekt – zur Folge hat. Dieses Prozessergebnis kann ein Werkstück sein, eine Information oder ein Materialfluss. Der Kunde sollte in der Lage sein, seine Anforderungen und Wünsche an das Ergebnis beschreiben zu können. Ein Prozess gibt an, wie das vom Kunden gewünschte Ergebnis erstellt werden soll.⁶⁵ Des Weiteren ist anzumerken, dass komplexe Prozesse oft verschiedene Abteilungen überschreiten und dadurch Schnittstellen entstehen. Die Geschäftsprozesse sind damit meist in Teilprozesse untergliedert.⁶⁶

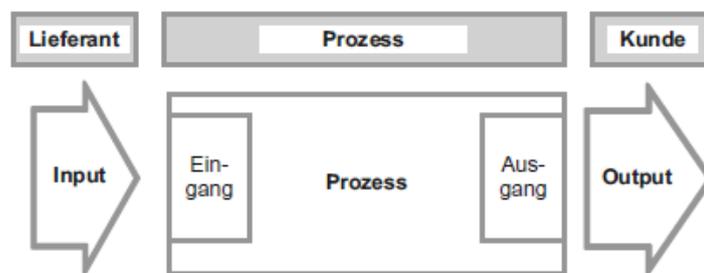


Abbildung 16: Prozessdefinition, Quelle: Becker (2018) S. 8.

Da sich diese Arbeit speziell mit der Prozessoptimierung auseinandersetzt, ist zunächst zu klären, was dieser Begriff bedeutet: Unter einer Prozessoptimierung versteht man grundsätzlich die Verbesserung eines Prozesses in Bezug auf verschiedene Kriterien wie z. B. Qualität, Kosten, Flexibilität, Effizienz und Effektivität.⁶⁷

3.1.3 Optimierungsebenen

Die nachfolgende Abbildung stellt die vier Ebenen dar, in denen Prozessoptimierung stattfinden kann. Darin werden die verschiedenen Handlungsmöglichkeiten sowie die Verbesserungsansätze gezeigt.⁶⁸

⁶³ Vgl. Arndt (2008), S. 77.

⁶⁴ Arndt (2008), S. 77.

⁶⁵ Vgl. Becker (2018), S. 7.

⁶⁶ Vgl. Arndt (2008), S. 77.

⁶⁷ Vgl. Becker (2018), S. 8.

⁶⁸ Vgl. Becker (2018), S. 18.

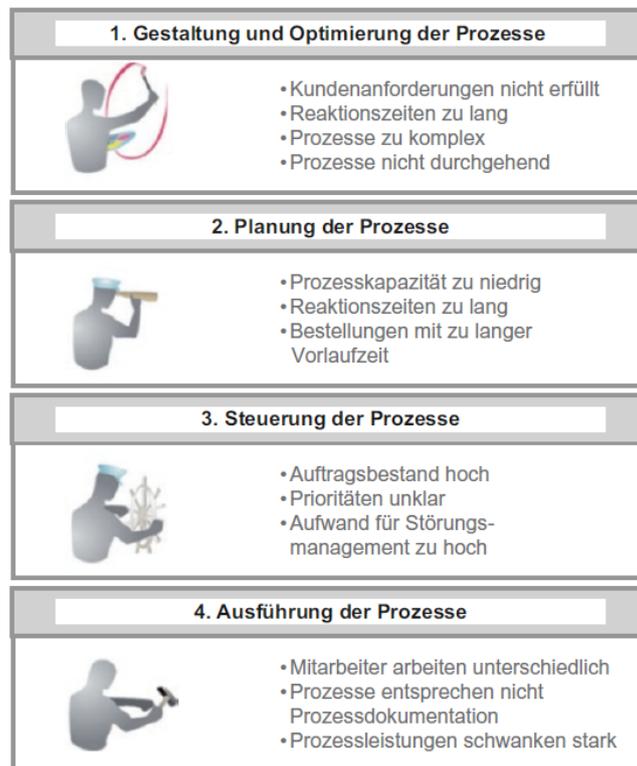


Abbildung 17: Die vier Ebenen der Prozessoptimierung, Quelle: Becker (2018) S.18.

Auf der untersten Ebene steht die Optimierung in der Prozessausführung. Dabei geht es hauptsächlich um die Fehlervermeidung und das Erreichen einer konstanten Prozessleistung. Es werden Prozessdokumentationen erstellt und Standards mit Zielen definiert. Der Beitrag zur Prozessverbesserung ist eher als gering anzusehen. Die nachfolgende Ebene beschäftigt sich mit der Steuerung von Prozessen: Die Aufträge werden auf unterschiedliche Ressourcen aufgeteilt, priorisiert und entsprechend einer Reihenfolge eingeteilt. Diese Handlungen werden in kurzen Zeiträumen (Schichten, Tage) gesetzt und helfen, Engpassressourcen optimal auszulasten und erlauben außerdem, Aufgaben besser zu koordinieren. Darüber steht die Ebene der Prozessplanung: Hier werden die Kapazitäten dimensioniert, die für die kommenden Aufträge zur Abarbeitung benötigt werden. Im Gegensatz zur Steuerung geht es bei der Planung nicht um kurzfristige Aktivitäten bei Sonderfällen, sondern es geht dabei um vorbereitende Handlungen, mit denen Ressourcen vorgehalten oder angepasst werden bzw. auf zukünftige Auftragslasten eingestellt werden. An oberster Stelle steht dann die Prozessgestaltung, die den größten Handlungsspielraum bei der Veränderung von Prozessen ermöglicht: Bestehende Prozesse werden verändert oder neue Prozesse werden geschaffen. Da hier die größten Optimierungen generiert werden können, ist diese Ebene am komplexesten und kann große Auswirkungen auf die unteren Ebenen haben.⁶⁹

3.2 Prozesse und Automatisierungssysteme

Die Prozessautomatisierung ist eines von vielen Instrumenten, die bei einer Prozessoptimierung eingesetzt werden können. Innerhalb des Supply Chain Managements geht es hier vorrangig darum, körperliche

⁶⁹ Vgl. Becker (2018), S. 19 f.

und/oder geistige manuelle Arbeitsschritte durch automatisierte Systeme, wie z. B. Roboter oder Computer, zu ersetzen. Die Vorteile der Automatisierung liegen in der hohen Verfügbarkeit bei gleichbleibender Qualität. Nachteilig können aber die eventuell hohen Investitionskosten von Robotersystemen sein, sowie die laufenden Fixkosten – die Kosten von Mitarbeitern sind nämlich im Vergleich dazu meist wesentlich flexibler zu skalieren. Bei einer Automatisierung muss im Vorfeld eine Standardisierung des Prozesses erfolgen: Standardisieren bedeutet vereinheitlichen, den Abbau von Komplexität und die Eliminierung von nicht-standardisierten Prozessen und/oder Materialien. Durch Standardisierung und Automatisierung verringert sich die Fehlerquote. Außerdem lassen sich dadurch Prozesszeiten beschleunigen und Nacharbeiten bzw. Umpfanungen können reduziert werden.⁷⁰

Die Konfigurationen von Automatisierungssystemen sind vielfältig und es gibt daher nahezu unbegrenzte Möglichkeiten. Allerdings sind die Strukturen dieser Systeme meist sehr ähnlich, wie die nachfolgende Abbildung zeigt.⁷¹

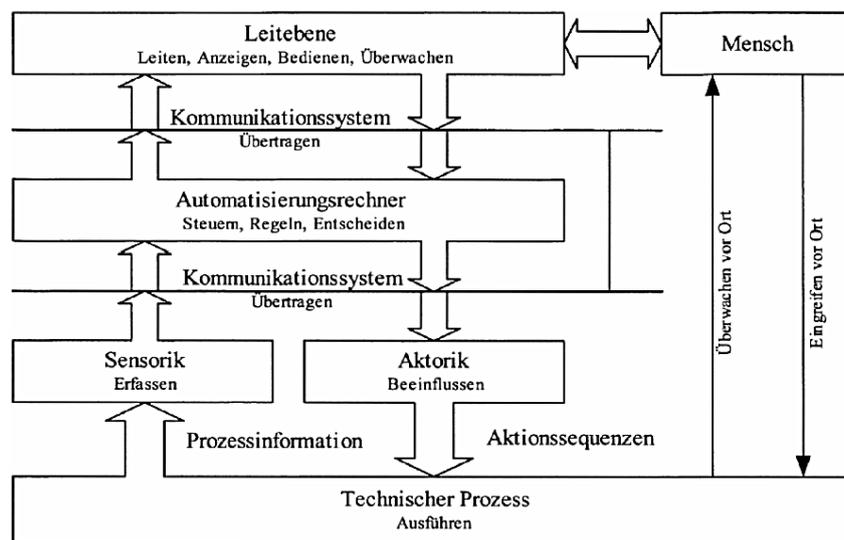


Abbildung 18: Generischer hierarchischer Aufbau eines industriellen Automationssystems, Quelle: Favre-Bulle (2004) S. 18

Es geht grundsätzlich immer um technische Prozesse, die bereits in Kapitel 1.3. näher erläutert wurden, sowie um die Erfassung von Zustandsgrößen durch Sensoren, die über Kommunikationssysteme weitergeleitet werden an Automatisierungsrechner. Dort werden die Daten in Programmen verarbeitet und daraus werden Handlungsentscheidungen generiert, die mittels Aktoren den technischen Prozess beeinflussen.⁷²

⁷⁰ Vgl. Liebetruh (2016) S. 99 ff.

⁷¹ Vgl. Favre-Bulle (2004), S. 17.

⁷² Vgl. Favre-Bulle (2004), S. 17.

3.3 Methoden zur Prozessoptimierung

3.3.1 Prozess-Reengineering

Beim Prozess-Reengineering wird hinterfragt, wie man den Prozess durchführen würde, wenn man damit ganz neu beginnen würde. Die bereits vorhandenen Strukturen und Abläufe werden dabei gänzlich außer Acht gelassen, da diese meist historisch gewachsen sind und aufgrund von neuen Rahmenbedingungen oft nicht mehr angemessen sind.⁷³ Es geht dabei also um eine radikale Neugestaltung von Unternehmensprozessen, wobei eklatante Verbesserungen in puncto Zeit, Kosten, Kundenservice und/oder Qualität erreicht werden sollen. Das Hauptaugenmerk liegt in der Effektivitäts- („die richtigen Dinge tun“) und in der Effizienzsteigerung („die Dinge richtig tun“).⁷⁴

Prozess-Reengineering, oft auch Business Process Reengineering (kurz BPR) genannt, basiert auf fünf Hauptprozessen, die in der Abbildung 19 ersichtlich sind. Im ersten Schritt muss der aktuelle Prozess identifiziert werden, damit alle Personen, die an der Neugestaltung arbeiten, sich ein Bild des Status quo machen zu können. Ziel ist es, die Hintergründe zu erkennen und auch Einflussfaktoren zu definieren. Danach geht es darum, aus Perspektive des Kunden zu hinterfragen, was denn der Kunde benötigt und was der Prozess bieten muss, um die Grundanforderungen zu erfüllen. Als nächstes wird der gesamte Prozess infrage gestellt. Hier stehen nun alle Annahmen im Fokus, die den Prozess beeinflussen: Arbeitsteilung, Ablauforganisation, Räumlichkeiten, zeitlicher Ablauf, Ressourcengestaltung und Verantwortlichkeiten. Neben der Identifizierung von Schwachstellen sind auch die Ziele für den neuen Prozess zu definieren. Danach geht es im Schritt vier um die radikale Neugestaltung des Prozesses, um dann im letzten Schritt die notwendigen Änderungen zu implementieren und umzusetzen.⁷⁵

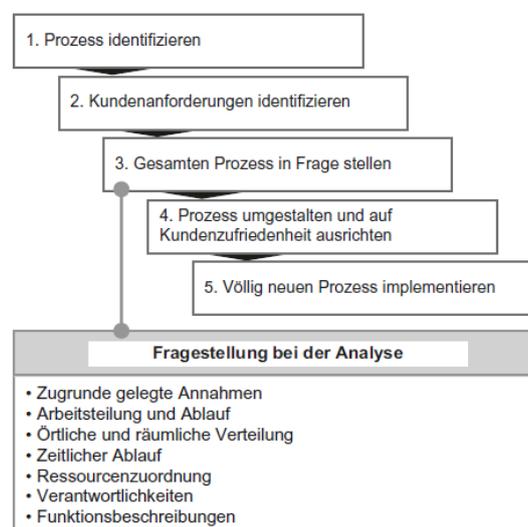


Abbildung 19: Ablauf Prozess-Reengineering, Quelle: Becker (2018) S. 27

⁷³ Vgl. Arndt (2008), S. 78.

⁷⁴ Vgl. Becker (2018), S. 23 f.

⁷⁵ Vgl. Becker (2018), S. 27 f.

3.3.2 Prozessoptimierung

Unter Prozessoptimierung versteht man, „*bestehende Prozesse derart zu verändern oder neu zu gestalten, dass sie den Zielsetzungen besser entsprechen.*“⁷⁶ Zur Erreichung dieser Verbesserung sind folgende Schritte notwendig: Zuerst wird eine Ist-Analyse durchgeführt, anhand derer Ziele gesetzt werden. Anschließend werden Maßnahmen zur Umsetzung eingeleitet.⁷⁷

Hauptaugenmerk ist die Umgestaltung des Prozessablaufs und die gleichzeitige Beibehaltung der bestehenden Strukturen. Die Teilprozesse, Handlungen und Schritte werden dabei einzeln betrachtet. Dabei sollen folgende Leitlinien beachtet werden: Nicht notwendige Aktivitäten sind zu eliminieren, der Prozess soll vereinfacht und die Prozesszeit reduziert werden. Außerdem soll der Prozess standardisiert und gegebenenfalls automatisiert werden. Es sind Dokumentationen für den neuen Prozess zu erstellen, sowie Mitarbeiterschulungen durchzuführen. Zudem sind für die Fortschrittskontrolle Kennzahlen zu definieren, anhand derer der neue Prozess kontrolliert und gemessen werden kann. Damit einher geht die Zieledefinition, um die Prozessverbesserung mit den definierten Zielen abgleichen zu können. Wenn alle Schritte abgeschlossen sind, ist es wichtig, in regelmäßigen Abständen den Prozess zu prüfen und wiederum die vorher genannten Schritte durchzuführen, um dauerhaft einen effektiven und effizienten Einsatz von Ressourcen (Kapital, Personal, Zeit) zu erreichen.⁷⁸

3.3.3 Prozessmusterwechsel

Die laufende Optimierung bestehender Prozesse erzielt zwar gute Ergebnisse, hat aber auch ab einem gewissen Punkt ihre Grenzen erreicht. Hier kann ein weiterer Leistungssprung nur mehr durch die Änderung der Arbeitsweise – des Prozessmusters – erreicht werden. Dies wird unter dem Schlagwort „Next practice“ zusammengefasst und bedeutet, dass erst mit einer Innovation in der Arbeitsweise ein Leistungssprung erreicht werden kann. Diese oft disruptiven Neuerungen können den Prozess massiv beeinflussen und verändern. Unternehmen sind daher angehalten, technische Prozessinnovationen ständig zu beobachten und generell die bestehenden Arbeitsabläufe und Prozesse ständig infrage zu stellen. In der Vorgehensweise unterscheidet sich der Prozessmusterwechsel zu den anderen Methoden dahingehend, dass zuerst Leistungsgrenzen ermittelt werden müssen. Dabei werden Normal-, Schlecht- und Bestleistungen im Prozess bewertet und im folgenden Schritt wird ein alternativer Prozess zur Überwindung dieser Grenzen erarbeitet.⁷⁹

3.3.4 Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (Kaizen)

Der kontinuierliche Verbesserungsprozess (KVP) bezeichnet die nie aufhörende Anstrengung, in der das Verbessern in kleinen Schritten zum Leitprinzip wird („der Weg ist das Ziel“). In Japan wird dafür der Begriff

⁷⁶ Arndt (2008), S. 79.

⁷⁷ Vgl. Arndt (2008), S. 79.

⁷⁸ Vgl. Becker (2018), S. 30 f.

⁷⁹ Vgl. Becker (2018), S. 32 ff.

„Kaizen“ verwendet, und dort bedeutet es im Grunde dasselbe: Es ist nicht das Ziel, ein bestimmtes Qualitätsniveau zu erreichen, sondern vielmehr um einen bestimmten Grad der Verbesserung der Qualität.⁸⁰

Beim KVP geht es also nicht um eine einzelne, große Veränderung, aber um permanente kleine Verbesserungsschritte. Die aktuellen Prozesse werden also nicht ersetzt, sondern ständig verbessert. Eine wichtige Grundlage für Kaizen/KVP ist eine entsprechende Unternehmenskultur, welche Wandel nicht als eine Bedrohung sieht.⁸¹

Als wichtigstes Instrument für die kontinuierliche Verbesserung dient der PDCA-Verbesserungszyklus. PDCA steht für Planen (Plan), Durchführen (Do), Überprüfen (Check) und Verbessern (Act). Es ist notwendig, die Arbeitsprozesse regelmäßig zu reflektieren und etwaige Probleme zu identifizieren. In weiterer Folge werden Maßnahmen zur Lösung entwickelt, diese umgesetzt und permanent die Ergebnisse überwacht.⁸²



Abbildung 20: PDCA-Verbesserungszyklus, Quelle: Kostka/Kostka (2017) S. 7.

Mit dem KVP lassen sich, bei entsprechender Projektbegrenzung, wesentliche Veränderungen initiieren und umsetzen. Allerdings ist dieser Ansatz weniger geeignet für größere, abteilungsübergreifende Prozessveränderungen.⁸³

3.4 Prinzipien der Prozessverbesserung

Die in den vorangegangenen erläuterten Punkten behandeln ausgewählte Methoden zur Prozessverbesserung, die je nach Art des Optimierungsprojektes angewendet werden können: Von der kontinuierlichen Verbesserung in kleinen Schritten (KVP) bis hin zur radikalen Prozessveränderung (BPR) gibt es somit verschiedenste Optimierungsansätze. In der Lehre gibt es im Allgemeinen einige Leitlinien zur Prozessverbesserung, wie z. B. Eliminieren, Auslagern, Beschleunigen, Verkürzen, Zusammenfassen etc. Die

⁸⁰ Vgl. Schönsleben (2016), S. 752.

⁸¹ Vgl. Arndt (2008), S. 78.

⁸² Vgl. Kostka/Kostka (2017), S. 7.

⁸³ Vgl. Becker (2018), S. 36.

nachfolgende Abbildung zeigt eine Übersicht dieser Prinzipien. Im Mittelpunkt stehen dabei die Ziele der Prozessverbesserung und rund um die Ziele sind diese generischen Prinzipien in Gelb dargestellt. Wie in dieser Abbildung ersichtlich, gibt es darüber hinaus eine Vielzahl an Instrumenten zur Prozessverbesserung im Supply Chain Management.⁸⁴



Abbildung 21: Übersicht Prinzipien und Konzepte Prozessverbesserungen, Quelle: Liebetruh (2016) S. 97 (leicht modifiziert).

⁸⁴ Vgl. Liebetruh (2016), S. 95 ff.

4 PROZESSANALYSE

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Wareneingangsprozess von Batteriezellen im Unternehmen AVL List GmbH Graz in der Business Unit Powertrain Engineering (PTE). In diesem Geschäftsbereich geht es um die Entwicklung von Antriebssträngen aller Art (Dieselmotoren, Elektroantriebe etc.). Die Elektrifizierung hat in den letzten Jahren stark zugenommen und immer mehr OEM investieren in den nachhaltigen E-Motor. Somit ist auch die Anzahl an Entwicklungsprojekten in diesem Bereich stark gestiegen und die Prognosen zeigen einen weiteren positiven Trend an.

Daneben fokussiert sich das Unternehmen nicht mehr nur auf den reinen Prototypenbau, sondern bietet auch die Fertigung von Kleinserien an. Dieses Angebot wird von Kunden auch sehr gut angenommen und deswegen steigen auch hier die Auftragszahlen rasant an.

Für Projekte mit Batteriezellen bringen die eben ausgeführten Aspekte einige Herausforderungen für den Wareneingang mit sich:

1. Unterschiedliche Zelltypen: Aufgrund der Tatsache, dass es bei den Projekten im Wesentlichen immer um Neuentwicklungen handelt, werden auch unterschiedliche Zellformen und -typen angeliefert (Rundzellen, prismatische Zellen, Pouch-Zellen).
2. Qualitätskennzahlen und Messungen: Es handelt sich um Batteriezellen, die sich in einem noch nicht serienreifen Zustand befinden. Dies bedeutet, dass jede Zelle einer 100 % Qualitätskontrolle entsprechend der vorgegebenen Kriterien unterzogen werden muss, da von keinen einheitlichen Produkten ausgegangen werden kann.
3. Umfang und Prozesseffizienz: Der Anlieferungs- und Kontrollprozess wird immer aufwändiger und komplexer, da die Projektanzahl und auch die Anzahl an Kleinserienfertigungen stetig steigen. Für Prototypen, bei denen ca. 1.000 Zellen zu prüfen sind, ist die manuelle 100%-Prüfung noch vertretbar und in einem effizienten Maße ausführbar. Für kommende Kleinserienprojekte mit ca. 100.000 Zellen ist dies mit den vorhandenen Ressourcen nicht mehr im notwendigen Ausmaß umzusetzen, daher ist eine Prozessoptimierung in jedem Fall unverzichtbar.

Im Folgenden wird nun der aktuelle Wareneingangsprozess in den Einzelschritten dargelegt und analysiert – gemäß den in Kapitel 3.3 vorgestellten Methoden. Aufgrund der oben beschriebenen Punkte orientiert sich diese Analyse stark an die Methoden des Prozess-Reengineering und der Prozessoptimierung, da die anderen Werkzeuge zur Prozessoptimierung für die vorliegende Thematik eher unpassend sind. Sollte sich aus der Analyse ergeben, dass ein Prozessmusterwechsel oder aber ein KVP sinnvoll wären, so wird dies entsprechend behandelt.

Der Prozessablauf ist unabhängig von der Zellform in seinen Grundzügen ident. Deshalb werden die Prozessschritte anhand eines Projektes mit Rundzellen mit einer Nennspannung von 3,26 V bei einem SOC von 25 % bei Anlieferung beschrieben.

4.1 Beschreibung Ist-Situation

4.1.1 Identifikation

Die Rundzellen werden in Kartons zu je 140 Stück angeliefert. Auf den Kartons sind folgende Informationen vermerkt: Absender, Empfänger und die Chargennummer. Die Batteriezellen selbst sind mit DataMatrix-Codes der Lieferanten versehen, die deren Seriennummer enthalten. Mithilfe eines Handscanners werden diese Daten ausgelesen und in einer Excel-Tabelle gepflegt. Zusätzlich dazu wird in dieser Liste auch manuell eine AVL-Seriennummer für jede Zelle generiert.



Abbildung 22: Rundzelle mit DataMatrix-Code, Quelle: Eigene Darstellung.

4.1.2 Messungen

Da es sich um keine Serienprodukte handelt, muss jede Batteriezelle einer 100%-Kontrolle unterzogen werden, bei der einige Messungen durchzuführen sind, die nachfolgend beschrieben werden. Die Messungen erfolgen rein manuell. Die abgelesenen Werte werden von den Mitarbeitern ebenfalls in die Excel-Tabelle eingetragen.

4.1.2.1 Dimensionsmessung

Für Rundzellen werden die Abmessungen im aktuellen Prozess nur grob geprüft, und zwar einerseits durch eine manuelle Sichtprüfung auf Dellen und Beschädigungen und andererseits mittels einer eigens erstellten Lehre. Diese Lehre besteht aus zwei Öffnungen: Bei Öffnung A ist der Durchmesser außerhalb der unteren Toleranzgrenze. Wenn die Zelle in die Öffnung A passt, ist ihr Durchmesser zu gering und sie ist auszumustern. Nach erfolgreicher Prüfung bei Öffnung A wird die Zelle bei Öffnung B geprüft: Wenn sie hier nicht eingeführt werden kann, ist ihr Durchmesser zu groß. Passt die Zelle in Öffnung B, entspricht sie dem gewünschten Durchmesser. In die Liste wird dann per „Ja“- oder „Nein“-Eintragung vermerkt, ob der Durchmesser in Ordnung ist.



Abbildung 23: Messung des Durchmessers mittels Lehre, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Art der Messung ist die im Moment effizienteste Möglichkeit, um zu kontrollieren, ob die Batteriezelle den Abmessungen entspricht und später auch verbaut werden kann. Grobe Beschädigungen wie Dellen o. ä. werden mithilfe der Sichtprüfung erkannt.

Bei Zellen mit einer anderen Geometrie kann diese Lehre nicht angewendet werden. Hier wird meist ein Messschieber oder ein Außenmikrometer zur Dimensionsmessung eingesetzt.

4.1.2.2 Längenmessung

Die Längenmessung wird mittels digitaler Messuhr durchgeführt. Der abgelesene Messwert wird ebenfalls manuell in die Tabelle eingetragen.



Abbildung 24: Digitale Messuhr zum Messen der Zelllänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei Rundzellen muss die Länge innerhalb einer bestimmten Toleranz liegen, die für die Mitarbeiter in der Tabelle vermerkt ist. Wenn die Zelle nicht den notwendigen Werten entspricht, wird sie ausgemustert, da sie ansonsten nicht in die späteren Modulformen passt.

4.1.2.3 Gewichtsmessung

Das Wiegen der Zelle erfolgt mithilfe einer Präzisionswaage und einer darauf gestellten Schütte. Vor der Messung ist die Waage zu tarieren. Danach wird die Zelle in die Schütte gelegt, und auch hier wird dann der abgelesene Messwert in die dafür vorgesehene Spalte in der Tabelle eingetragen.



Abbildung 25: Präzisionswaage zur Gewichtsmessung der Batteriezelle, Quelle: Eigene Darstellung.

4.1.2.4 Erste Spannungsmessung

Zur Messung der Spannung und des Innenwiderstands wird jede Zelle manuell gemessen. Als Messmittel dient ein Batterietestgerät der Marke „Hioki“ Typ BT3563. Die Mitarbeiter nehmen je eine Batteriezelle, legen die Kontakte an und lesen den Spannungswert der Zelle in Volt und den Wert des Innenwiderstands in Milliohm aus. Diese Werte werden wiederum in die Messwerttabelle eingetragen.



Abbildung 26: Manuelle Kontaktanlage, Quelle: Eigene Darstellung.

Wichtig ist hierbei auch, dass der Tag, an dem die Messung durchgeführt wurde, ebenfalls in der Liste gepflegt wird. Dies ist notwendig, um später vor dem Zusammenbau die Zellentladung messen zu können.

4.1.3 Einlagerung

Nach den erfolgten Messungen werden die Gutteile zu je 140 Stück in jene Kartons eingelagert, mit denen sie angeliefert wurden. Die Kartons werden aufsteigend nummeriert. Die Beschriftung erfolgt per Hand. Um eine den Batteriezellen gerechte Lagerung zu ermöglichen, gibt es im Unternehmen einen eigenen Lagerort, in dem eine konstante Raumtemperatur von 25 °C herrscht. Je nach Projekt ist die Dauer der Lagerung unterschiedlich – sie liegt derzeit zwischen vier und acht Wochen.

4.1.4 Zweite Spannungsmessung vor Zusammenbau

Der Zusammenbau der einzelnen Batteriezellen zu sogenannten Batteriepacks bzw. Batteriemodulen erfolgt erst einige Wochen oder Monate nach der Anlieferung. Dabei wird die Spannungsmessung erneut durchgeführt. Bei Rundzellen erfolgt dies allerdings nicht auf demselben Weg wie bei der Eingangskontrolle, sondern wie folgt: Für den Zusammenbau zu Batteriepacks wird ein eigens von AVL entwickeltes Messmodul verwendet, das einerseits die Spannungsmessung ermöglicht und andererseits die korrekte Polarität der Zellen für das jeweilige Projekt ermittelt. Mit dem sogenannten „Polarity Tester“ werden die Rundzellen bereits in die entsprechende Modulform eingelegt. Mit dem Gerät können die 48 Zell-Input-Signale gemessen werden. Mithilfe der eigens programmierten Software wird dem Anwender am Bildschirm dann per Ampelsystem der Zellstatus angezeigt.

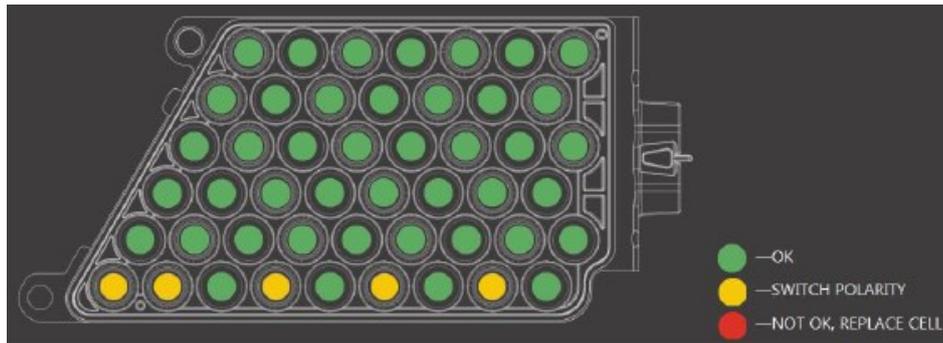


Abbildung 27: Screenshot AVL Polarity Tester - Ampelsystem Statusanzeige, Quelle: AVL-interne Dokumentation.⁸⁵

Sobald ein Batteriepack gemäß dem Polarity Tester für in Ordnung befunden wird, bleiben die 48 Rundzellen in der Modulform stehen und werden so zwischengelagert. Selbst wenn für alle Zellen durch diesen Test angezeigt wird, dass genügend Spannung vorhanden ist, kann noch nicht von fehlerfreien Zellen ausgegangen werden. Dafür müssen zuerst die nun gemessenen Werte mit jenen der Erstmessung verglichen werden, um feststellen zu können, ob die Zellentladung innerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegt.

Der Polarity Tester ermöglicht es, einen Report zu generieren, der als Excel-Tabelle an die Qualitätsabteilung geschickt wird. Die Datei enthält grundsätzlich nur den Spannungswert, der DataMatrix-Code wird separat mittels Handscanner ausgelesen und der Tabelle hinzugefügt. Mit dieser Information kann dann der Abgleich mit den Messdaten der Erstmessung stattfinden.

4.1.5 Datenerfassung und -auswertung

Wie bereits in den vorherigen Prozessschritten beschrieben wurde, werden alle gemessenen Werte und Daten der Batteriezellen in einer Excel-Tabelle zusammengefasst. Diese beinhaltet nun folgende Informationen: AVL-Seriennummer, Kartonnummer, Seriennummer des Lieferanten und die Messwerte (Länge, Gewicht, Durchmesser, Spannung und Innenwiderstand). Zusätzlich wird noch das Datum, an welchem die Messungen durchgeführt wurden, vermerkt, und ob die Zellen mit einem Schrumpfschlauch versehen sind. Nachfolgend werden weitere Datenquellen beschrieben, sowie der Prozess der Zusammenführung und Analyse der Kennwerte.

AVL SN	Box	A123 SerialNumber	measured date	length min mm	length max mm	measured length [mm] 69,7	measured length [mm] 69,7	diameter 18,3 [mm]	weight [g]	Voltage [V]	IRAC [mOhm]	Heatshrink [Ja/Nein]	remark
1	#1.1	300209003UH1409001BX04519A12187055	01.01.2018	69,15	70,25	69,87	69,87	ja	38,21	3,280	2,7696	orange	
2	#1.1	300209003UH1409001BX04842A12187378	01.01.2018	69,15	70,25	69,85	69,85	ja	38,13	3,2746	2,789	orange	
3	#1.1	300209003UH1409001BX04784A12187320	01.01.2018	69,15	70,25	69,89	69,89	ja	38,18	3,27667	2,751	orange	
4	#1.1	300209003UH1409001BX04913A12187449	01.01.2018	69,15	70,25	69,86	69,86	ja	38,22	3,27785	2,7015	orange	
5	#1.1	300209003UH1409001BX04195A12186731	01.01.2018	69,15	70,25	69,79	69,79	ja	38,2	3,27874	2,7861	orange	
6	#1.1	300209003UH1409001BX04206A12186742	01.01.2018	69,15	70,25	69,88	69,88	ja	38,15	3,27649	2,7554	orange	
7	#1.1	300209003UH1409001BX04798A12187334	01.01.2018	69,15	70,25	69,77	69,77	ja	38,22	3,2761	2,7813	orange	
8	#1.1	300209003UH1409001BX04265A12186801	01.01.2018	69,15	70,25	69,78	69,78	ja	38,23	3,27932	2,6767	orange	
9	#1.1	300209003UH1409001BX04769A12187305	01.01.2018	69,15	70,25	69,82	69,82	ja	38,16	3,27579	2,7453	orange	
10	#1.1	300209003UH1409001BX04945A12187481	01.01.2018	69,15	70,25	69,82	69,82	ja	38,28	3,27682	2,7125	orange	
11	#1.1	300209003UH1409001BX04328A12186864	01.01.2018	69,15	70,25	69,89	69,89	ja	38,12	3,27848	2,5779	orange	
12	#1.1	300209003UH1409001BX03724A12186260	01.01.2018	69,15	70,25	69,83	69,83	ja	38,1	3,28407	2,7515	orange	
13	#1.1	300209003UH1409001BX00830A12183437	01.01.2018	69,15	70,25	69,87	69,87	ja	38,47	3,27005	2,6882	orange	
14	#1.1	300209003UH1409001BX03649A12186185	01.01.2018	69,15	70,25	69,83	69,83	ja	37,99	3,28546	2,6591	orange	
15	#1.1	300209003UH1409001BX04373A12186909	01.01.2018	69,15	70,25	69,85	69,85	ja	38,16	3,27817	2,6467	orange	

Tabelle 1: Auszug Excel-Tabelle "Zellvermessung", Quelle: Eigene Darstellung.

⁸⁵ Liegt der Autorin vor.

4.1.6 Datenquellen

Alle Messwerte in der Tabelle sind manuell ausgelesene Werte von den unterschiedlichen Messgeräten (Präzisionswaage, Batterietester). Zusätzlich dazu ist auf den Zellen ein DataMatrix-Code angebracht, der die Seriennummer des Lieferanten enthält. Dieser wird mittels Handscanner ausgelesen. Die AVL-Seriennummer ist eine in der Excel Datei angelegte fortlaufende Nummer – gleiches gilt für die Kartonnummer.

Eine weitere Datenquelle sind die ausgelesenen Spannungsmesswerte des Polarity Testers während des Zusammenbaus. Mit dem Gerät wird eine separate Excel-Tabelle erstellt, die dann an die zuständigen Mitarbeiter in der Qualitätsabteilung zur Prüfung gesendet wird.

Zusätzlich dazu kann optional ein dritter Spannungswert der Batteriezellen vom Lieferanten übermittelt werden. Dieser Wert gibt die Spannung am Tag der Auslieferung der Zellen an. Allerdings steht diese Information nicht immer zur Verfügung und ist somit ein optionaler Messwert.

4.1.7 Zusammenführen und Kalkulation der Kennwerte

Die Mitarbeiter im Wareneingang tragen folgende Werte ein:

- Seriennummer AVL, Kartonnummer: fortlaufende Nummer automatisch generiert in Excel
- Seriennummer des Lieferanten: ausgelesen mittels Handscanner aus DataMatrix-Code
- Spannung, Innenwiderstand, Gewicht und Länge: abgelesene Messwerte von Messgeräten
- Durchmesserprüfergebnis: durch manuelle Lehre geprüft, Angabe „Ja“ oder „Nein“ in Tabelle

Die zweiten Messwerte am Tag des Zusammenbaus werden in ein eigenes Blatt in der Tabelle ergänzt, da dies automatisiert aus dem Polarity Tester generiert wurde und erst via Excel Funktionen mit den anderen Daten zusammengeführt werden muss. Dasselbe gilt für die Spannungsmesswerte des Lieferanten. Es ist notwendig, zumindest zwei Spannungsmessungen an unterschiedlichen Tagen durchzuführen. Nur so kann die Zellentladung gemessen werden. Diese darf bei Rundzellen mit einer Nennspannung von 3,26 V bei nur 0,14 mV pro Tag liegen. Mithilfe von Excel-Funktionen lässt sich so die Zellentladung pro Tag berechnen. Dazu benötigt man den Messwert am Tag der Anlieferung und den weiteren Messwert, der am Tag des Zusammenbaus gemessen wird. Anhand der verstrichenen Tage zwischen den zwei Messungen kann die Zellentladung berechnet werden. Idealerweise wird zusätzlich noch der vom Lieferanten übermittelte Spannungswert ebenfalls in die Kalkulation mit einbezogen, um noch genauere Daten zu erhalten. Um ein aussagekräftiges Ergebnis bzgl. Zellentladung zu erhalten, müssen also mindestens 24 Stunden zwischen den Messungen liegen. Aktuell werden die Zellen zu unterschiedlichen Zeitpunkten vermessen, da die Zweitmessung kurz vor dem Zusammenbau stattfindet und dieser Zeitpunkt ist je nach Projekt unterschiedlich.

4.1.8 Identifikation von Schlechtzellen

Batteriezellen, die während des Wareneingangsprüfprozesses außerhalb der Längen- und Durchmesser-toleranzen liegen, werden sofort ausgemustert. Batterien, die eine zu hohe Selbstentladungsrate aufweisen, können erst später im Prozess identifiziert werden. Erst ab der zweiten Messung der Spannung, die beim Zusammenbau zu einem Batteriepack durchgeführt wird, kann erkannt werden, ob sich die Batteriezelle zu schnell entlädt. Da die Übermittlung der Daten erst nach Prüfung aller Zellen an die Qualitätsabteilung

übermittelt wird, ist nicht sofort während des Einsatzes des Polarity Testers erkennbar, welche Batteriezellen einen Wert außerhalb der Toleranz aufweisen. Nach Verwendung des Polarity Testers verbleiben die Zellen in den Batteriepackformen und der Zusammenbau wird erst nach der Freigabe der Qualitätsabteilung fortgesetzt.

Sobald alle Excel-Tabellen zusammengefügt wurden, ist mittels Filterfunktion klar, welche Zellen nicht in Ordnung sind und ausgemustert werden müssen. Die Qualitätsabteilung gibt dann die Seriennummern an die zuständigen Mitarbeiter weiter und diese müssen dann in den jeweiligen Modulen die Schlechtzellen unter Zuhilfenahme des Handscanners herausuchen und ausmustern. Der Ausschuss wird nicht mehr erneut aufgeladen, da sich die Zellen durch den höheren Innenwiderstand wiederum schneller entladen würden. Diese Zellen werden mittels einer Sperrkarte gekennzeichnet und zum Teil für Tests verwendet, oder aber sie werden an den Hersteller retourniert.

4.1.9 Überblick

Der hier beschriebene Prozess ist derzeit in keiner Verfahrensanweisung oder in anderen Qualitätsdokumenten schriftlich festgehalten. Deshalb ist es wichtig, mithilfe eines Prozessflussdiagramms die einzelnen Prozessschritte darzustellen und so einen Überblick zu schaffen. Anhand der Beschreibungen in den vorherigen Punkten wurde das nachfolgende Prozessdiagramm erstellt.

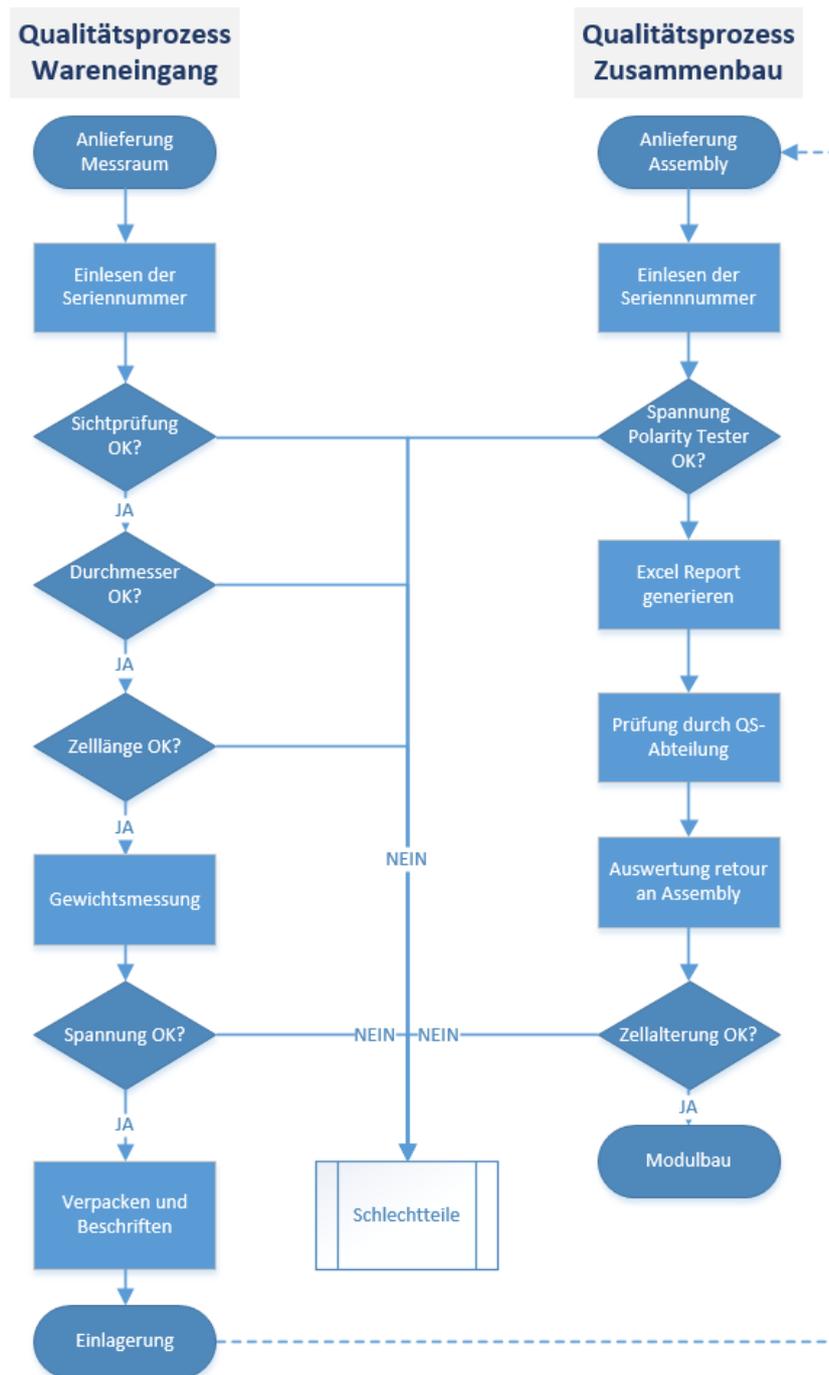


Abbildung 28: Prozessflussdiagramm des aktuellen Prozesses bei Rundzellen, Quelle: Eigene Darstellung.

Anhand dieser Darstellung ist zu erkennen, dass eine Vielzahl an Schritten notwendig ist, um den kompletten Kontrollvorgang durchzuführen. Das Prozessflussdiagramm bietet einen guten Überblick und ist ein mächtiges Instrument in der obersten Prozessoptimierungsebene (siehe Abbildung 17), denn damit kann der Prozess aus der Vogelperspektive betrachtet werden. Bereits durch Veränderung einiger weniger Blöcke können große Auswirkungen für die unteren Ebenen generiert werden. Hiermit können also erste Überlegungen gemäß einigen Prinzipien der Prozessverbesserung wie z. B. Reihenfolge verändern, eliminieren oder bündeln (siehe Abbildung 21) angestrebt werden.

Es lassen sich damit aber keine Rückschlüsse über den Zeitaufwand bzw. die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Schritten ziehen. Dies liegt mitunter auch daran, dass es keine definierten

Prozesszeiten gibt und dadurch spielt das Thema Zeit im aktuellen Prozess eine große Rolle, da hier teilweise Tage zwischen den einzelnen Aufgaben liegen. Dieser Umstand, sowie die verwendeten Methoden innerhalb der Prozessschritte, müssen bei näheren Betrachtungen immer berücksichtigt werden.

4.2 Anforderungen und Ziele

Wie oben ausführlich beschrieben, handelt es sich momentan um einen rein manuell ausgeführten Prozess, der teilweise mit unzureichenden Messmitteln umgesetzt wird. Zudem kommt, dass es keine offizielle Prozessbeschreibung oder Arbeitsanweisungen gibt. Dies erschwert die Definition von Anforderungen und Zielen zusätzlich. Es ist nun notwendig, die einzelnen Schritte zu betrachten und gemeinsam mit den internen Anforderungen der Qualitätsabteilung des Unternehmens und den Kundenanforderungen die Ziele an den Prozess zu definieren.

4.2.1 Spannungswerte

Die Ergebnisse der Spannungsmessungen sind ein zentraler Aspekt im aktuellen Kontrollprozess. Sie sind auf zweierlei Art wichtig: Erstens wird geprüft, ob eine Zelle grundsätzlich zu wenig Spannung gemäß Konstruktionsangaben hat und ausgemustert werden muss und zweitens kann damit abgeglichen werden, ob sich die Zelle zu schnell entlädt. Beide Kriterien wurden bereits im Kapitel 2.3 näher erläutert. Um feststellen zu können, ob der Zellentladungsprozess zu schnell vorstattengeht, sind zwei Messungen notwendig. Der zeitliche Abstand zwischen den beiden Messwerten ist projektabhängig und variiert aktuell zwischen vier und acht Wochen und wird im Zuge des Batteriezusammenbaus gestartet. Dadurch ergeben sich zeitliche Verzögerungen im Projekt. Dazu kommt noch, dass die zweite Messung zurzeit mit einem anderen Gerät durchgeführt wird – dem AVL Polarity Tester. Summa summarum lassen sich im Sinne einer Prozessoptimierung und Standardisierung somit folgende Anforderungen definieren:

- Die zwei Messungen sind in einem fest definierten Abstand von mindestens 24 Stunden durchzuführen, um damit den Wareneingangsprozess abzuschließen und die Freigabe für den Zusammenbau zu erteilen.
- Der Polarity Tester ist aus dem Prozess auszuschließen, da dieses Gerät nur für ein bestimmtes Rundzellenprojekt entwickelt wurde und somit nicht universell eingesetzt werden kann. Im Sinne einer Standardisierung wäre dies kontraproduktiv.

4.2.2 Geometrische Daten

Die Messung der Dimensionen ist ein weiteres wichtiges Qualitätskriterium von Lithium-Ionen-Zellen, und zwar aus mehreren Gründen: Zum einen sind die geometrischen Daten notwendig, um herauszufinden, ob sich die Zelle innerhalb der definierten Toleranzen befindet oder Deformationen aufweist. Andererseits sind die Dimensionen wichtig, um bei einer später durchgeführten Messung feststellen zu können, ob sich z. B. der Durchmesser verändert hat – also, ob eine Volumenausdehnung stattgefunden hat.

Dieses Phänomen kann einerseits während der Einlagerung passieren und ist ein Alterungsvorgang in der Batteriezelle, der den Aktivmaterialien geschuldet ist, oder es passiert im laufenden Betrieb. Dabei ändert sich das Volumen der Partikel und diese Belastung führt unter Umständen zur Auftrennung der elektrischen Leitpfade: Die Aktivmaterial-Partikel sind dann nicht mehr elektrisch mit den Stromableitern verbunden. Der

Vorgang kann sowohl an der positiven als auch an der negativen Elektrode stattfinden.⁸⁶ Daraus ergeben sich nun mechanische Spannungen, die zu Rissen in der Elektrode führen können, dadurch ergibt sich ein Kapazitätsverlust.⁸⁷ Im schlimmsten Fall kann dies auch zu einem „Thermal Runaway“ führen, der bereits in Kapitel 2.4.1 näher erläutert wurde. Andererseits sind derartige Verformungen auch nach einigen Betriebsstunden möglich.

Bis dato wurde die Vermessung der Geometrie im soeben beschriebenen Ausmaße vernachlässigt. Die Anforderungen an den Wareneingangsprozess in diesem Punkt sind nicht klar definiert. Einerseits ist es verpflichtend notwendig, den Durchmesser zu messen, andererseits wäre eine gesamte Geometrievermessung wünschenswert, um spätere Verformungen im Betrieb herauszufinden. Aufgrund der nicht eindeutigen Richtungsvorgabe gibt es für die Prozessneugestaltung unterschiedliche Betrachtungsszenarien zur Geometrievermessung, die nachfolgend dargelegt werden:

Umfang der Geometrievermessung:

- Es soll die gesamte Geometrie der Zelle vermessen werden. Eine 1-Punkt- oder 2-Punkt-Messung ist ausgeschlossen. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Zellen an unterschiedlichen Stellen Abweichungen aufweisen können und es ist daher wichtig, ein Gesamtbild zu erhalten, vor allem bei Messungen nachdem die Zelle einige Stunden in Betrieb war.
- *Variante: Eine einfachere Geometriemessung durch eine 1-Punkt- oder 2-Punkt-Messung oder im Zuge einer Sichtprüfung inkl. Lehre ist für den Kleinserienprozess ausreichend, da als Musskriterium nur der Durchmesser benötigt wird.*

Anzahl der Messvorgänge:

- Es werden zwei Messungen durchgeführt. Die erste Prüfung findet nach der Anlieferung statt, danach werden die Zellen in einem temperierten Raum eingelagert. Nach Ablauf der definierten Lagerzeit von mindestens einem Tag erfolgt die zweite Messung, um zu kontrollieren, ob sich an der Geometrie etwas verändert hat, z. B. eine Ausdehnung an einer bestimmten Stelle. Somit ist es notwendig, dass die zwei Messdaten miteinander verglichen werden können.
- *Variante: Ein einziger Messvorgang nach Ablauf der definierten Lagerzeit von mindestens einem Tag ist ausreichend, um Veränderungen in der Zelle zu erkennen. Ein Vergleich ist nicht notwendig.*

Messbereich und Auflösung:

- Die festgelegten Toleranzen aus der Konstruktionszeichnung sind verpflichtend einzuhalten. Als Referenzwerte werden die Daten einer Rundzelle eines aktuellen Projektes herangezogen: Länge = 69,7 +/- 0,55 mm, Durchmesser = 18,3 +/- 0,15 mm. Bei prismatischen Zellen liegen die Dimensionen bei ca. 150 x 25 x 100 mm mit ähnlichen Toleranzgrenzen. Daraus folgt, dass für Rundzellen ein Messbereich von 0 bis 200 mm benötigt wird mit einer Auflösung von 0,01 mm.

⁸⁶ Vgl. Leuthner (2013), S. 18 f.

⁸⁷ Vgl. Zausch (n. a.), Online-Quelle [4.November.2018]

Zudem kommt, dass in jedem Fall der Messvorgang nicht mit einem hohen Zeitaufwand verbunden sein darf, um in einem wirtschaftlichen Rahmen 100.000 Zellen pro Jahr prüfen zu können. Eine genaue Definition zum Thema Zeitaufwand wird an dieser Stelle nicht gegeben, da dies in Abhängigkeit von der Messmethode separat überprüft werden muss.

Eine weitere optionale Anforderung an die Geometrievermessung seitens des Unternehmens ist, dass diese universell, also auch für andere Zelltypen wie z. B. prismatische Zellen einsetzbar ist. Ideal wäre auch, wenn gemeinsam mit diesem Prozessschritt auch weitere Prüfvorgänge, wie z. B. die Längen- oder Gewichtsmessung in einem Zug durchgeführt werden könnten, um damit den Kontrollvorgang noch effizienter gestalten zu können. Außerdem wäre es wünschenswert, weitere Messungen außerhalb des Wareneingangsprozesses nach einigen Betriebsstunden durchführen zu können. Dies wird an dieser Stelle nicht in das Prozessdiagramm aufgenommen. Beide optionalen Anforderungen werden bei der Evaluierung der Lösungsmöglichkeiten aber mit einbezogen.

4.2.3 Lagerung

Die Lagerung von Lithium-Ionen-Zellen hat einen erheblichen Einfluss auf deren Lebensdauer und Kapazitätsverlust, wie bereits in Kapitel 2.3.3 im Detail erläutert wurde. Aktuell werden die Zellen bei einer konstanten Raumtemperatur von 25 °C gelagert. Die Lagerzeit ist projektabhängig und dauert unterschiedlich lang. Hinsichtlich der Lagerung sind keine Anforderungen seitens AVL gestellt worden. Es ist allerdings zu erwähnen, dass gemäß Literatur eine kühlere Raumtemperatur empfohlen wird. Die Lagerung ist nicht direkter Bestandteil dieser Arbeit, die Autorin weist aber auf den Umstand hin, dass es hier ebenfalls Optimierungsbedarf geben könnte.

4.2.4 Gewichts- und Längenmessung

Die Gewichtsdaten der Zellen werden benötigt, um das Gesamtgewicht des zusammengebauten Batterieantriebsstranges zu errechnen. Die Zelllänge wird gemessen, um zu prüfen, ob sich die Länge innerhalb der gemäß Konstruktionszeichnung vorgegebenen Toleranzen befindet. Beide Werte sind Muss-Merkmale, die im Zuge der Wareneingangskontrolle einmalig erfasst und geprüft werden müssen – dies ist somit die Anforderung an den Wareneingangsprozess.

4.3 Analyse Teilprozesse

Der aktuelle Prozess weist mehrere Stellen mit Optimierungsbedarf auf. Nachfolgend wird auf die wichtigsten Herausforderungen der Teilprozesse eingegangen.

4.3.1 Prototypenbau versus Kleinserienfertigung

Aufgrund der Tatsache, dass es sich um Batteriezellen im Prototypen-Stadium handelt, muss jede einzelne genauestens überprüft werden. Hinzu kommt der Umstand, dass es sich nicht immer um denselben Zelltyp handelt – jede Art von Batteriezellen kann für AVL-Projekte relevant werden. Außerdem steigt die Anzahl an Kundenaufträgen mit Kleinserienfertigung von bis zu 100 Fahrzeugen und dies entspricht dann einer

Anlieferung von über 62.000 Batteriezellen pro Projekt⁸⁸, die alle einer 100%-Prüfung unterzogen werden müssen. Aus diesen Fakten ergeben sich folgende Probleme:

1. Eine Investition in einen komplett automatisierten Prüfprozess ist mit Risiken verbunden, da immer unterschiedliche Zelltypen angeliefert werden. Außerdem handelt es sich um spezifische Einzelprojekte, die in wenig konstanten bzw. planbaren Zeitabständen umgesetzt werden müssen. Technisch kann die Prüfung automatisiert durchgeführt werden und die jeweiligen Systeme sind einer entsprechenden Wirtschaftlichkeitsprüfung zu unterziehen. Aus heutiger Sicht sprechen allerdings die oben angeführten Unsicherheitsfaktoren eher gegen eine Vollautomatisierung.
2. Aufgrund der Kleinserienfertigung ist aber abzusehen, dass immer mehr Zellen angeliefert werden, und zwar in einer derart hohen Stückzahl, dass der Prototypen-Prozess für Kleinserien nicht mehr angewendet werden kann und eine effiziente Abwicklung nicht mehr durchführbar ist.

Es muss also als Lösung ein Mittelweg für diese komplexe Situation gefunden werden.

4.3.2 Schnittstellen und zeitlicher Aufwand

Es gibt zurzeit keinen automatisierten Prozessschritt – alle Werte werden manuell von den Messgeräten abgelesen und in die Tabelle eingetragen. Das Zusammenführen der Daten passiert ebenfalls manuell. Ein großes Problem besteht auch darin, dass unterschiedliche Datenquellen in der Tabelle mithilfe von mehreren Formeln und Funktionen miteinander verknüpft werden müssen. Alleine das manuelle Zusammentragen der Daten verbraucht enorm viel Zeit. Internen Berechnungen zufolge beläuft sich die Bearbeitungszeit inklusive Dokumentation auf eine Minute pro Zelle. Zusätzlich dazu birgt die manuelle Eingabe von Daten immer eine Fehlerquelle, da durch das Ablesen und wieder Zusammenführen menschliche Fehler passieren können.

Der zeitaufwändigste Schritt ist allerdings das Identifizieren von Schlechtzellen: Es können erstens mehrere Stunden (oder sogar Tage) vergehen, bis die Information aus der Qualitätsabteilung an die zuständigen Mitarbeiter im Zusammenbau übermittelt wird, zweitens dauert die Suche nach den Batteriezellen sehr lange. Der Grund dafür liegt darin, dass die Zellen nun zu je 48 Stück in den jeweiligen Modulformen zusammengefügt sind und man erst nach den Schlechtzellen suchen muss, da man zwar die Modulnummer kennt, nicht aber die genaue Zellposition. Das kommt daher, dass im Polarity Tester Report die Seriennummer nicht enthalten ist, und diese erst über einige Excel-Funktionen zusammengeführt werden muss. Nun weiß der Mitarbeiter dann zumindest die Modulnummer und die Seriennummer, aber er muss alle 48 Zellen scannen, um die Schlechtzellen herauszufinden. Somit kann es vorkommen, dass zuerst mehrere Gutzellen in die Hand genommen werden müssen, bis die auszumusternde Schlechtzelle gefunden wird. Dieser Vorgang dauert sehr lange und muss in jedem Fall optimiert werden.

4.3.3 Messwerte

Die von den Messgeräten (Batterietester, Präzisionswaage und Messuhr) ausgegebenen Werte sind für den Wareneingangsprozess grundsätzlich bereits im geforderten Ausmaß vorhanden. Die Geräte verfügen

⁸⁸ Angabe aus einem aktuellem Projekt: Rundzellen mit 13 Modulen pro Batterie und 48 Zellen je Modul.

über den benötigten Messbereich und die benötigte Auflösung. Lediglich das bereits im vorherigen Punkt erwähnte Problem bzgl. Auslesen der Daten ist in der aktuellen Vorgehensweise suboptimal gelöst und ist eine potentielle Fehlerquelle.

Ein größeres Problem ist allerdings die Durchmessermessung bei Rundzellen. Dazu gibt es zurzeit nur eine einfache „Gut-Schlecht“-Lehre, mit der zwar sehr schnell erkannt werden kann, ob sich die Zelle innerhalb der Durchmessertoleranz befindet, aber die genauen Messwerte können nicht festgestellt werden, da nur eine Ja/Nein-Angabe möglich ist. Außerdem besitzt die Lehre keine Elektronik, um hier Daten über eine Schnittstelle übertragen zu können. Bei den Nicht-Rundzellen kommen andere Messmittel zum Einsatz, meist Messschieber oder Außenmikrometer. Hierbei gilt es, wiederum das Thema der unterschiedlichen Zelltypen zu beachten, denn für die Dimensionsmessung wäre es erstrebenswert, wenn eine universell einsetzbare Lösung für Prisma- und Rundzellen gefunden wird.

Hinzu kommt, dass seitens des Unternehmens nach einer Lösung gesucht wird, die es ermöglicht, etwaige Zellausdehnungen nach mehreren Betriebsstunden prüfen zu können – dies ist mit den derzeit vorhandenen Mitteln nicht möglich.

4.3.4 Erkenntnisse

4.3.4.1 Priorisierung

Das Hauptaugenmerk im aktuellen Prozess liegt in der Findung einer Lösung für die Dimensionsmessung bei Rundzellen, da diese momentan nur rudimentär mithilfe einer Gut-Schlecht-Lehre durchgeführt wird. Damit kann nur geprüft werden, ob sich der Gesamtdurchmesser innerhalb einer definierten Toleranz befindet, auch können keine genauen Messergebnisse damit verwertet werden. Daher ist mit erster Priorität ein geeignetes Messgerät für diesen Prüfschritt zu finden.

An zweiter Stelle steht die Identifikation von Schlechtzellen: Es muss sichergestellt werden, dass bei der zweiten Spannungsmessung der Zellen sofort ersichtlich ist, welche Zellen einen zu hohen Entladungsgrad aufweisen. Derzeit passiert dies suboptimal, da erstens nicht dasselbe Messgerät zum Einsatz kommt, sondern eine AVL-Eigenentwicklung, zweitens erstellt dieses Gerät einen eigenen Datenexport, der nicht mit der vorhandenen Messwerttabelle verknüpft ist. Darüber hinaus werden die Zellen in einer beliebigen Reihenfolge eingelegt, sodass dadurch das Zusammenführen der Daten zusätzlich erschwert wird. Aus diesen Faktoren ergibt sich dann eine zeitliche Verzögerung im Projekt von bis zu einigen Tagen.

4.3.4.2 Automatisierungspotential

Aufgrund der Tatsache, dass je nach Projekt unterschiedliche Zelltypen angeliefert werden können, und dies zu unterschiedlichen Stückzahlen, ist eine Vollautomatisierung im ersten Schritt kein wirtschaftlicher Lösungsansatz. Die einzelnen Prozessschritte hingegen sollten so weit wie möglich automatisiert ablaufen oder zusammengefasst werden. Die derzeit manuelle Datenerfassung soll über die mit den in den Geräten vorhandenen Schnittstellen erfolgen. Dies bringt einerseits einen zeitlichen Vorteil und noch wichtiger: Damit werden Fehler vermieden, die durch die manuelle Übertragung sehr leicht passieren können. Außerdem sind Messvorrichtungen anzufertigen, z. B. für die Spannungsmessung. Zurzeit muss das Personal die Kontakte frei anlegen. Dies bedeutet einen höheren zeitlichen Aufwand und kann u. U. auch zu falschen Messergebnissen führen.

Des Weiteren gibt es das Potential, dass einige Prozessschritte zusammengefasst werden können, sodass z. B. die Längen- und Geometrievermessung in einem Vorgang durchgeführt werden können. Welche Teile des Prozesses sich hier gut kombinieren ließen, wird bei der nachfolgenden Evaluierung der technischen Möglichkeiten erläutert.

Vom Menschen ausgeführten Tätigkeiten sollen auf ihr Minimum reduziert werden, wobei hier das Handling der einzelnen Zellen eine Ausnahme darstellt. Es ist allerdings zu überlegen, ob ein Robotereinsatz sinnvoll wäre – dies muss einer separaten Wirtschaftlichkeitsprüfung unterzogen werden.

Im Hinblick auf die in Kapitel 1.3 vorgestellten Automatisierungsgrade ist also eine Mischvariante des off-line- und des online/open loop-Betriebes anzustreben.

5 AUSGEWÄHLTE GEOMETRIEMESSVERFAHREN

Im aktuellen Prozess gibt es bereits gute Messmittel, die mit entsprechenden Schnittstellen ausgestattet sind und eine mögliche Automatisierung zulassen. Dies gilt nicht für den Schritt der Geometrievermessung und deshalb liegt der Fokus im folgenden Kapitel auf ausgewählte Geometriemessverfahren, die für den Wareneingangskontrollprozess von Batteriezellen mögliche Optionen darstellen. Anhand der in Kapitel 4 durchgeführten Prozessanalyse und der in Kapitel 3 vorgestellten Prozessoptimierungsmethoden werden verschiedene Lösungskonzepte erarbeitet, die in weiterer Folge evaluiert und umgesetzt werden.

5.1 Grundlagen Messtechnik und Qualitätsmanagement

Zuerst ist es wichtig, den Begriff des Messens an sich zu definieren. Laut DIN 1319 ist Messen „*der experimentelle Vorgang, durch den ein spezieller Wert einer physikalischen Größe als Vielfaches einer Einheit oder eines Bezugswertes ermittelt wird.*“⁸⁹ Die zu ermittelnde Größe wird dann Messgröße genannt und der Messwert ist schlussendlich der gemessene Wert einer Messgröße, der als Produkt aus Zahlenwert und Einheit dargestellt wird. Ein Messergebnis können mehrere Messwerte sein, oder aber auch schon ein einzelner Messwert kann als Messergebnis dargestellt werden.⁹⁰ Prüfen hingegen geht über das Messen hinaus, denn hier wird festgestellt, „*ob der Prüfgegenstand eine oder mehrere vereinbarte vorgeschriebene oder erwartete Bedingungen erfüllt.*“⁹¹

Im Grunde geht es beim Prüfen um das Vergleichen eines Istwertes mit einem Soll- bzw. Grenzwert und die Messtechnik bedeutet dann die Anwendung und Technik der Messmittel. Für diese Vergleiche sind Standardeinheiten sinnvoll, die in den SI-Einheiten festgelegt sind.⁹² In der folgenden Abbildung sind die sieben SI-Basiseinheiten, die 1960 bei der Generalkonferenz für Maß und Gewicht definiert wurden, aufgelistet.⁹³ Aus diesen sieben Basiseinheiten lassen sich durch Multiplikation oder Division weitere notwendige SI-Einheiten ableiten. Einige häufig verwendete abgeleitete Einheiten besitzen eigenständige Benennungen, wie z. B. der Druck p , gemessen in der Einheit Pascal oder die (elektrische) Leistung Watt.⁹⁴

	Physikalische Größe	SI-Einheit	SI-Einheitenzeichen
1	Länge	Meter	m
2	Masse	Kilogramm	kg
3	Zeit	Sekunde	s
4	Thermodynamische Temperatur	Kelvin	K
5	Elektrische Stromstärke	Ampere	A
6	Stoffmenge	Mol	mol
7	Lichtstärke	Candela	cd

Abbildung 29: Internationale SI-Basiseinheiten, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 24.

⁸⁹ Lerch (2016), S. 4.

⁹⁰ Vgl. Lerch (2016), S. 4 f.

⁹¹ Hering/Jürgen/Blank (2003), S. 47.

⁹² Vgl. Hering/Jürgen/Blank (2003), S. 47.

⁹³ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 24.

⁹⁴ Vgl. Lerch (2016), S. 18.

Da in Kombination mit diesen Einheiten sowohl sehr kleine als auch sehr große Zahlenwerte auftreten können, wurden als Abkürzung für Zehnerpotenzen griechische Vorsilben festgelegt, um unübersichtliche Darstellungen, wie z. B. viele Nullen nach dem Komma, zu vermeiden (siehe Abbildung 30).

SI-Vorsatz	Vorsatzzeichen	Zehnerpotenz	Name
Piko	p	10^{-12}	Billionstel
Nano	n	10^{-9}	Milliardstel
Mikro	μ	10^{-6}	Millionstel
Milli	m	10^{-3}	Tausendstel
Zenti	c	10^{-2}	Hundertstel
Dezi	d	10^{-1}	Zehntel
Deka	da	10^1	Zehn
Hekto	h	10^2	Hundert
Kilo	k	10^3	Tausend
Mega	M	10^6	Million
Giga	G	10^9	Milliarde

Abbildung 30: Bezeichnung für Zehnerpotenzen, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 24

5.1.1 Toleranz

Ein weiterer wichtiger Faktor in der Messtechnik sind Toleranzen von Bauteilen und Werkstücken. Toleranzen und andere Merkmale sind in der technischen Zeichnung vermerkt. Darin sind alle Maße enthalten, die Einfluss auf die Funktionalität des Objektes haben. Die Toleranzgrenzen sind einerseits abhängig von der geforderten Funktion und andererseits von den wirtschaftlichen Fertigungs- und Prüfungsmöglichkeiten. Da das Nennmaß gemäß Zeichnung nur näherungsweise realisierbar ist, weichen die gefertigten Werkstücke mehr oder minder immer vom Nennmaß ab. Als Abweichung wird der Unterschied zwischen dem Nenn- und dem Ist-Maß beschrieben und die zulässige Abweichung wird Abmaß genannt. Diese Abmaße werden von der Konstruktion so definiert, dass die Funktion mit Sicherheit gewährleistet ist. Mithilfe zweier zulässiger Abweichungen, dem unteren A_u und dem oberen Abmaß A_o , ist die Toleranz festgelegt. Wenn man das Nennmaß nun mit dem unteren Abmaß A_u addiert, so erhält man das Mindestmaß (= untere Toleranzgrenze). Durch Addition des oberen Abmaßes A_o mit dem Nennmaß ergibt sich das Höchstmaß (= obere Toleranzgrenze).⁹⁵

5.1.2 Freiheitsgrad

Der Freiheitsgrad eines Körpers ist ebenfalls ein wichtiger Grundbegriff in der Messtechnik. Freiheitsgrade bezeichnen die Bewegungsmöglichkeiten eines starren Körpers im Raum. Dieser starre Körper hat grundsätzlich sechs Freiheitsgrade: Es können drei translatorische Bewegungen in x, y, z und drei rotatorische Bewegungen um die translatorischen Achsen ausgeführt werden. Ein Quader muss daher im Raum mit sechs Auflagepunkten fixiert werden. Sollten weniger verwendet werden, so ist der Quader statisch unbestimmt gelagert und er kann sich noch eingeschränkt bewegen. Umgekehrt können verformende Kräfte auftreten, wenn der Quader mit mehr als sechs Punkten gelagert wird – dann ist er statisch überbestimmt. Für die Praxis würde dies unter Umständen zu falschen Messergebnissen führen.⁹⁶

⁹⁵ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 23 f.

⁹⁶ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 25.

Ein bekanntes Beispiel für statische Überbestimmtheit findet sich in der Berechnung der Lagerreaktionen von Tragwerken. In der Ebene sind für ein statisch bestimmtes System drei Lagerwertigkeiten notwendig – bei mehr als drei Lagerwertigkeiten können Spannungen, z. B. durch Wärmeausdehnungen, auftreten und zusätzlich auch noch weitere innere Spannungen, die Verformungen auslösen können.⁹⁷

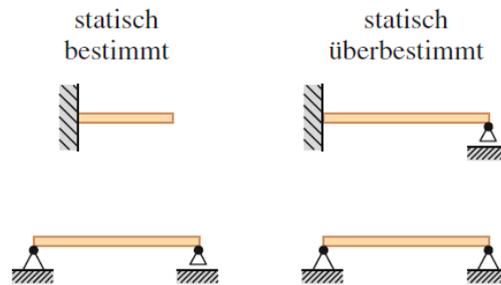


Abbildung 31: Beispiele für statisch bestimmt und statisch überbestimmte Träger, Quelle: S. 31 (leicht modifiziert).

Das Beispiel zeigt die Auswirkungen statischer Überbestimmtheit in der Ebene. An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass im dreidimensionalen Raum sechs Freiheitsgrade für eine statisch bestimmte Lagerung notwendig sind.⁹⁸ Die Abbildung 32 zeigt noch weitere wichtige Geometrien, die für die Messtechnik von Relevanz sind. So hat ein Zylinder fünf Freiheitsgrade und eine Kugel nur drei⁹⁹. Die Anzahl der Freiheitsgrade hat daher Einfluss auf die konstruktive Gestaltung von Bauteilen und auch auf die Auswahl von Messgeräten. Während der Messung sollen die Werkstücke so gut fixiert sein, dass es zu keiner Bewegung kommt, aber die Fixierung darf zu keiner Deformation führen.¹⁰⁰

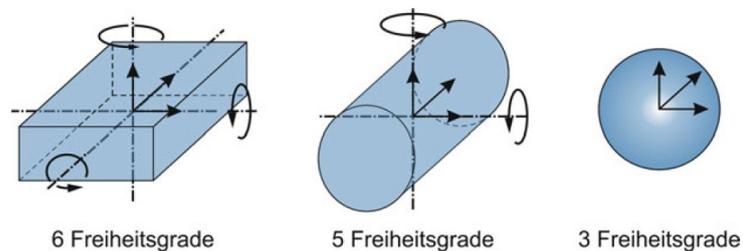


Abbildung 32: Freiheitsgrade von Körpern, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 25.

5.1.3 Abbesche Grundsatz

Des Weiteren hängt die Messgenauigkeit auch von der Lage der zu messenden Strecke am Prüfgegenstand zu Länge des Vergleichsnormales ab. Dies ist im Abbeschen Grundsatz beschrieben und der Grundsatz besagt, dass die zu messende Strecke des Prüfgegenstandes und die Vergleichsstrecke der Maßverkörperung fluchtend hintereinander angeordnet werden muss.¹⁰¹ Wenn dieser Grundsatz nicht eingehalten

⁹⁷ Vgl. Heinzelmann (2014) S. 31.

⁹⁸ Vgl. CADFEM GmbH (2016), Online-Quelle [21.Januar.2019].

⁹⁹ Bewegung nur rotatorisch.

¹⁰⁰ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 25.

¹⁰¹ Vgl. Hering/Jürgen/Blank (2003), S. 49.

wird, kommt es zu Führungsabweichungen, die einen Kippfehler verursachen. Kippfehler werden größer, je größer der Abstand des Messobjektes zum Messgerät („e“ in Abbildung 33) ist und damit wird auch der Kippwinkel („ Φ “ in Abbildung 33) immer größer und es kommt zu einer Messabweichung („L“ in Abbildung 33).¹⁰²

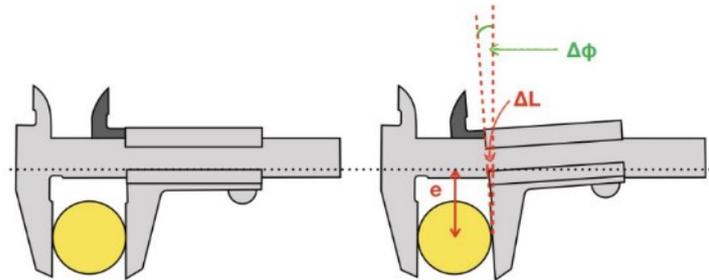


Abbildung 33: Messabweichung gemäß Abbeschem Grundprinzip, Bsp. Messschieber (links: keine Abweichung, rechts: Abweichung durch Schiefstellung), Quelle: Möllring (2018), Online-Quelle [11.November.2018].

Ferner kann es beim Arbeiten mit Messschiebern – bei falscher Handhabung oder defekten Geräten – zu einem seitlichen Verkanten kommen, wodurch sich ebenfalls Messfehler ergeben können.

5.1.4 Messunsicherheit

Laut DIN 1319 (Teil 3) wird die Messunsicherheit „definiert als eine Kenngröße, die angibt, in welchem Bereich um den angegebenen Wert der wahre Wert der Meßgröße mit einer statistischen Sicherheit von 95% liegt.“¹⁰³

Die folgenden zwei Komponenten sind Bestandteile der Messunsicherheit: Zufällige Abweichungen und unbekannte systematische Abweichungen. Aus der Verteilung einer großen Einzelstichprobe von mind. $n = 50$ Messungen lässt sich die zufällige Messunsicherheit berechnen. Die systematische Messunsicherheit hingegen muss abgeschätzt werden oder auf Basis der Messmittelherstellerkennwerte definiert werden. Sollten diese Informationen fehlen, so ist die systematische Messunsicherheit auf gleicher Höhe mit der zufälligen Messunsicherheit anzusetzen.¹⁰⁴

Messunsicherheiten haben eine große wirtschaftliche Bedeutung, denn kleine Messunsicherheiten führen oft zu hohen Prüfkosten. Um die Unsicherheiten zu reduzieren, können systematische Anteile der Messunsicherheit als sogenannte Korrektur ausgewiesen und auch rechnerisch kompensiert werden. Außerdem helfen auch Mehrfachmessungen, die Unsicherheiten zu verringern. Ferner ist die Kenntnis wichtig, dass Messunsicherheit immer von der Messaufgabe abhängig ist. Sie beschreibt die Unsicherheit beim Messen eines bestimmten Kriteriums unter definierten Bedingungen. Zu diesen Bedingungen zählen u. a. das Messgerät selbst, die verwendete Maßverkörperung, die Umgebungsbedingungen und der Bediener. Für die Vergleichbarkeit von Messergebnissen ist es daher unabdingbar, über Messunsicherheiten Kenntnis zu haben. Ohne darüber Bescheid zu wissen, können keine fundierten Entscheidungen getroffen werden.

¹⁰² Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 46.

¹⁰³ Hering/Jürgen/Blank (2003), S. 51.

¹⁰⁴ Vgl. Hering/Jürgen/Blank (2003), S. 51.

Ein erster Anhaltspunkt ist die „goldene Regel der Messtechnik“, nach der das Verhältnis von Messunsicherheit zu Toleranz 10 % nicht überschreiten sollte. Um Spezifikationen beurteilen zu können, wurde eine international anerkannte Norm erstellt (GPS¹⁰⁵), in der festgelegt ist, welche Merkmale für die Übereinstimmung bzw. Nicht-Übereinstimmung eines Kriteriums mit den Spezifikationsgrenzen anzuwenden sind (siehe Abbildung 34).¹⁰⁶

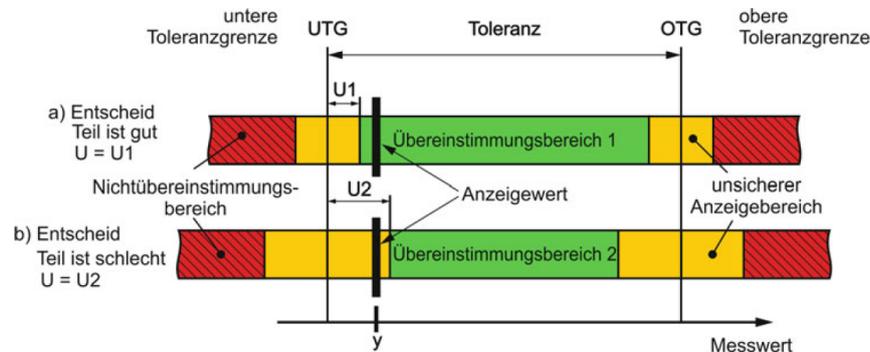


Abbildung 34: Zusammenhang von Spezifikationsgrenze und Messunsicherheit, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 33.

5.2 Koordinatenmesstechnik

Bei der Koordinatenmesstechnik handelt es sich um ein universelles Messverfahren, bei dem mithilfe eines Koordinatensystems die Werkstückoberfläche punktwise abgetastet wird. Die daraus erfassten Oberflächenpunkte werden über mehrere Zwischenschritte zusammengefasst, um die zu ermittelten Merkmale bestimmen zu können.¹⁰⁷ Durch das Zusammenspiel mit verschiedenen Hilfseinrichtungen (z. B. Drehtisch, Tasterwechseinrichtungen, etc.) ergibt sich eine hohe Flexibilität und damit eine Vielzahl an Anwendungsbereichen für die Koordinatenmesstechnik (KMT). Allerdings ist es aufgrund dieser Flexibilität notwendig, umfangreiche Vorgaben in der Prüfplanung für den Ablauf und die Auswertungen durchzuführen. Dafür bedarf es an hohen Kenntnissen und Erfahrungswerten bei den Mitarbeitern.¹⁰⁸

Es ist auf folgende Besonderheiten bei der Messung mit Koordinatenmesssystemen hinzuweisen:

- Zweipunktmessungen, die früher mit z. B. einer Bügelmessschraube durchgeführt wurden, können auch mithilfe der KMT umgesetzt werden. Allerdings ist eine dementsprechende Antaststrategie und eine besondere Auswertung erforderlich, denn ein gefertigtes Objekt hat eine ins Unendliche laufende Anzahl von verschiedenen Zweipunktmaßen, die alle innerhalb der Toleranz liegen müssen.
- Die Werkstückoberfläche ist lückenlos zusammenhängend und bei der Messung mit einem Koordinatenmessgerät (KMG) wird immer nur eine Stichprobe von Oberflächenpunkten des Werkstücks erfasst. Das Messergebnis ist dann ein geometrisch ideales Ersatzelement, das aber nicht auf vollständigen Werkstückoberflächen basiert, sondern eben nur auf eine Stichprobe von Messpunkten. Je mehr

¹⁰⁵ Geometrische Produktspezifikation (DIN EN ISO 14253-1, 2013-12).

¹⁰⁶ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 32 f.

¹⁰⁷ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 54.

¹⁰⁸ Vgl. Weckenmann/Gawande (2012), S. 15.

Messpunkte erfasst werden, umso genauer beschreibt das Messergebnis die tatsächliche Gestalt des Werkstücks.

- Die Messpunktauswertung muss gemäß dem aus der Funktion des Elementes abgeleiteten Ziel der Messung erfolgen. Aus diesem Grund ist es für die Zuordnung eines geometrisch idealen Ersatzelements ein mathematisches Kriterium (z. B. Tschebyscheff-, Pferchbedingung etc.) zu definieren, von dem dann das Auswertergebnis abhängig ist.¹⁰⁹

In der Regel bestehen KMG aus drei Linearachsen, die orthogonal zueinander angeordnet sind. Zusammen spannen diese drei Achsen ein 3D-Koordinatensystem auf und jede Achse ist mit einem Positions-Messsystem ausgestattet. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Komponenten und den prinzipiellen Aufbau eines KMG.¹¹⁰

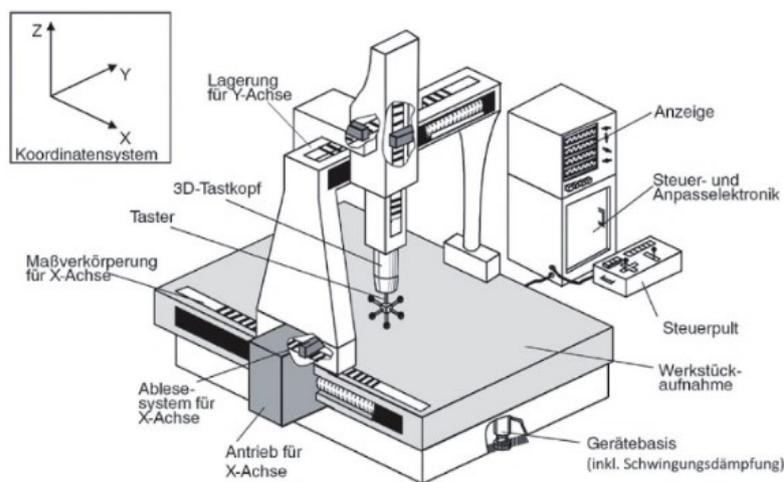


Abbildung 35: Prinzipieller Aufbau eines konventionellen kartesischen Koordinatenmessgerätes in der Bauweise mit beweglichem Portal, Quelle: Weckenmann/Gawande (2012) S. 14.

Je nach Messaufgabe gibt es unterschiedliche Bauweisen von KMG. Die erreichbaren Messabweichungen sind häufig das entscheidende Kriterium für oder gegen eine bestimmte Bauweise. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Vergleich der Bauarten in Bezug auf die Messabweichungen.¹¹¹

¹⁰⁹ Vgl. Weckenmann/Gawande (2012), S. 15 f.

¹¹⁰ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 59.

¹¹¹ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 72.

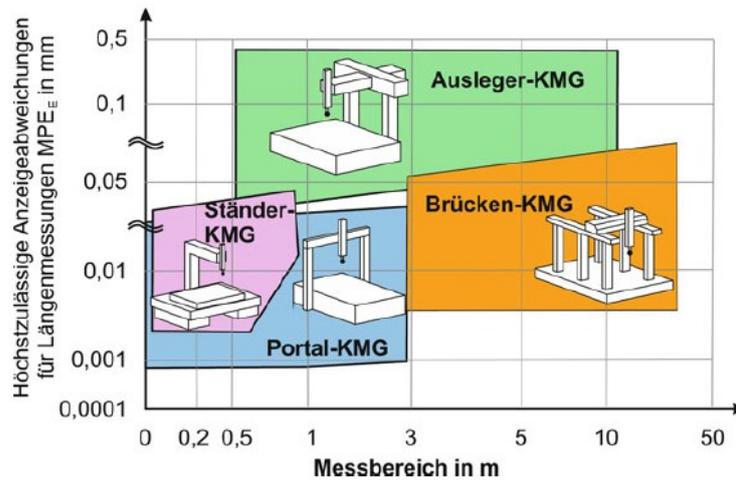


Abbildung 36: Vergleich verschiedener Bauarten von KMG hinsichtlich der Messabweichungen, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 72.

5.2.1 Taktile Koordinatenmesstechnik

Bei der taktilen KMT kommen Messkopfsysteme mit berührend arbeitenden Tastelementen zum Einsatz. Das Messkopfsystem ist an der sogenannten Pinole befestigt und besteht aus mehreren Komponenten, die in der nachfolgenden Abbildung dargestellt sind:¹¹²

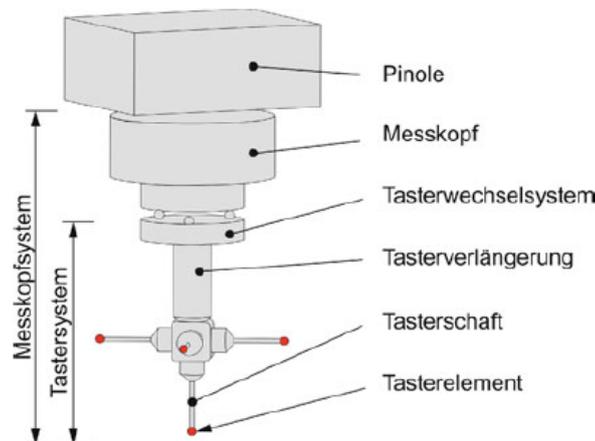


Abbildung 37: Aufbau eines berührenden Messkopfsystems, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 74.

Der Messkopf selbst ist das System, in dem beim Messen die Signale erzeugt werden. Die Parameter eines Messkopfsystems (z. B. Tasterradius, Tasterbiegung, etc.) müssen für das KMG und dessen Software bekannt sein. Beim Einmessen des Tastersystems, das an einem Normal wie z. B. an einer Referenzkugel geschieht, werden diese Parameter bestimmt. Durch den Taster wird das Werkstück angetastet. Bei der Messwertaufnahme wird der Mittelpunkt des Tasters angezeigt und aus diesem Messpunkt plus den vorher genannten Parametern wird der Ist-Berührungspunkt ermittelt.¹¹³

¹¹² Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 74.

¹¹³ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 74.

Für taktile KMG stehen unterschiedliche Arten von Messkopfsystemen zur Verfügung, die nach Art der Messpunktaufnahme unterschieden werden. Es gibt schaltende und messende Messkopfsysteme. Schaltende Messkopfsysteme sind in der Lage, pro Berührung einen Messpunkt zu erfassen. Sobald das Tastelement um einen bestimmten Betrag aus der Ruhelage gelenkt wird, erzeugt der Messkopf ein Auslösesignal. Dadurch zeigt die Steuerung die Positionen der Messachsen an. Schaltende Messkopfsysteme besitzen eine vorgespannte Dreipunktauflage, durch die der Taster in den sechs Freiheitsgraden im Raum nachgiebig fixiert wird. Da die Auflagen als elektrische Kontakte ausgeführt sind, wird bei Berührung mit dem Werkstück ein Kontakt geöffnet, woraufhin das Auslesen der Messachsen ausgelöst wird. Diese Art des Messkopfsystems arbeitet dynamisch und dies hat zur Folge, dass mindestens eine Achse beim Messpunkte-Erfassen in Bewegung ist.¹¹⁴

Messende Messkopfsysteme bestehen aus drei kartesisch angeordneten Längenmesssystemen. Diese sind auf Federparallelogrammen gelagert und bewegen sich parallel zu den Achsen des KMG. Durch induktive Maßverkörperungen werden permanent die Auslenkungen der drei zusätzlichen Achsen gemessen. Die Koordinaten der Hauptachsen werden mit diesen Werten verrechnet, daher verfügen diese Systeme nicht nur über einen Schaltpunkt, sondern es können auch räumliche Zwischenpositionen erfasst werden. Dies ist beispielsweise beim Scanning notwendig. Die Messpunkte können auf zwei Arten erfasst werden: Entweder per Einzelpunktantastung oder mittels Scanningverfahren. Einzelpunktantastung bedeutet, dass das KMG auf die Werkstückoberfläche zufährt, diese berührt, zum Stillstand kommt und dann die Berührung wieder löst. Nach Erkennung des Kontaktes werden im Zuge der Vor- und Rückwärtsbewegung am Werkstück die Achsen des KMG und die Maßverkörperung im Tastersystem synchron und kontinuierlich ausgelesen und verrechnet. Die Messpunktaufnahme erfolgt fortlaufend während der Bewegung. Beim Scanning-Verfahren hingegen ist es möglich, mehrere Messpunkte pro Zeiteinheit aufzunehmen. Es kann angewendet werden bei Ebenen, Kreisen, Spiralen oder auch für Freiformflächen.¹¹⁵

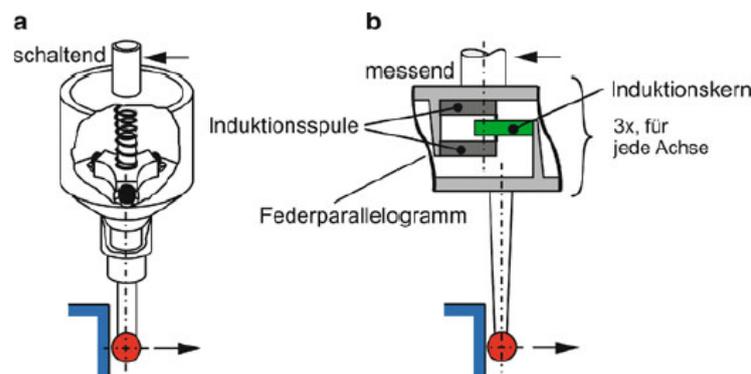


Abbildung 38: Schaltende (a) und messende (b) Messkopfsysteme, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 76.

¹¹⁴ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 75.

¹¹⁵ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 76.

5.2.2 Optische Koordinatenmesstechnik

Im Gegensatz zu taktilen KMG arbeiten optische KMG berührungslos. Da das Werkstück ohne Kontakt mit dem Taster vermessen werden kann, erfolgen keine mechanischen Beeinflussungen bzw. Belastungen auf das Messobjekt. Die nachfolgende Tabelle zeigt, dass es je nach Anwendungsfall unterschiedliche Messprinzipien gibt, bei denen wiederum je nach zu messender Geometrie verschiedene Techniken zum Einsatz kommen.¹¹⁶

Messprinzip Messverfahren	Laufzeitverfahren	Interferometrie	Triangulation
1D	Laserlaufzeitverfahren	Distanzinterferometrie	Laserfokusverfahren Autofokusverfahren Punktriangulation Schattenprojektion
2D		Weißlichtinterferometrie	Laserlichtschnittverfahren
2 1/2D		3D- Formprüfinterferometrie	Streifenprojektion Photogrammetrie
3D		Optische Kohärenztomografie	Computertomografie

Tabelle 2: Übersicht optische Messverfahren, Quelle: Gallasch (n. a.), Online-Quelle [13.November.2018].

In der Industrie werden sehr häufig optische KMG mit Triangulationsverfahren eingesetzt, die in aktive und passive Methoden unterteilt werden können.¹¹⁷ Bei der aktiven Triangulation wird ein definiertes Muster auf die diffus reflektierende Werkstückoberfläche projiziert. Die Projektionsausrichtung und die Kamerablickrichtung schließen dabei einen Winkel ein. Das Oberflächenprofil des Objekts erzeugt eine Musterverzerrung im Bild der Kamera, in der die Information über die Oberflächengeometrie enthalten ist. Bei der passiven Triangulation werden die Bilder von zwei (oder mehr) Kameras mit unterschiedlichen Blickrichtungen kombiniert. Unter Berücksichtigung der Abbildungsgeometrie kann die dreidimensionale Geometrie des Werkstücks berechnet werden.¹¹⁸

¹¹⁶ Vgl. Gallasch (n. a.), Online-Quelle [13.November.2018].

¹¹⁷ Vgl. Gallasch (n. a.), Online-Quelle [13.November.2018].

¹¹⁸ Vgl. Weckenmann/Gawande (2012), S. 216.

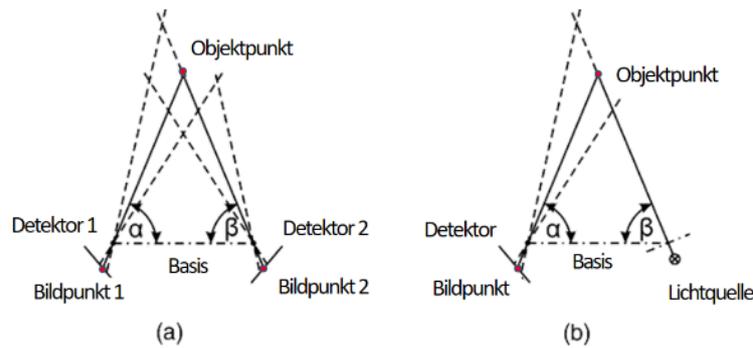


Abbildung 39: Prinzip der passiven (a) und der aktiven (b) Triangulation, Quelle: Weckenmann/Gawande (2012) S. 216 (leicht modifiziert).

Grundsätzlich ist bei der optischen KMT – im Vergleich zur taktilen KMT – der Tastsensor durch z. B. eine Kamera inkl. Bildverarbeitungssystem ersetzt. Ein wesentlicher Unterschied zu taktilen KMG besteht darin, dass die Maßverkörperung des Bildverarbeitungssystems auf der Pixelstruktur der Kamera basiert. Deshalb muss nicht eine genau definierte Koordinate angefahren werden, sondern lediglich die nähere Umgebung. Das gesuchte Kriterium darf sich somit bei jeder Messung an einer anderen Position im Bild befinden.¹¹⁹

5.2.3 Multisensor-Koordinatenmesstechnik

Multisensor-KMG verbinden die Vorteile der taktilen und der optischen KMT, die für die Messung von immer komplexer werdenden Bauteilen wichtig sind. In manchen Fällen ist z. B. eine Werkstückzone mit ein und demselben tastenden Messkopfsystem gar nicht zugänglich. Bei optischen Verfahren muss das Werkstück in unterschiedlichen Ansichten erfasst werden, um das notwendige umfassende Modell erstellen zu können. Diese Beispiele zeigen, dass sich derartige Mess- und Prüfaufgaben oft nur durch den Einsatz mehrerer gleicher oder auch verschiedener Sensoren realisieren lassen. Die unterschiedlichen Gegebenheiten der einzelnen Sensoren müssen berücksichtigt werden, um aus der Überlagerung der Informationen ein das ganze Werkstück umfassendes Bild generieren zu können. Der realisierte physikalische Effekt eines jeden Sensors erfasst ein anderes Oberflächenmerkmal und somit letztlich eine andere Oberfläche.¹²⁰

Taktile Messsensoren richten sich nach der mechanisch-funktionalen Oberfläche, und oft prägen die Spitzen des oberflächenbildenden Rauheitsgebirges das Messergebnis. Bei optischen Messverfahren geht die Orientierung in Richtung der optischen Oberfläche. Andere Sensoren, wie z. B. magnetische oder elektrische Sensoren, übernehmen Oberflächeninformationen, die von magnetischen oder elektrischen Effekten stammen (Tunneleffekt). Zusätzlich zu diesen Aspekten ist noch zu beachten, dass beim Scanning-Verfahren erfasste Messpunkte andere Einzelpunkt-Unsicherheiten aufweisen als jene Messpunkte, die durch Einzelantastungen ermittelt wurden. Die unterschiedlichen Sensoreigenschaften können bei Messungen an ein und demselben Werkstück unterschiedliche Messergebnisse zeigen. Da nun mit einem Multisensor-

¹¹⁹ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 84.

¹²⁰ Vgl. Weckenmann/Gawande (2012), S. 17.

KMG, das mit mehreren (unterschiedlichen) Sensoren bestückt ist, die verschiedensten Messanforderungen an die jeweilige Oberflächenzone erfasst werden können, ist es wichtig, dass die Messergebnisse der einzelnen Sensoren je nach Messaufgabe wieder fusioniert werden. Das ist wichtig, um ein in sich konsistentes Modell des realen Werkstückes erstellen zu können.¹²¹

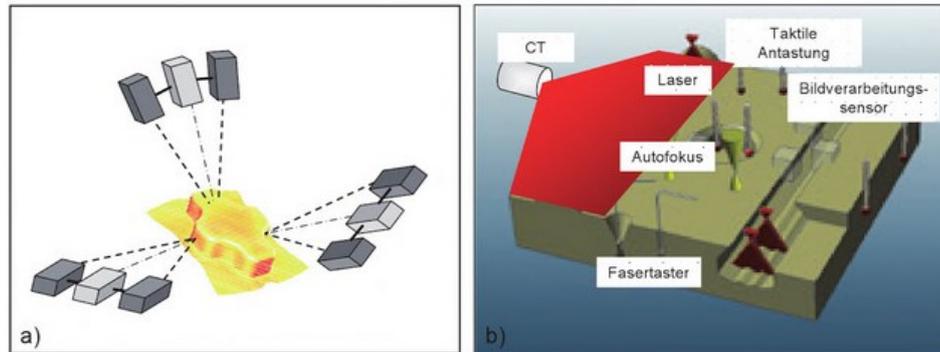


Abbildung 40: Multisensor-Messung mit a) gleichen und b) unterschiedlichen Sensoren, Quelle: Weckenmann/Gawande (2012) S. 18.

Es ist zudem wichtig, dass das Multisensor-KMG bei Messungen die Anordnung der unterschiedlichen Messkopfsysteme kennt. Um dies zu erreichen, ist das sogenannte Einmessen des Sensorversatzes notwendig. Dazu wird ein Normal, z. B. eine Einmesskugel, verwendet, das während des Einmessens ortsfest bleibt und das von allen Messkopfsystemen gemessen werden kann.¹²²

5.3 Form- und Lagemesstechnik

Maß- und Oberflächentoleranzen sind nicht ausreichend für die vollständige Funktionsbeschreibung von Bauteilen. Daher sind Form- und Lagetoleranzen wichtige Kriterien und beeinflussen die Gewährleistung von Bauteilen maßgeblich. Es ist wichtig, dass alle die Funktion betreffenden Eigenschaften eines Werkstücks so definiert sind, dass die Interpretation der Spezifikation eindeutig ist.¹²³

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Einteilung von Gestaltabweichungen. Zu den sogenannten Abweichungen erster Ordnung gehören die Grobgestaltabweichungen, zu denen Maß-, Lage-, und Formtoleranzen zählen. Welligkeit und Rauheit sind als Feingestaltabweichungen definiert, die zu Abweichungen zweiter oder höherer Ordnung zählen. Defekte, wie z. B. Kratzer sind nicht als Gestaltabweichung definiert, da sie nicht kennzeichnend für ein Herstellverfahren sind und sie außerdem örtlich und zeitlich nur sporadisch auftreten. Die Prüfung von Defekten wird in dieser Arbeit nicht behandelt.¹²⁴

¹²¹ Vgl. Weckenmann/Gawande (2012), S. 18 f.

¹²² Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 88.

¹²³ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 94.

¹²⁴ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 94 f.



Abbildung 41: Ordnungssystem für Gestaltabweichung an Werkstücken, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 95 (leicht modifiziert).

Form- und Lagetoleranzen haben wichtige Aufgaben. Sie gewährleisten die Funktion des Bauteils, dessen Herstellbarkeit, dass es (de-)montierbar ist und auch, dass die Bauteiltoleranzen überhaupt messbar sind. Zu enge Toleranzen können in der Produktion und Messtechnik erhebliche Kosten verursachen, und daher ist die Festlegung von Toleranzen ein komplexer Prozess, der viel Erfahrung und Wissen benötigt. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Übersicht über Form- und Lagetoleranzarten. Formtoleranzen haben keinen Bezug und sie sind im Raum frei verschiebbar. Bei den Lagetoleranzen geht es um die Kennzeichnung der Beziehung von mindestens zwei Geometrieelementen zueinander. Bis auf wenige Ausnahmen lassen sich Geometrieelemente auf Formelemente wie Gerade, Kreis, Ebene, Zylinder etc. zurückführen.¹²⁵

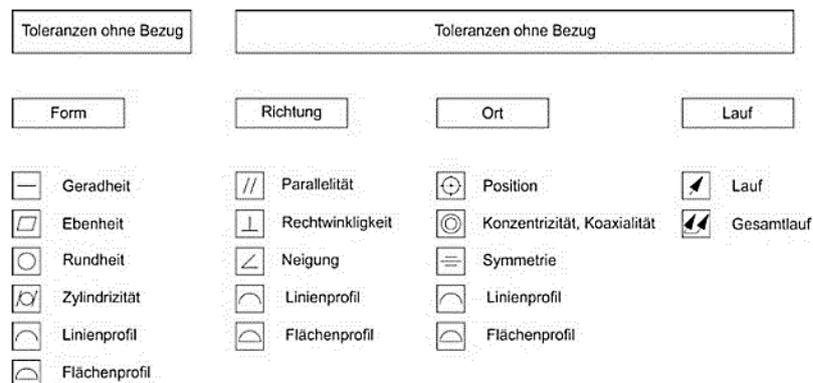


Abbildung 42: Übersicht über Form- und Lagetoleranzen, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 97.

Eine wichtige Definition in der Messstrategie bezieht sich auf das Auswertekriterium für die Bildung von Geometrieelementen und den daraus gebildeten Bezügen. Dafür kann zwischen verschiedenen Verfahren gewählt werden: Zweipunktmaß, Methode der kleinsten Quadrate, kleinstes umschriebenes Element, größtes einbeschriebenes Element oder die minimale Zone. Der Fokus bei der Auswahl des Auswertekriteriums

¹²⁵ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 96 f.

liegt auf der gewünschten Bauteilfunktion. Es gilt also zu überlegen, ob mit dem gewählten Kriterium die gewünschte Funktionsanforderung erfüllt werden kann.¹²⁶

Als Beispiel sei an dieser Stelle die Bestimmung von Merkmalen an den Geometrieelementen Kreis bzw. Zylinder dargestellt. Die Abbildung 43 zeigt, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, Bezugsachsen und den Durchmesser messtechnisch bestimmen zu können. Hier geht es also nicht darum, Formabweichungen zu definieren, sondern den Kreismittelpunkt bzw. den Durchmesser an einem Kreis mit vorhandener Formabweichung zu ermitteln – gilt auch analog für den Zylinder. Folgende vier Verfahren stehen zur Verfügung:

- LSCI (least square circle): Dabei handelt es sich um den Ausgleichskreis nach Gauß. Es wird der Kreis der kleinsten Abweichungsrate ermittelt. Diese Methode ist unempfindlich gegenüber Ausreißern durch Schwingungen oder Schmutz. Allerdings stellt es die Paarungsfähigkeit nicht sicher.
- MCCI (minimum circumscribed circle): Hier wird der kleinste umschreibende Kreis bestimmt. Dieser Hüllkreis stellt die Paarungsfähigkeit einer Bohrung mit einer Welle sicher.
- MICI (maximum inscribed circle): Bei dieser Methode wird der größte eingeschriebene Kreis bestimmt, der sogenannte Pferchkreis. Wie beim MCCI-Verfahren ist auch hier die Paarungsfähigkeit sichergestellt und außerdem entspricht der Pferchkreis dem größtmöglichen Prüfdorn, der in die Bohrung passt.
- MZCI (minimum zone circle): Dies ist das Verfahren nach Tschebyscheff und es ermittelt die kleinsten Formabweichungen. Es ist empfindlich gegenüber Ausreißern und kann auch die Paarungsfähigkeit nicht gewährleisten.¹²⁷

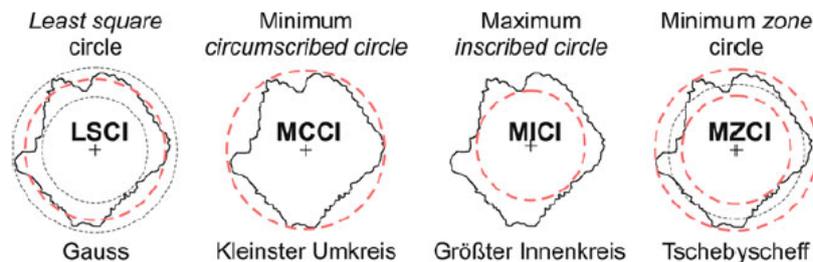


Abbildung 43: Verfahren zur Bestimmung von Mittelpunkt und Durchmesser von Kreisen, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 99.

Da für den vorliegenden Prozess die Rundheitsmessung für die runden Lithium-Ionen-Zellen, die mit ca. 100.000 Stück pro Jahr den größten Anteil an den zu prüfenden Zelltypen ausmachen, von großer Bedeutung ist, werden wesentliche Gerätetechniken zur Kreis- und Zylinderformmessung näher beschrieben.

Die Rundheitsmessung kann z. B. mit einer 1-Punkt-Messung durchgeführt werden. Dazu wird ein Werkstück in den Zentrierbohrungen zwischen zwei Spitzen aufgenommen, beispielsweise in der bearbeitenden Werkzeugmaschine oder in einer Messvorrichtung. Eine Kreisformabweichung lässt sich dann nur messen, wenn der Mittelpunkt des angetasteten Kreises mit der durch die Aufnahme festgelegten Achse

¹²⁶ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 98.

¹²⁷ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 99 f.

übereinstimmt. Da diese Annahme jedoch nicht zu 100 % vorausgesetzt werden kann, müssen die Abweichungen durch die Exzentrizität via Rechenverfahren ermittelt und kompensiert werden. Mit Durchführung einer Fourieranalyse ist die Berechnung der Abgrenzung zwischen Rundheits- und Rundlaufmessung möglich. Bei diesem Verfahren ist zusätzlich zu beachten, dass Formabweichungen der Zentrierbohrungen das Messergebnis beeinflussen können.¹²⁸

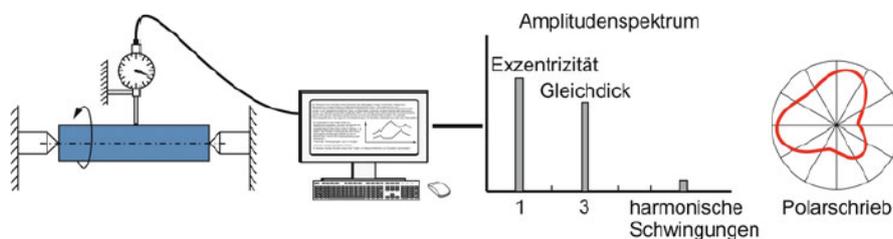


Abbildung 44: Rundheitsmessung, 1-Punkt-Messung zwischen Spitzen, Fourieranalyse, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 105.

Mit KMG lassen sich Rundheits- und Zylinderformmessungen ebenfalls durchführen. Dabei ist ein mechanisches Ausrichten des Bauteils auf eine Drehachse, wie vorhin dargestellt, nicht erforderlich. Um Formabweichungen ermitteln zu können, sind hohe Punktedichten nötig. So kann es vorkommen, dass eine minimale Messpunktanzahl von knapp über 1.000 zustande kommt. Dies bedeutet, dass derartige Messungen mit KMG aus wirtschaftlicher Sicht nur Sinn machen, wenn eine schnelle Messpunkterfassung realisiert werden kann, wie z. B. mit scannenden Messkopfsystemen, die bereits in Kapitel 5.2.1 erläutert wurden. Eine weitere Möglichkeit zur Rundheitsmessung bieten diverse Formmessgeräte oder Formtester. Diese Messmethode ist sehr aufwändig, aber es lassen sich sehr genaue Messungen erzielen. Grundsätzlich wird dabei zwischen zwei Bauformen von Formprüfgeräten unterschieden. Bei kleineren und leichten Werkstücken kommen Bauformen zur Anwendung, bei denen sich das Werkstück während der Messung um die eigene Achse dreht. Im Gegensatz dazu sind für große, schwere oder nicht rotationssymmetrische Bauteile Bauformen mit umlaufendem Taster zu empfehlen. Formmessgeräte besitzen zudem einen Kipp- und Zentriertisch für die Werkstückausrichtung auf die Rotationsachse. Der Justierprozess ist zeitintensiv, aber für Präzisionsmessungen notwendig. Dabei gibt es Geräte, bei denen dieser Ausrichtungsvorgang manuell, manuell mit Anzeigeeinrichtung oder auch komplett automatisiert erfolgt.¹²⁹

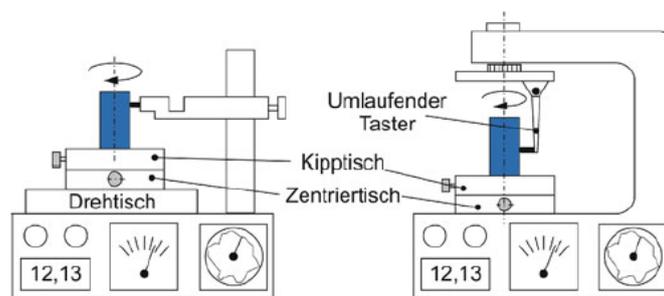


Abbildung 45: Rundheitsmessgeräte, Bauformen, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 107.

¹²⁸ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 105 f.

¹²⁹ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 106 f.

5.4 Berührungslose Messverfahren

Seit den 1980er Jahren gewinnen optische Messverfahren immer mehr und mehr an Bedeutung. Im Wesentlichen werden mit dem berührungslosen Messen drei Ziele verfolgt:

1. **Mobilität:** Mobile optische Messgeräte erlauben Messungen an sehr großen Bauteilen, wie z. B. im Flugzeug- oder Schiffsbau. Das Messgerät wird dann einfach in die Nähe des Werkstücks gebracht oder darum herum aufgebaut.
2. **Schnelligkeit:** Meist sind optische Messverfahren sehr schnell und daher sind dynamische Messungen möglich. Dies bedeutet, dass z. B. Bewegungen des Bauteils während der Montage beobachtet oder Verformungen des Werkstücks (z. B. Schwingungen eines Tragflügels) gemessen werden können.
3. **Anzahl Antastpunkte:** Mit berührungsloser Messtechnik ist es möglich, mit einem akzeptablen Zeitaufwand, sehr viele und dicht nebeneinanderliegende Antastpunkte an Freiformflächen zu erfassen. Dies hat einerseits eine große Bedeutung in der Qualitätssicherung, sowie im Bereich Reverse Engineering.¹³⁰

Vor allem die immer komplexer werdenden Geometrien machen die optischen Messverfahren unentbehrlich, denn viele der Gestaltungselemente lassen sich nicht mehr auf einfache Geometrielemente zurückführen. Daher stehen beim Messen dieser Werkstücke die Antastpunkte und deren Anzahl eher im Mittelpunkt als die berechneten Geometrielemente. Da eine entsprechend hohe Dichte an Antastpunkten notwendig ist, gilt es hohe Anforderungen in der Messtechnik zu erfüllen: Eine hohe Geschwindigkeit der Messpunkterfassung und eine hohe Rechenleistung und Speicherkapazität zur Datenverarbeitung werden ebenso benötigt wie ein Berechnungsverfahren von Antastpunkten aus den Messpunkten und ein Verfahren zur Verarbeitung und Darstellung der Antastpunkte (Punktwolken).¹³¹

Außerdem können mit optischen Messverfahren Oberflächenstrukturen nur begrenzt erfasst werden. Wenn man z. B. bei einer textilähnlichen Oberfläche die Struktur der Oberfläche im Detail aufnehmen möchte, so schrumpft die aufgenommen Fläche pro Messung stark. Bei nichtglatten Oberflächen wird eine künstliche Mittelung bzw. rechnerische Glättung durchgeführt. Dies erhöht wiederum die Streuung der Messwerte um die reale Kontur, und die Genauigkeit wird somit negativ beeinflusst. Die Genauigkeit der Erfassung von Objekten im Raum hängt stark von der Kalibrierung ab: Je größer die Distanz der Messpunkte zum Sensor ist, umso ungenauer wird die Berechnung und Erfassung. Daraus folgt, dass die Akzeptanz optischer Messverfahren von der Präzision der Kalibrieralgorithmen und deren mathematischen Nachvollziehbarkeit abhängt.¹³²

Optische Sensoren gewinnen im Zuge des Themas Industrie 4.0 immer mehr an Bedeutung. Fertigungsprozesse lassen sich damit direkt in der Linie steuern und überprüfen, sie werden als Abstands- oder Positionssensoren für Montage- und Positionieraufgaben eingesetzt oder in Multisensor-KMG für spezielle

¹³⁰ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 210 ff.

¹³¹ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 213.

¹³² Vgl. Schuth/Buerakov (2017), S. 5.

Messaufgaben. Ein wichtiger Aspekt, der bei allen optischen Sensoren zu beachten ist, ist die Tatsache, dass die Oberflächeneigenschaften des Werkstücks die Messunsicherheit beeinflussen kann. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass bei optischen Verfahren die erreichbare Messgenauigkeit vom Öffnungswinkel der verwendeten Optik abhängt. Daraus folgt, dass eine hohe Messgenauigkeit einen großen Optikedurchmesser und/oder einen kleinen Messabstand bedeutet.¹³³

5.4.1 Automatisierte Sichtprüfung und Bildverarbeitung

Mithilfe einer automatisierten Sichtprüfung mit Bildverarbeitung lassen sich eine Vielzahl an Messtätigkeiten durchführen, wie z. B. Objekt- und Lageerkennung, Form- und Maßprüfung, Geometrieprüfung und Oberflächeninspektion.¹³⁴ Ein automatisiertes Sichtprüfsystem besteht grundsätzlich aus folgenden Komponenten: Beleuchtung, Kamera und Rechner. Die Kamera schickt das Bild an den Rechner, der mit Methoden der Bildverarbeitung die zu untersuchenden Informationen extrahiert und als Ergebnis darstellt.¹³⁵ Die nachfolgende Abbildung zeigt diese Vorgehensweise, dargestellt anhand der immer geringer werden den bzw. verdichteten Datenmenge je Prozessschritt. Je nach Prüfaufgabe haben die einzelnen Tätigkeiten eine unterschiedliche Gewichtung. Die Vorverarbeitung wird bei Geometrieprüfungen aufgrund des Kalibrierungsschrittes aufwändiger sein – bei anderen Anwendungen kann dieser Schritt gänzlich entfallen.¹³⁶

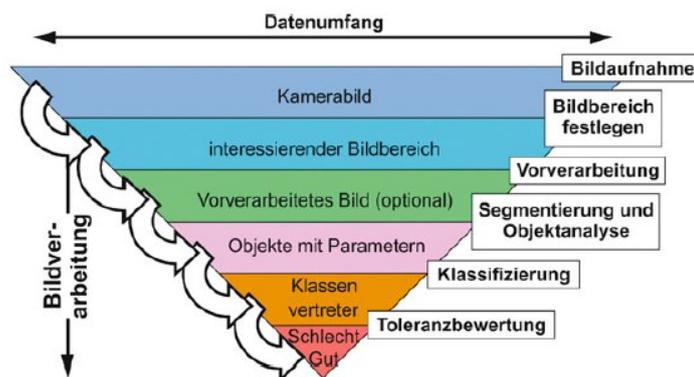


Abbildung 46: Vorgehensmodell automatisierte Sichtprüfung, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 174.

Im ersten Schritt geht es um die Bildaufnahme, auch Bildakquisition genannt, bei der ein Bild aufzunehmen ist mit maximalem Informationsgehalt, gleichzeitig sollten Fremdeinflüsse minimal gehalten werden. Das Zusammenspiel der Komponenten Werkstück, Beleuchtung, Kamera und Handhabung spielt hierbei eine große Rolle. Das entstandene Bild besteht aus einer Matrix von einigen Hunderttausend bis einigen Millionen Bildpunkten (= Pixel). Im nächsten Verarbeitungsschritt wird der Datenumfang reduziert, indem der interessierende Bildbereich festgelegt wird und ein etwaiger Hintergrund entfernt wird. Danach kommt es gegebenenfalls zu einer Bildvorverarbeitung, die je nach Aufgabe unterschiedlich ist und als Ziel die Vereinfachung der folgenden Bearbeitungsschritte hat. In der Bildvorverarbeitung wird mit einer Vielzahl von

¹³³ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 215.

¹³⁴ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 216.

¹³⁵ Vgl. Beyerer/Kammel/Krahe/Pérard/Puente León/vom Stein/Ziegler (n. a.), Online-Quelle [27. Oktober.2018], S. 5.

¹³⁶ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 174.

Filtern z. B. zum Glätten des Bildrauschens oder zum Hervorheben von Kanten gearbeitet, die hier allerdings nicht näher betrachtet werden. Bei der Segmentierung geht es dann in weiterer Folge darum, Bildbereiche zu zusammenhängenden Objekten zu verbinden. Dafür gibt es wieder verschiedene Methoden, wie z. B. die Schwellwertbildung (= Thresholding), oder aber auch das Nutzen von Diskontinuitäten in den Grauwertintensitäten. Mithilfe der Segmentierung lassen sich nun Merkmale bzw. Objektparameter berechnen, die über Auswertung der Regionen, Konturen oder der Oberflächenbeschaffenheit bestimmt werden. Es gibt eine große Anzahl solcher Parameter wie z. B. Länge, Breite, Schwerpunkt, Umfang etc. Mit den Parametern oder mit Kombinationen daraus können die vorhandenen Objekte in vordefinierten Klassen eingeteilt werden, die den für das Werkstück festgelegten Fehlertypen entsprechen. Dieser Schritt wird Klassifizierung genannt und diese passiert entweder auf Grundlage von geschlossener Logik, statistischen, wahrscheinlichkeitsbasierten Verfahren oder auch unscharfer Logik. Dieser Vorgang ist das Kernstück der Bildverarbeitung, denn hier wird viel Wissen über das Werkstück, dessen Herstellung und typischen Fehlern benötigt. Danach findet die Toleranzbewertung statt, bei der ein Satz an Toleranzen definiert wird, um entscheiden zu können, welche Werkstücke zur Entscheidung „schlechtes Teil“ führen.¹³⁷

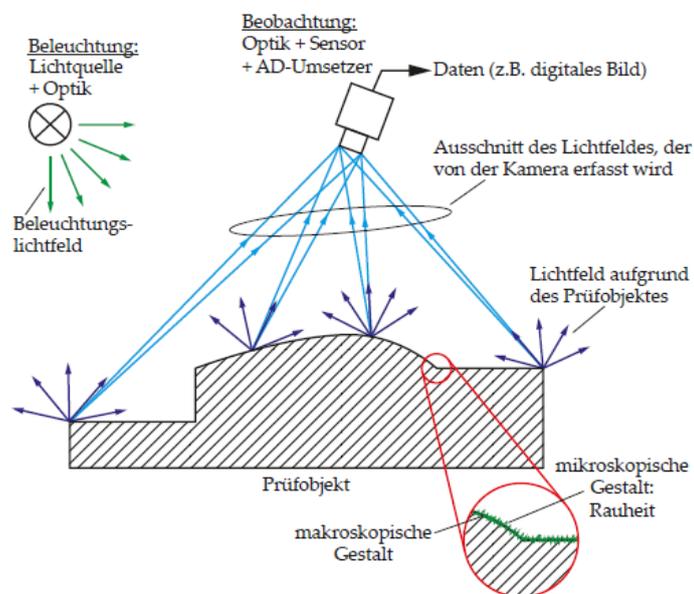


Abbildung 47: Schema automatisierte Sichtprüfung, Quelle: Beyerer/Puente León/Frese (2016) S. 9.

Es wird nun auf die wesentlichen Komponenten eines solchen Systems eingegangen: die Beleuchtung, die Kamera und das Objektiv. Die Auswahl an Kameramodellen ist mannigfaltig, deshalb wird hier nur auf die zwei wichtigsten Standardkameras eingegangen, die auf zwei Arten von Halbleitersensoren basieren: CCD- und CMOS-Kameras. Bei beiden Arten wird Licht in elektrischen Strom umgewandelt. CCD-Sensoren führen diese Umwandlung, sowie die Analog-zu-Digital-Umwandlung für alle Pixel durch eine einzige Schaltung durch. Dadurch sind sie häufig rauschärmer und auch die lichtempfindliche Fläche ist dadurch wesentlich größer als bei CMOS-Sensoren.¹³⁸ Die Vorteile von CCD-Kameras sind deren geringe

¹³⁷ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 174 ff.

¹³⁸ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 183.

Baugröße, niedriger Preis, eine sehr exakte Pixelgeometrie, Unempfindlichkeit gegenüber Stößen und elektromagnetischen Feldern.¹³⁹

Bei CMOS-Kameras finden die Umwandlungsprozesse in jedem Pixel statt, die kleinere lichtempfindliche Fläche wird durch Mikrolinsenarrays kompensiert.¹⁴⁰ Die Steuer- und Verarbeitungselektronik lassen sich direkt auf dem CMOS-Chip integrieren, während dies bei CCD-Sensoren separate Steuerbausteine erfordert. Die wesentlichen Vorteile von CMOS-Sensoren gegenüber CCD-Sensoren sind der frei wählbare Pixelzugriff, geringe Herstellungskosten und nur eine Versorgungsspannung. Die technischen Daten gängiger CMOS-Kameras sind ähnlich jenen der CCD-Kameras (siehe Tabelle 3).

Pixelanzahl	640 x 480 - 4.800 x 3.200
Pixelgröße	ca. 2 x 2 μm^2 - 10 x 10 μm^2
elektrische Verschlusszeit (Belichtungszeit)	ca. 10 μs - mehrere Sekunden (Langzeitbelichtung)
Bildrate (sinkt mit wachsender Bildgröße)	ca. 3 Hz - 200 Hz
SNR (Signal-Rausch-Verhältnis)	50 dB - 60 dB

Tabelle 3: Technische Daten gängiger Kameras für die automatische Sichtprüfung, Quelle: Beyerer/Puente León/Frese (2016) S. 265 (leicht modifiziert).

Die Lichtquelle für die Beleuchtung des Werkstücks ist ebenfalls eine wichtige Komponente in der Bildverarbeitung. Eine gute Beleuchtung macht die interessierenden Objekteigenschaften sichtbar und hebt diese hervor, damit die Bildauswertung wesentlich vereinfacht wird.¹⁴¹ Dabei wird zwischen verschiedenen Beleuchtungsarten unterschieden: Hellfeld-, Dunkelfeld- und Durchlichtbeleuchtung. Bei der Durchlichtbeleuchtung werden sehr gute Kontrastverhältnisse erzielt, daher eignet sich diese Art sehr gut für Prüfungen an transparenten Objekten, um z. B. Risse oder Blasen in Glaskörpern zu detektieren. Bei Hell- und Dunkelfeldbeleuchtungen wird gerichtetes Licht eingesetzt¹⁴² und diese Arten werden vor allem bei der Kontrolle von Oberflächenstrukturen angewendet.¹⁴³ Die unterschiedlichen Beleuchtungsarten und ihre Effekte auf eine Zwei-Euro-Münze sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

¹³⁹ Vgl. Beyerer/Puente León/Frese (2016), S. 264.

¹⁴⁰ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 183.

¹⁴¹ Vgl. Beyerer/Puente León/Frese (2016), S. 99.

¹⁴² Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 181.

¹⁴³ Vgl. Walter (2014), Online-Quelle [27.November.2018], S. 16 ff.

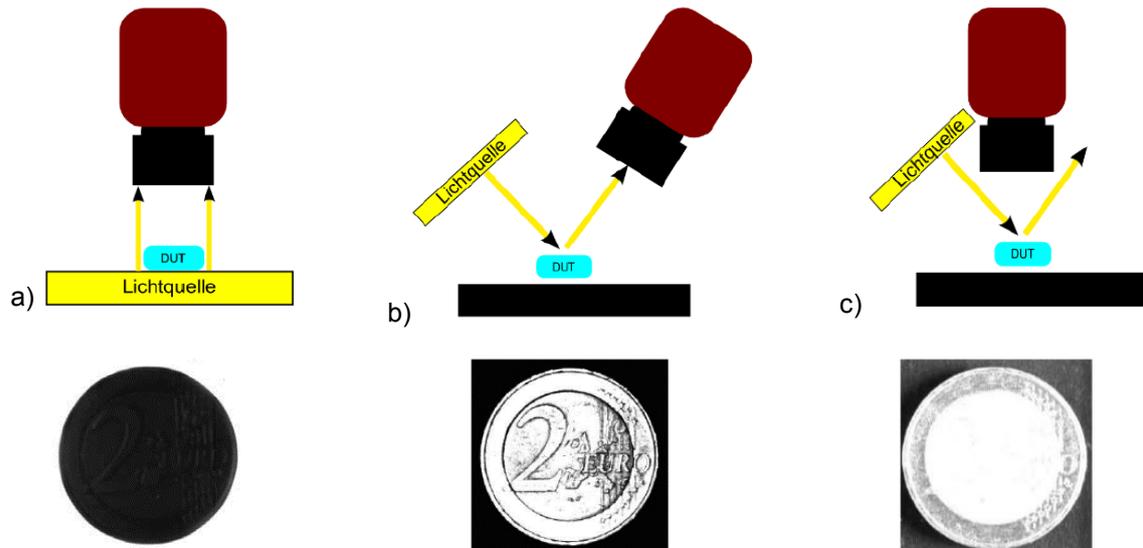


Abbildung 48: Unterschiedliche Beleuchtungsarten: Durchlicht (a), Hellfeld (b), Dunkelfeld (c), Quelle: Walter (2014), Online-Quelle [27.November.2018] S. 16-18 (leicht modifiziert).

Die letzte wesentliche Komponente ist das Objektiv, das aus einem Linsensystem und einer Blende besteht. In der Regel sind sowohl die Brennweite als auch die Blende des Objektivs verstellbar ausgeführt, damit sie flexibel eingesetzt werden können. In der Bildverarbeitung verwendet man einerseits Abbildungen mittels Zentralprojektion und andererseits wird auch die telezentrische Abbildung verwendet.¹⁴⁴ Bei telezentrischen Linsen kommt eine sogenannte Telezentrikblende zum Einsatz. Damit gelangen nur Lichtstrahlen zur Bildebene, die näherungsweise parallel zur optischen Achse verlaufen, dadurch bewirkt man eine Parallelprojektion des Objektraumes.¹⁴⁵

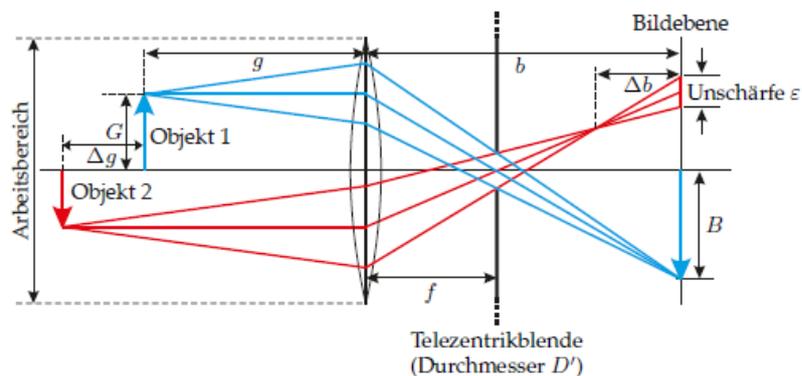


Abbildung 49: Prinzip der telezentrischen Abbildung, Quelle: Beyerer/Puente León/Frese (2016) S. 154.

5.4.2 Lasertriangulation

Lasertriangulation wird schon seit langer Zeit erfolgreich als Methode zur Abstandsmessung angewendet. Für eine Lasertriangulation wird nur eine geringe optische Leistung benötigt und auch die sonstigen Anforderungen an das Lasersystem und dessen Auswerteeinheit sind nicht besonders hoch, deshalb wurden

¹⁴⁴ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 184.

¹⁴⁵ Vgl. Beyerer/Puente León/Frese (2016), S. 154.

5.4.3 Lichtschnittverfahren

Das soeben vorgestellte Triangulationsprinzip kann auch zum sogenannten Lichtschnittverfahren erweitert werden, mit dem eine 3D-Formerfassung möglich wird. Der Laserpunkt wird durch eine Laserlichtebene ersetzt. Statt dem Zeilensensor wird ein Flächensensor in Form einer CCD/CMOS-Kamera verwendet. Das Schnittlelement der Lichtebene mit der Messfläche erzeugt durch Kamerabeobachtung eine Linie. Die Triangulation wird für jeden Punkt der Linie durchgeführt und somit kann auch der Abstand zum Oberflächenpunkt berechnet werden.¹⁴⁹

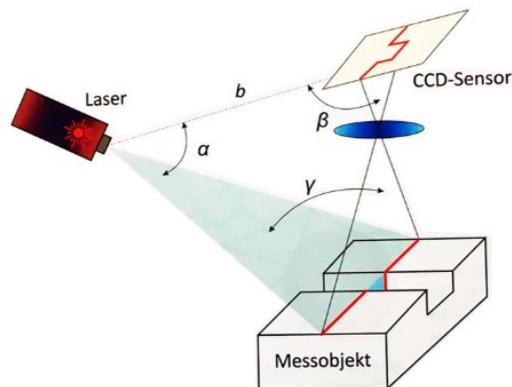


Abbildung 51: Prinzip Lichtschnittverfahren, Quelle: Schuth/Buerakov (2017) S. 11.

Das Werkstück wird durch die Laserlinie bewegt. Dies kann durch eine Linearachse, ein Transportband, eine Dreheinheit oder mittels Roboter passieren.¹⁵⁰ Zur flächenhaften Oberflächenerfassung wird der Laserstrahl über das Werkstück geführt. Dabei nimmt die Kamera für eine hohe Genauigkeit so viele Bilder wie möglich auf. Als Ergebnis erhält man eine Menge an Punkten im Raum, die durch x-, y- und z-Koordinaten festgelegt sind. Meist kann die Oberfläche des Objekts nicht durch eine einzige Scanbewegung erfasst werden. Daher ist es notwendig, die einzelnen Aufnahmen miteinander zu verknüpfen. Dazu werden mathematische Verfahren eingesetzt, die meist auf Korrelation oder merkmalsbasierten Methoden basieren. Nachdem die Berechnung der Punktwolke abgeschlossen wurde, ist im nächsten Schritt die Vernetzung der Messpunkte durchzuführen. Mithilfe von mehreren Eckpunkten (drei bis fünf) kann dieses Polygonnetz erstellt werden.¹⁵¹

¹⁴⁹ Vgl. Keferstein/Marxer/Bach (2018), S. 218.

¹⁵⁰ Vgl. Automation Technology GmbH (n. a.), Online-Quelle [28.November.2018], S. 4.

¹⁵¹ Vgl. Schuth/Buerakov (2017), S. 11 f.

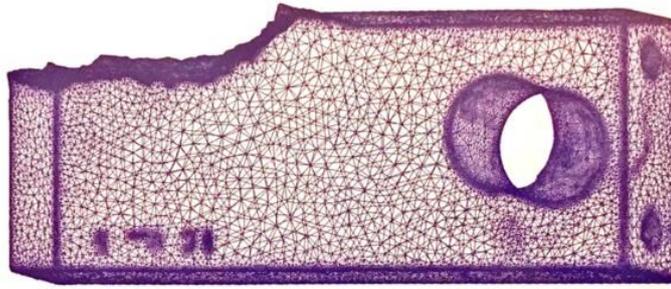


Abbildung 52: Ergebnis der Vernetzung einer Punktwolke, Quelle: Schuth/Buerakov (2017) S. 13.

Viele Lichtschnittsensoren sind als handgeführte Messsysteme umgesetzt und erlauben die Vermessung von verschiedensten Geometrien. Der Messkopf wird dabei über die Oberfläche des Messobjekts geführt. Das Einsatzgebiet von Lichtschnittverfahren ist groß: Es kann sowohl für große als auch kleine Objekte zur 3D-Formerrfassung angewendet werden und es ist auch nicht auf einen bestimmten Geometrietyt beschränkt.¹⁵²

5.5 Zusammenfassung

Die vorgestellten Messverfahren sind in der Lage, die geforderten Pflichtprüfungen für die Dimensionsmessung bei Rundzellen zu erfüllen. Der Durchmesser kann sowohl mit taktilen und optischen KMG, als auch mit Formmessgeräten und durch berührungslose Verfahren wie z. B. Lasertriangulation in den erforderlichen Toleranzen gemessen werden. Bei einigen Methoden können Prüfschritte kombiniert werden, sodass Länge und Durchmesser in einem Schritt gemessen werden können. Bildverarbeitende Systeme ermöglichen es, dass der DataMatrix-Code mit der Seriennummer ebenfalls ausgelesen werden kann. Die optionale Anforderung, etwaige Zellverformungen nach einigen Betriebsstunden zu erkennen, kann mit einem 3D-Verfahren wie z. B. dem Lichtschnittverfahren gelöst werden. Alle Messmethoden setzen ein entsprechendes Know-how für die Kalibrierung bzw. Programmierung des jeweiligen Gerätes voraus. Der zeitliche Aufwand und die entstehenden Datenmengen stehen in keinem Vergleich zur aktuellen Lösung mit der Lehre und können daher nicht eindeutig bewertet werden.

Bezüglich des Wunsches nach einer universellen Einsetzbarkeit bei unterschiedlichen Zelltypen eignen sich auch einige Verfahren: Das Lichtschnittverfahren bietet z. B. die Möglichkeit von handgeführten Messgeräten, die ein Umrüsten nicht nötig machen. Allerdings eignet sich diese Messmethode bei der Vielzahl an zu prüfenden Zellen eher weniger. Mit unterschiedlichen Tischaufbauten (Dreheinheit, Linearachsen) ließe sich diese Variante besser umsetzen. Bei allen Methoden ist aber eine Art Umrüsten notwendig: sei es das Ändern der Messvorrichtung (bei taktilen Sensoren), das Einstellen eines neuen Programms (bei KMGs) oder das Austauschen von Komponenten (z. B. Kamera, Optik).

Somit gibt es eine Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten in puncto Geometriemessung für den vorliegenden Prozess. In den ausgearbeiteten Konzepten werden die Erkenntnisse aus den Betrachtungen der Messverfahren einfließen.

¹⁵² Vgl. Schuth/Buerakov (2017), S. 9.

6 KONZEPTANSÄTZE

Anhand der in der Prozessanalyse definierten Anforderungen und den Erkenntnissen aus den ausgewählten Geometriemessverfahren können nun unterschiedliche Konzepte erstellt werden, die dem Unternehmen zur Orientierung und als Entscheidungsgrundlage dienen sollen. Um ein breites Spektrum an Lösungsmöglichkeiten bieten zu können, werden drei unterschiedliche Varianten erstellt.

Der erste Vorschlag konzentriert sich mithilfe der vorgestellten Prozessoptimierungsmethoden auf die Verbesserung des bestehenden Prozesses. Dabei wird auch auf die Automatisierungsmöglichkeiten des vorhandenen Equipments eingegangen.

Im zweiten Konzept wird dann eine neue Methode zur Dimensionsmessung eingebaut, die es ermöglicht, den Prozess entsprechend den Pflichtprüfkriterien aus den Projekten vollständig zu erfüllen.

Als letztes wird dann noch ein Konzept vorgeschlagen, mit dem auch die optionalen Anforderungen wie der universellen Einsetzbarkeit bei unterschiedlichen Zelltypen und die vollständige Geometrieerfassung für Prüfungen auf Verformung etc. nach einigen Betriebsstunden mit einbezogen werden.

6.1 Konzept 1: Prozessoptimierung mit vorhandenem Equipment

Das erste vorgeschlagene Konzept soll mit mithilfe der vorhandenen Messmittel durchgeführt werden. Ziel ist es, die Prozesseffizienz zu steigern und aufzuzeigen, wie viel Potential in der Optimierung von bestehenden Prozessen liegt. Wie bereits im Punkt 4.1.9 beschrieben, gibt es aktuell keine schriftliche Prozessdefinition, somit ist es naheliegend, dass hier einige Schritte zu viel oder zu einem ungünstigen Zeitpunkt vollzogen werden. Unter Zuhilfenahme einiger Prinzipien der Prozessverbesserungen ist folgendes Konzept erstellt worden, das im nachfolgenden Prozessflussdiagramm dargestellt ist.

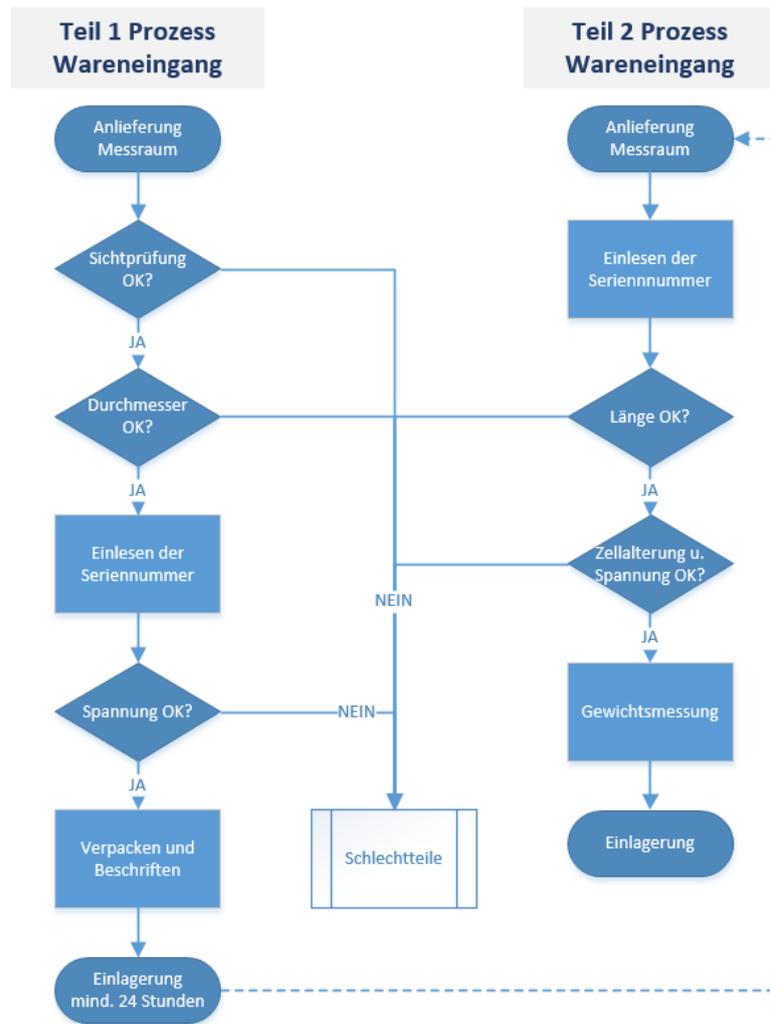


Abbildung 53: Prozessflussdiagramm Konzeptvorschlag 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Konkret bedeuten die einzelnen Schritte folgenden Prozessablauf: Nachdem die Zellen in den Messraum angeliefert werden, sind im ersten Schritt lediglich folgende Prozessschritte durchzuführen: Es wird mit einer Sichtprüfung begonnen. Die Mitarbeiter erhalten Richtlinien mit Beispielfotos von beschädigten Zellen, die sofort auszumustern sind. Danach erfolgt die Durchmesserprüfung anhand der Lehre, für die zur flexibleren Anwendung in puncto Durchmessertoleranzen Lehrringe erstellt werden. Dies ist sinnvoll, da Rundzellen je nach Projekt in verschiedenen Größen geliefert werden können. Erst nach diesen beiden Prüfungen erfolgt das Einlesen der Seriennummer. Der Grund, dass die Seriennummer erst jetzt eingelesen wird, liegt darin, dass für die beiden vorherigen Schritte keine Datenschnittstellen bestehen und bei einem etwaigen Ausschuss die Seriennummer umsonst eingelesen wurde.

Danach erfolgt das Einlesen der Seriennummer in die vorgegebene Tabelle und Dokumentation des Messdatums. Daraufhin wird die Spannung gemessen und gegebenenfalls werden Schlechtzellen, deren Spannung bereits bei Anlieferung unter 2,8 V beträgt¹⁵³, ausgemustert. Nach diesen Schritten werden die Zellen eingelagert.

¹⁵³ Laut AVL-Prüfvorgabe.

Da 24 Stunden gewartet werden muss, um eine qualitativ verwertbare Aussage über den maximal erlaubten Spannungsverlust treffen zu können, werden erst nach Ablauf dieses Zeitrahmens die nächsten Qualitätsprüfschritte durchgeführt, die wiederum ident zum Originalprozess sind: Die Längenmessung erfolgt mittels digitaler Messuhr und die Gewichtsmessung mit der vorhandenen Präzisionswaage. Der Unterschied zum Originalprozess liegt aber in der Messdatenerfassung: Diese erfolgt nicht mehr manuell durch Ablesen der Daten durch den Mitarbeiter, sondern die vorhandenen Geräte sind über ihre Standardschnittstellen an die Excel-Tabelle gekoppelt und werden mittels Schalterbetätigung übermittelt. Somit erfolgt eine fehlerlose Datenübertragung. Für die Spannungsmessung ist eine eigene Messvorrichtung zum schnelleren Anlegen der Zellen an die Kontakte anzufertigen.

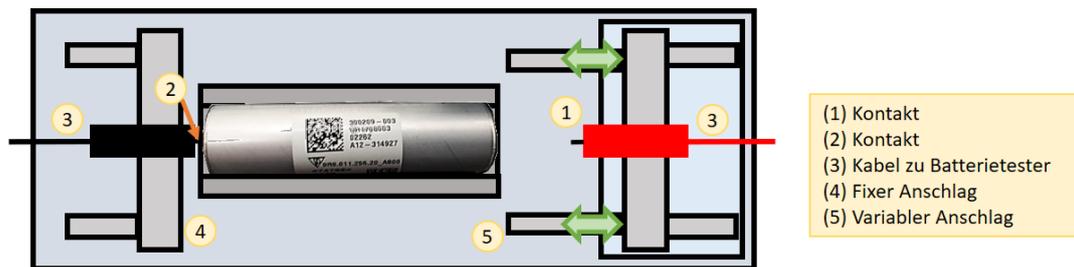


Abbildung 54: Skizze Messvorrichtung Zellspannung, Quelle: Eigene Darstellung.

Eine Messvorrichtung für die Längenmessung ist bereits vorhanden. Die Verknüpfung der Messuhr mit der Excel-Tabelle erfolgt in einem ersten Testaufbau, der in Kapitel 6.4 beschrieben ist. Die Mitarbeiter erfassen die Werte mittels Betätigung eines Fußschalters und sie sehen dann sofort, ob sich die Zellen außerhalb der Toleranz befinden und können diese aussortieren. Zum Schluss erfolgt erneut die Einlagerung, damit ist der Wareneingangsprozess vollständig abgeschlossen und die Zellen sind für den Zusammenbau freigegeben. Die Mitarbeiter nehmen immer eine Zelle auf und führen den gesamten Prozess durch und beginnen dann mit der nächsten Zelle. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen möglichen Aufbau im Messraum. Der Karton mit je 140 Stück Zellen steht links vom Mitarbeiter. Gut- bzw. Schlechteile werden zu seiner Rechten einsortiert.

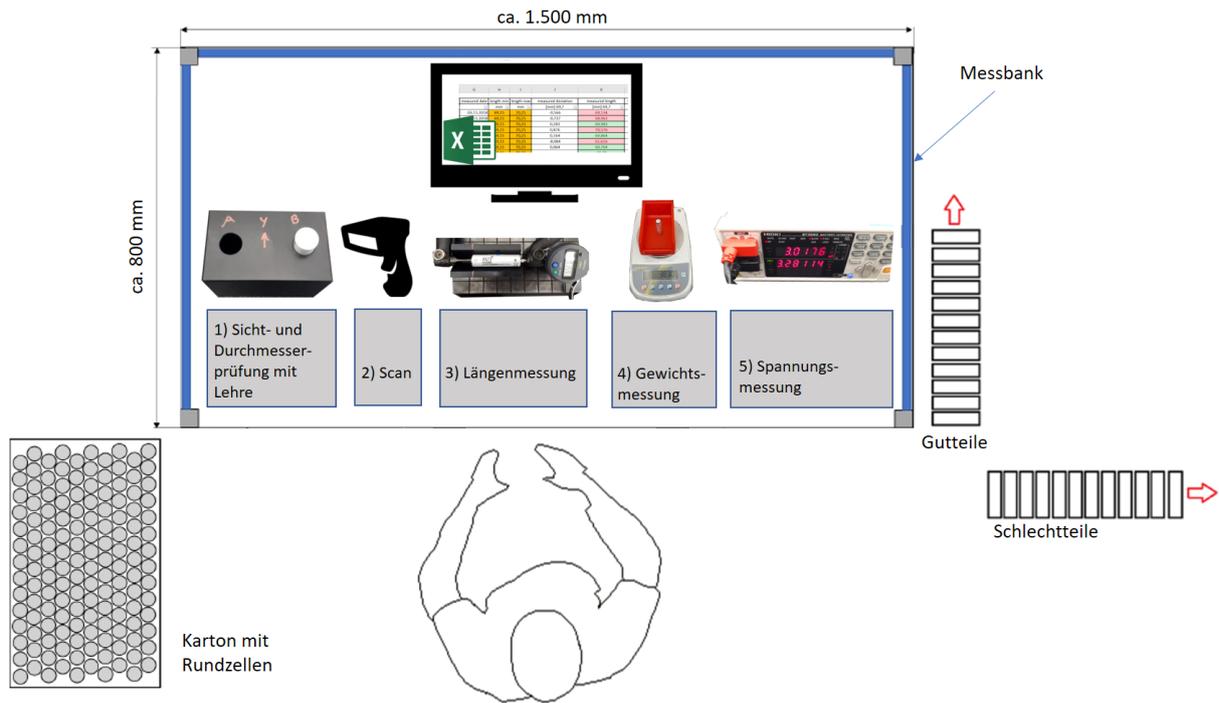


Abbildung 55: Möglicher Messaufbau zu Konzept 1, Quelle: Eigene Darstellung.

6.2 Konzept 2: Taktile Geometrievermessung

Beim zweiten Konzeptvorschlag wird nun ein in Kapitel 5 vorgestelltes Geometriemessverfahren eingeführt. Die Schritte im ersten Teilprozess werden im Gegensatz zum ersten Konzept auf die Spannungsmessung reduziert, da die erste Spannungsmessung wichtig für den Vergleich der Messdaten bei der späteren Messung ist. Neu sind die Dimensionsprüfungen im zweiten Teilprozess. Hier werden nun zwei Messschritte zu einem zusammengefasst: Die Längen- und Durchmessermessung. Es wird ein taktiles Verfahren angewendet, bei dem der Durchmesser rotierend vermessen wird. Vorgeschlagen wird, die Zelle horizontal in die Messvorrichtung einzulegen. Durch drei Rollen wird die Zelle in Rotation gebracht und zwei taktile Messelemente führen die Messung durch. Im unbewegten Zustand wird dann mit zwei weiteren Messelementen an den Kontakten der Zelle deren Länge gemessen.

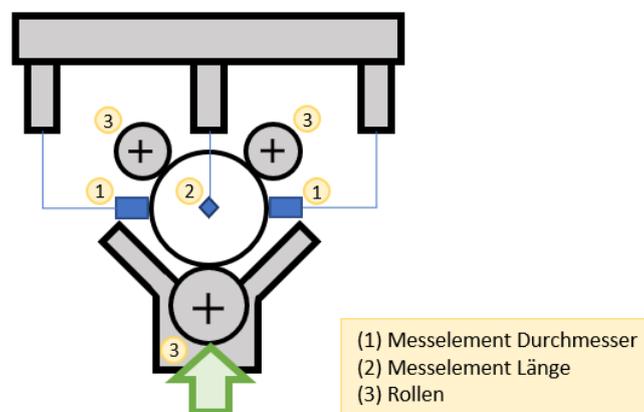


Abbildung 56: Skizze Messvorrichtung taktile Längen- und Durchmessermessung, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf einem HMI Display wird dem Mitarbeiter dann sofort angezeigt, ob sich die Zelle innerhalb der Toleranzen befindet oder ob sie ausgemustert werden muss. Nach der ersten Station wird in einer zweiten Station das Gewicht mit der vorhandenen Präzisionswaage gemessen und danach erfolgt wiederum die Spannungsmessung mit dem Hioki-Batterietester. Das Handling der Zellen erfolgt manuell und hintereinander: Dies bedeutet, dass jede Zelle zuerst vollständig vermessen wird, bevor der Mitarbeiter mit einer neuen Zelle den nächsten Messprozess beginnt.

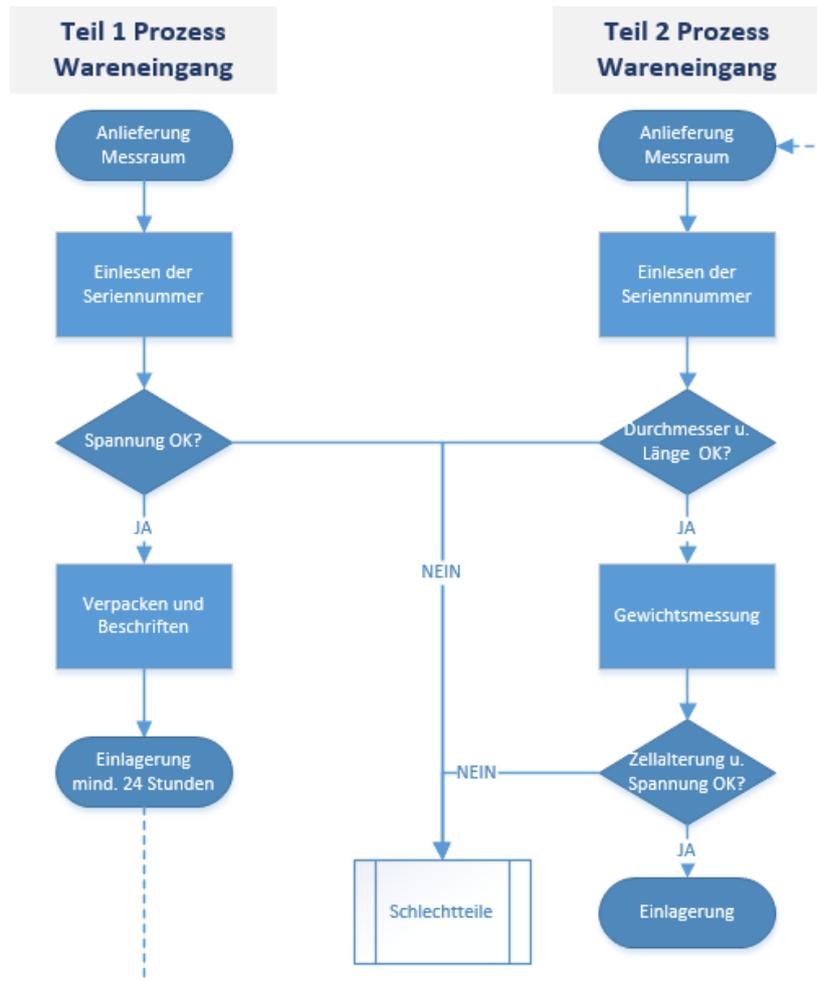


Abbildung 57: Prozessflussdiagramm Konzept 2, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Messdatenerfassung erfolgt nicht mehr über Excel, sondern über andere Lösungen. Eine Möglichkeit wäre ein sogenannter Messcomputer, der die Daten über eine eigene Software verarbeitet und z. B. als CSV-Report abschließend exportiert. Alternativ kann auch mit Standard-PCs gearbeitet werden und dort eine eigene Auswertemöglichkeit programmiert werden, beispielsweise in LabVIEW.

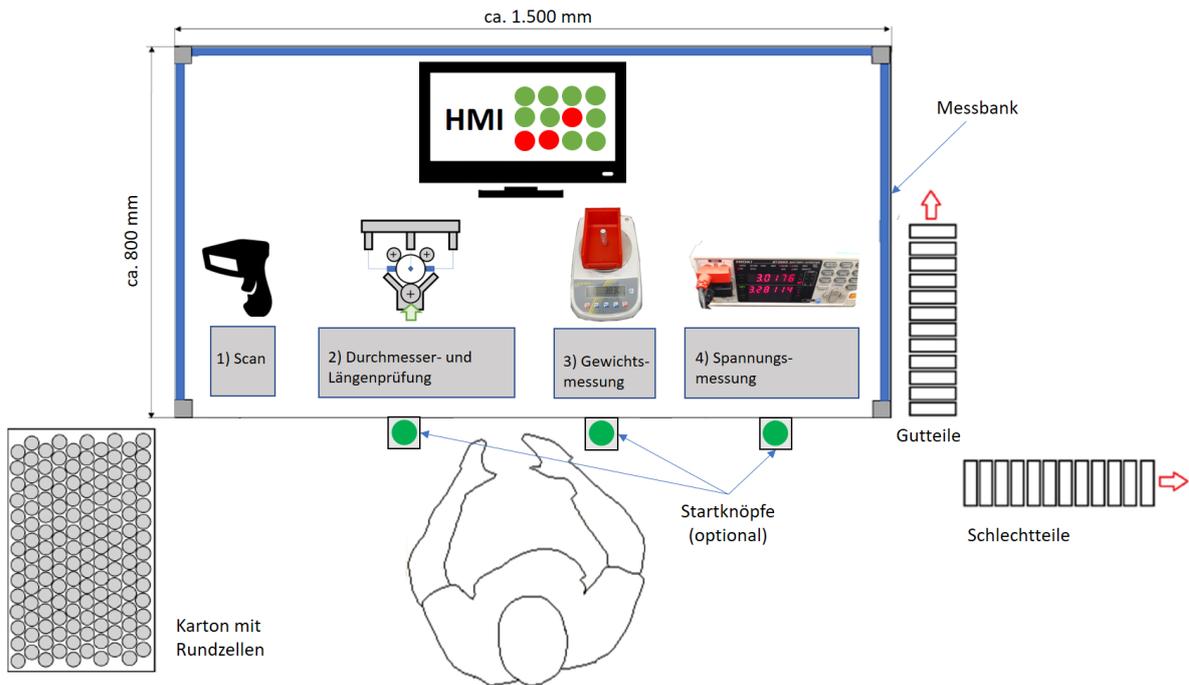


Abbildung 58: Möglicher Messaufbau zu Konzept 2, Quelle: Eigene Darstellung.

Um der optionalen Anforderung der universellen Einsetzbarkeit der Geometriemessung nachzukommen, wäre es bei diesem Konzept auch möglich, den Aufbau derart zu gestalten, dass die Messvorrichtung für Länge und Durchmesser umrüstbar ist und so auch für prismatische Zellen verwendet werden kann.

6.3 Konzept 3: 3D-Geometrievermessung

Um eine vollständige Geometrievermessung der Zelle machen zu können, empfiehlt sich ein 3D-Verfahren wie das Lichtschnittverfahren (oder auch 3D-Lasertriangulation genannt). Grundsätzlich ähneln sich hier die Schritte wiederum zum zweiten Konzept, mit dem Unterschied, dass jetzt nicht nur der Durchmesser an zwei Stellen geprüft wird, sondern ein komplettes 3D-Abbild der Zelle erstellt wird. Die Rundzelle wird für die Messung nicht linear bewegt, sondern wird mithilfe eines Drehtisches rotiert. Wichtig hierbei ist, dass die Ausführung der Drehbewegung sehr stabil zu gestalten ist. Ein zusätzliches Feature bei dieser Lösung ist, dass der DataMatrix-Code nicht mehr per Handscanner eingelesen werden muss, da der Code z. B. durch eine Zeilenkamera während der Drehung eingelesen werden kann.

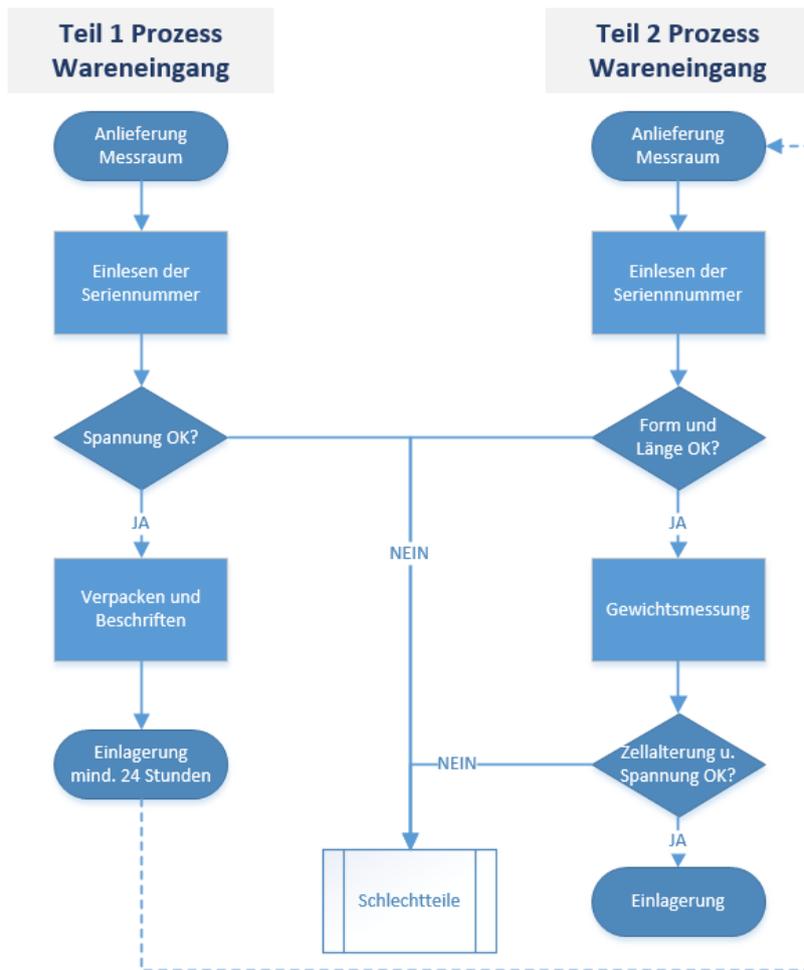


Abbildung 59: Prozessflussdiagramm Konzept 3, Quelle: Eigene Darstellung.

Die restlichen Schritte sind wiederum ident zum zweiten Konzept. Der Vorteil dieser Variante ist, dass bei Bedarf die Zelle nach einigen Betriebsstunden erneut geprüft werden kann – hinsichtlich Veränderung der Zellform. Es kann festgestellt werden, ob sich die Zelle ausgedehnt hat etc.

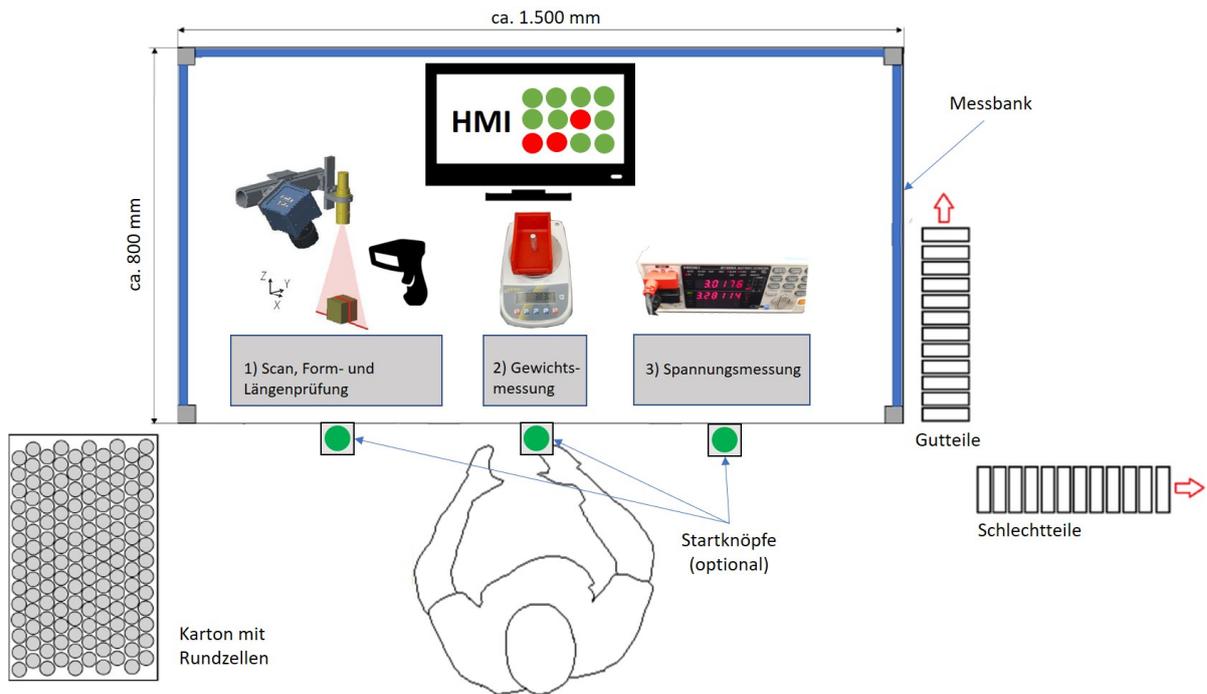


Abbildung 60: Möglicher Messaufbau zu Konzept 3, Quelle: Eigene Darstellung (Quelle Abbildung Lichtschnittverfahren: Automation Technology GmbH (n. a.), Online-Quelle [28.November.2018] S. 7.

6.4 Testaufbau zu Konzept 1

Wie bereits erwähnt, ist es für das erste Konzept notwendig, das vorhandene Equipment optimal anzuwenden, um eine Verbesserung zu erzielen. Da im aktuellen Prozess alle Messwerte manuell von den Geräten abgelesen werden, ist somit das erste Ziel die automatisierte Datenübertragung. In einem Versuchsaufbau wird dazu die digitale Messuhr zur Längenmessung an einen PC angeschlossen und die Messdaten in die Excel-Datei übertragen. Da es sich beim Großteil der angelieferten Zellen um Rundzellen handelt, wird für den Versuchsaufbau nur dieser Zelltyp verwendet.

Zur Längenmessung steht eine digitale Messuhr der Marke Mitutoyo (Typ: ID-112XB) inkl. Datenkabel und Fußschalter zur Verfügung, sowie die zugehörige Software. Mit dem Programm „USB-ITPAK“ lassen sich die eigens erstellten Excel-Vorlagen konfigurieren und durch Bedienung des Fußhebels können die Messdaten automatisiert in die gewünschten Zellbereiche übertragen werden. Dies ist deshalb von Vorteil, da Excel bereits im aktuellen Prozess verwendet wird und die vorhandenen Vorlagen verwendet und entsprechend adaptiert werden können.

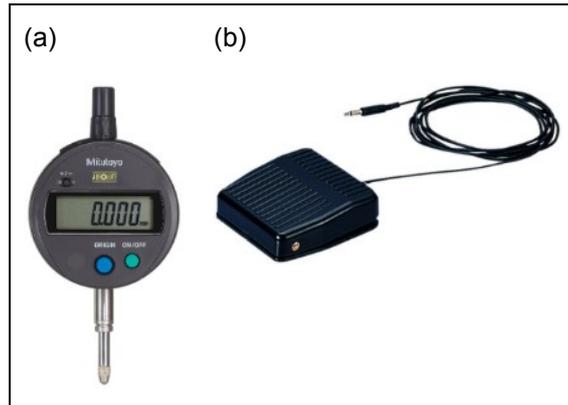


Abbildung 61: Komponenten Testaufbau: (a) Messuhr Mitutoyo, Quelle: Mitutoyo (n.a.), Online-Quelle [24.November.2018] ., (b) zugehöriger Fußschalter, Quelle: Mitutoyo (n. a.), Online-Quelle [24.November.2018].

Die Messuhr zeigt die Abweichung zum eingestellten Nullpunkt an, d.h. im vorliegenden Fall ist für die Rundzelle die Standardlänge 69,7 mm als Nullpunkt zu definieren. Die Abweichung wird dann in die Excel-Tabelle in die Spalte J übertragen und mithilfe einer Formel wird dann in der Spalte K die Gesamtlänge angegeben. Durch eine bedingte Formatierung ist nun sofort ersichtlich, ob die Zelllänge außerhalb der Toleranz liegt und die Zelle kann sofort aussortiert werden.

G	H	I	J	K
measured date	length min	length max	measured deviation	measured length
	mm	mm	[mm] 69,7	[mm] 69,7
03.11.2018	69,15	70,25	-0,566	69,134
03.11.2018	69,15	70,25	-0,737	68,963
03.11.2018	69,15	70,25	0,283	69,983
03.11.2018	69,15	70,25	0,876	70,576
03.11.2018	69,15	70,25	0,164	69,864
03.11.2018	69,15	70,25	-8,084	61,616
03.11.2018	69,15	70,25	0,064	69,764

Tabelle 4: Automatisierte Längenerfassung mit bedingter Formatierung in Excel, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5 Option: Roboterhandling

Das Handling wird in allen drei Konzepten vom Menschen ausgeführt. Für die Konzepte 2 und 3 ließe sich das Handling bei Bedarf auch durch einen Roboter ersetzen. Hier bietet sich ein kollaborierender Roboter, ein sogenannter Cobot, an.

Cobots sind Industrieroboter, die Hand in Hand mit Personen zusammenarbeiten. Dabei unterstützen und entlasten sie den Menschen bei verschiedenen Tätigkeiten, wenn es z. B. darum geht, schwere Bauteile zu positionieren oder Arbeiten daran auszuführen. Dies bedeutet, dass zwischen Mensch und Roboter eine große räumliche Nähe besteht und auch direkter Kontakt ist möglich. Eine trennende Schutzeinrichtung zwischen Mensch und Roboter ist nicht mehr nötig. Es müssen andere Schutzmaßnahmen gesetzt werden,

da das Kollisionsrisiko nach wie vor besteht. Dieses Kollisionsrisiko muss laufend ermittelt werden und es ist im Zuge der Robotersteuerung zu minimieren.¹⁵⁴

Auf die genauen Richtlinien wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft eine mögliche Robotervariante des Herstellers Universal Robots.



Abbildung 62: Cobot UR5e des Herstellers Universal Robots, Quelle: JUGARD+KÜNSTNER GmbH (n. a.), Online-Quelle [24.November.2018] S. 1.

Der vorgeschlagene Cobot hat sechs Freiheitsgrade, eine Traglast von 5 kg und eine Reichweite von 850 mm¹⁵⁵, die für den in den Konzepten dargestellten Messaufbau ausreichend ist. Es handelt sich hier nur um ein Beispiel – andere Hersteller bieten ähnliche Produkte an. Bei der etwaigen Anschaffung eines Cobots sollten in jedem Fall die o.a. Daten bzgl. Reichweite und Traglast berücksichtigt werden.

Ein Roboter ist dann sinnvoll, wenn die monotonen Tätigkeiten durch den Menschen Messfehler verursachen oder zeitlich zu lange dauern. Die Anschaffungskosten sind den Arbeitskosten natürlich gegenüberzustellen und es sind entsprechende Kalkulationen anzustellen (dies wurde in Kapitel 1.3 bereits näher erläutert).

6.6 Bewertung der Konzepte

Allgemein ist festzuhalten, dass den Konzepten gemein ist, dass sie sich im Wesentlichen nur im Punkt der Geometrievermessung unterscheiden. Deshalb liegt das Hauptaugenmerk der nachfolgenden Bewertung in erster Linie auf diesem Aspekt. Es wird aber noch auf weitere Kriterien eingegangen, die Einfluss auf den Gesamtprozess haben. Die Kriterien werden mit einem Gewichtungsfaktor belegt, der als Multiplikator zur Konzeptbewertung dienen soll:

- Wenig wichtig
- Neutral
- Wichtig
- Sehr wichtig

¹⁵⁴ Vgl. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (n. a.), Online-Quelle [24.November.2018].

¹⁵⁵ Vgl. JUGARD+KÜNSTNER GmbH (n. a.), Online-Quelle [24.November.2018], S. 1.

6.6.1 Messgenauigkeit

Die erreichbare Messgenauigkeit gilt ebenfalls für den Gesamtprozess und ist als **sehr wichtig** einzuordnen. Die seitens Konstruktionszeichnung erforderliche Fertigungsgenauigkeit muss durch die Auflösung der Messmittel in jedem Fall abgedeckt sein. Für die Längen-, Gewichts- und Spannungsmessungen sind bereits geeignete Geräte im Einsatz, die weiterhin verwendet werden können. Lediglich bei der Auswahl einer geeigneten Formmessung ist hierauf zu achten.

6.6.2 Messdauer

Die Messdauer wird als **neutrales** Kriterium bewertet, das den Gesamtprozess betrifft. Begründet werden kann dies durch die Tatsache, dass es sich um keinen Serienfertigungsprozess handelt, bei dem Zeit eine maßgebliche Rolle spielt. De facto ist es so, dass Bauteile im Prototypenstadium einer 100 %-Kontrolle zu unterziehen sind und dies ist mit einem entsprechenden Zeitaufwand verbunden. Ganz zu vernachlässigen ist dieser Aspekt allerdings nicht, da ein Qualitätsprozess für Kleinserien angestrebt wird, der in einem wirtschaftlich angemessenen Zeitrahmen durchführbar sein muss.

6.6.3 Messumfang

Der Messumfang zielt im Speziellen auf die Prozessschritte zur Geometrievermessung ab und ist **neutral** zu bewerten. Laut Prüfvorgaben wird keine 3D-Vermessung der Bauteile vorgesehen, da sich nur die Länge und der Durchmesser für den Verbau innerhalb der Toleranzen befinden müssen. Diese Messungen lassen sich mithilfe von 2D Messungen im ausreichenden Ausmaße durchführen. Für etwaige Beschädigungen kann dann eine Sichtprüfung durchgeführt werden.

6.6.4 Universelle Einsetzbarkeit

Die universelle Einsetzbarkeit bezieht sich auf die Möglichkeit, dass die Konzepte auch bei anderen Zelltypen eingesetzt werden können. Dies ist grundsätzlich keine verpflichtende Vorgabe, ist aber aus unternehmerischer Sicht eine durchaus sinnvolle Anforderung, da sich die AVL als Entwicklungspartner nicht nur auf Projekte mit einem Zelltyp fokussiert. Zurzeit betreffen ca. 80 % der Projekte Rundzellen, aber die Wahrscheinlichkeit, dass sich dies in den kommenden Jahren ändert, ist durchaus ein zentraler Aspekt, den es zu betrachten gilt. Mit einer universellen Lösung kann die AVL schnell auf derartige Veränderungen reagieren. Deshalb wird dieses Kriterium als **wichtig** eingestuft.

6.6.5 Automatisiertes Handling

Die Möglichkeit eines automatisierten Handlings der Batteriezellen durch z. B. einen kollaborierenden Roboter steht beim Wareneingangsprozess nicht im Mittelpunkt und wird daher als **wenig wichtig** bewertet. Für die Kleinserienfertigung ist die Handhabung noch gut durch den Menschen durchführbar. Ein automatisiertes Handling wäre aber realisierbar und kann in einer separaten Investitionsberechnung näher betrachtet werden.

6.6.6 Erkennen von Formveränderungen

Als optionale Anforderung an den Prozess gibt das Unternehmen an, dass eine gesamte 3D-Geometriemessung wünschenswert wäre, um damit etwaige Ausdehnungen der Zellen nach einigen Betriebsstunden besser prüfen zu können. Der Grund dafür ist, dass AVL aus dem Formverhalten von Prototypenzellen wichtige Erkenntnisse erhalten kann, die für Entwicklungsprojekte von Bedeutung sein können. Diese Anforderung ist aber kein Muss-Kriterium für den vorliegenden Prozess. Da dieses Kriterium dennoch nicht unerheblich für das Unternehmen ist, wird es in die Konzeptbewertung mit aufgenommen und als **neutral** gewichtet.

6.6.7 Auswertung und Analyse

Die soeben dargelegten Kriterien werden nun den einzelnen Konzepten gegenübergestellt und wie folgt bewertet:

- Sehr gut
- Gut
- Genügend
- Schlecht

Danach werden die Bewertungspunkte mit den Gewichtungsfaktoren multipliziert und tabellarisch das Ergebnis dargestellt, das als Entscheidungsgrundlage für die AVL dienen soll. Um die qualitativen Bewertungs- und Gewichtungsfaktoren in einem Scoring auswerten zu können, ist eine entsprechende Quantifizierung notwendig:

Gewichtungen Kriterien		Einzelbewertungspunkte	
Sehr wichtig	100%	Sehr gut	4
Wichtig	75%	Gut	3
Neutral	50%	Genügend	2
Wenig Wichtig	25%	Schlecht	1

Tabelle 5: Quantifizierung, Quelle: Eigene Darstellung.

Nachstehend ist das quantifizierte Ergebnis der Analyse der Konzeptbewertung ersichtlich. Somit ist erkennbar, dass anhand des erstellten Scorings das Konzept 3 die höchste Punkteanzahl erreicht.

	Faktor	Einzelbewertung Konzepte		
		Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Messgenauigkeit	1	2	4	3
Messdauer	0,75	3	3	3
Messumfang (2D, 3D)	0,5	1	2	4
Universelle Einsetzbarkeit	0,75	1	2	3
Automatisiertes Handling	0,25	2	4	4
<i>Erkennen von Formveränderungen</i>	0,5	1	1	4
	Summe:	6,5	10,25	12,5

Tabelle 6: Ergebnisse der Konzeptbewertung, Quelle: Eigene Darstellung.

7 RESÜMEE

Abschließend werden die Erkenntnisse aus dieser Arbeit und Ergebnisse aus der Konzeptbewertung beschrieben und ein finaler Ausblick hinsichtlich technischer Umsetzung im Unternehmen gegeben.

7.1 Zusammenfassung und Erkenntnisse

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit war es, einen zurzeit rein manuell durchgeführten Prozess der Wareneingangskontrolle von Batteriezellen zu optimieren. Es handelt sich bei den gelieferten Zellen um Vorseerien-Teile, die einer 100 %-Kontrolle unterzogen werden müssen, und da die Nachfrage im Bereich Batterien für das Unternehmen AVL stetig steigt, wird auch die Anzahl an gelieferten Zellen immer größer. Dies bringt für den aktuellen manuellen Prozess einige Probleme mit sich. Ein weiteres Problem in der momentanen Vorgehensweise ist, dass je nach Projekt unterschiedliche Zelltypen angeliefert werden. Dies bedeutet, dass auch nach einer universalen einsetzbaren Methode gesucht werden muss. Das Ziel der Arbeit bestand darin, den vorhandenen Prozess zu analysieren, die vorhandenen technischen Umsetzungsmöglichkeiten zu evaluieren und daraus Konzepte zu erstellen, die dem Management als Entscheidungsgrundlage für die weiteren Implementierungsschritte dienen sollten.

Bevor im Theorieteil der Arbeit auf die technischen Grundlagen von Lithium-Ionen-Batterien und Methoden der Prozessoptimierung näher eingegangen wurde, galt es zunächst, den möglichen Automatisierungsgrad festzulegen. Dieses Kapitel hat gezeigt, dass für den vorliegenden Prozess eine Vollautomation nicht sinnvoll scheint, da es zu viele wechselnde Parameter gibt und trotz steigender Stückzahlen diese im wirtschaftlichen Sinne noch zu gering sind, als dass sich eine Investition in Richtung Vollautomatisierung rentieren würde.

Anschließend wurden für den Prozess wichtige technische Kriterien zu Batteriezellen beschrieben, wie z. B. welche unterschiedlichen Bauweisen es gibt, wie Lithium-Ionen-Zellen grundsätzlich funktionieren und welche funktions- und sicherheitsrelevanten Aspekte bei der Handhabung damit es zu beachten gilt. Danach wurden die wesentlichen Begriffe und Methoden rund um das Thema Prozessoptimierung näher erläutert. Aus diesen Erkenntnissen konnte dann die weitere Vorgehensweise für den praktischen Teil festgelegt werden.

Der Fokus des praktischen Teils lag in der Prozessanalyse – die Darstellung des Ist-Zustandes erwies sich als eine der großen Herausforderungen bei dieser Arbeit. Der Grund hierfür liegt darin, dass der Prozess nicht standardisiert bzw. auch nicht schriftlich dokumentiert war. Jede Information und jeder Schritt mussten genau hinterfragt werden. Anschließend an die Definition des Ist-Zustandes wurden Anforderungen und Ziele an den optimierten Prozess festgelegt. Auch dieser Schritt war aufwändig, da viele Anforderungen gestellt wurden, die über den Umfang des aktuellen Prozesses hinausgehen, daher musste dann schlussendlich zwischen Pflicht- und optionalen Anforderungen und zusätzlichen Varianten unterschieden werden.

Im Fokus der Anforderungen stand die Geometrievermessung, da diese im aktuellen Prozess vernachlässigt wurde. Aus diesem Grund war es notwendig, im Anschluss an die Prozessanalyse ausgewählte Methoden zur Geometrievermessung im Detail zu erläutern, um darzulegen, welche Varianten im optimierten Prozess angewendet werden können. Dabei stellte sich heraus, dass mehrere Methoden die Prüfaufgaben erfüllen können.

Nach dieser umfangreichen Ausarbeitung konnte nun mit der Konzepterstellung begonnen werden. Da sich gezeigt hat, dass es mehrere Ansätze für den Prozess gibt, wurden drei Konzepte erstellt, die später einer Bewertung unterzogen wurden. Eine große Erkenntnis bei der Erstellung des ersten Konzeptes war es, dass mithilfe einiger Prozessoptimierungsmethoden, ohne Einbeziehung technischer Maßnahmen, bereits einige Verbesserungen erzielt werden konnten: So helfen schon kleine Veränderungen in der Reihenfolge des Prozesses oder das Eliminieren von Arbeitsschritten, die Prozessdurchlaufzeit und Qualität zu erhöhen. Außerdem konnte in einem Testaufbau gezeigt werden, dass die Verwendung der Datenschnittstellen bei den jeweiligen Messgeräten zur automatisierten Messdatenübertragung eine erhebliche Arbeitserleichterung darstellt. In den weiteren Konzepten flossen die Erkenntnisse aus dem Kapitel 5 ein, in dem verschiedene Geometriemessverfahren vorgestellt wurden. In Konzept 2 wird der Ansatz gewählt, die Geometrie taktil zu vermessen und bei Konzept 3 ist es eine optische Lösung, bei der eine 3D-Formerfassung durchgeführt wird.

Im Anschluss daran wurden die drei Konzepte bewertet, und zwar anhand von festgelegten Kriterien aus den Anforderungen, die mit Gewichtungsfaktoren belegt wurden. In die Bewertung wurden auch die optionalen Anforderungen des Unternehmens mit aufgenommen. Die Analyse hat gezeigt, dass das Konzept 3 mit einer 3D Formerfassung eine für die AVL geeignete Lösung darstellt.

Die Arbeit hat des Weiteren gezeigt, dass eine universell einsetzbare Methode zur Geometrievermessung von unterschiedlichen Zelltypen nur aufwändig umzusetzen ist. Zwar gibt es beispielsweise 3D-Handscanner, die unterschiedlichste und komplexe Geometrien vermessen können, dies ist aber für kleine Batteriezellen, die zu mehreren tausend Stück pro Jahr zu prüfen sind, kein gangbarer Weg. Bei den Lösungen ist immer zumindest mit einem Umrüstvorgang zu rechnen.

7.2 Ausblick

Alle drei Konzepte inkl. Bewertung und Analyse werden nun der Abteilung für Bauteilqualität, die im Supply Chain Management der AVL angesiedelt ist, vorgestellt. Im ersten Schritt ist es nun nötig, dass das Konzept 1 schnell umgesetzt wird, denn dies ist mit keiner Lieferantensuche bzw. Investitionsaufwand verbunden und bietet rasch eine Prozessverbesserung.

Als nächstes ist für die vorgeschlagene 3D-Formerfassung mittels Lichtschnittverfahren ein Sourcingprozess aufzusetzen, in denen die Anbieter solcher Lösungen technisch und kommerziell zu bewerten sind. Die in der Arbeit definierten Anforderungen an den Prozess sind in das Lastenheft mit aufzunehmen. Nach Angebotsbewertung und Budgetfreigabe soll rasch mit der Umsetzung begonnen werden, um die zukünftigen Projekte mit dem neuen Prozess abwickeln zu können.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (15)

- Arndt, Holger (2008): *Supply Chain Management - Optimierung logistischer Prozesse*, 4. Auflage, Gabler, Wiesbaden
- Becker, Torsten (2018): *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*, 3. Auflage, Springer Vieweg, Berlin
- Beyerer, Jürgen; Puente León, Fernando; Frese, Christian (2016): *Automatische Sichtprüfung - Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*, 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin
- Dorn, Roland; Schwartz, Reiner; Steurich, Bjoern (2013): *Batteriemanagementsystem*, in: Korthauser, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 177-187
- Ecker, Madeleine (2015): *Lithium-Ionen-Batterien*, in: Tschöke, Helmut (Hrsg.): *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs*, 1. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden, S. 60-68
- Favre-Bulle, Bernard (2004): *Automatisierung komplexer Industrieprozesse*, 1. Auflage, Springer Verlag, Wien
- Hartnig, Christoph; Schmidt, Michael (2013): *Elektrolyte und Leitsalze*, in: Korthauser, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 61-77
- Heidepriem, Jürgen (2000): *Prozessinformatik 1, Grundzüge der Informatik*, 1. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag, München
- Heinzelmann, Michael (2014): *Grundbegriffe und Kraftgruppen*, in: Skolaut, Werner (Hrsg.): *Maschinenbau*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 19-57
- Hering, Ekbert; Jürgen, Triemel; Blank, Hans-Peter (2003): *Qualitätsmanagement für Ingenieure*, 5. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg
- Janek, Jürgen; Adelheim, Philipp (2013): *Zukunftstechnologien*, in: Korthauser, Rainer (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 199-217
- Karle, Anton (2015): *Elektromobilität: Grundlagen und Praxis*, 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München
- Keferstein, Claus; Marxer, Michael; Bach, Carlo (2018): *Fertigungsmesstechnik - Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik*, 9. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Kostka, Claudia; Kostka, Sebastian (2017): *Der kontinuierliche Verbesserungsprozess*, 7. Auflage, Carl Hanser Verlag, München
- Kurzweil, Peter; Dietlmeier, Otto (2018): *Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden

- Lamp, Peter (2013): *Anforderung an Batterien für die Elektromobilität*, in: Korthauer, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 393-415
- Lauber, Rudolf; Peter, Göhner (1999): *Prozessautomatisierung 1*, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg
- Lerch, Reinhard (2016): *Elektrische Messtechnik - Analoge, digitale und computergestützte Verfahren*, 7. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg
- Leuthner, Stefan (2013): *Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien*, in: Korthauer, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 13-19
- Liebethuth, Thomas (2016): *Prozessmanagement in Einkauf und Logistik*, 1. Auflage, Springer Gabler, Wiesbaden
- Möller, Kai-Christian (2013): *Übersicht über die Speichersysteme/Batteriesysteme*, in: Korthauer, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 3-12
- Pettinger, Karl-Heinz (2013): *Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen*, in: Korthauer, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 221-235
- Schönsleben, Paul (2016): *Integrales Logistikmanagement - Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*, 7. Auflage, Springer Vieweg, Berlin
- Schuth, Michael; Buerakov, Wassili (2017): *Handbuch Optische Messtechnik*, 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München
- Vogt, Michael (2013): *Funktionale Sicherheit von Fahrzeugen*, in: Korthauer, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 307-320
- Weckenmann, Albert; Gawande, Bernd (2012): *Einführung*, in: Weckenmann, Albert (Hrsg.): *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, S. 1-23
- Wöhrle, Thomas (2013): *Lithium-Ionen-Zelle*, in: Korthauer, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 107-117

Online-Quellen (16)

- Automation Technology GmbH (n. a.): *Optimale Auslegung von 3D Lasertriangulation*
<https://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/at/AU/AUTOMATION-TECHNOLOGY-DE-Optimale-Auslegung-von-3D-Lasertriangulation.pdf> [Stand: 28.November.2018]
- Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (n. a.): *Kollaborierende Roboter (COBOTS)*
<https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/kollaborierende-roboter/index.jsp> [Stand: 24.November.2018]
- JUGARD+KÜNSTNER GmbH (n. a.): *UR5e Technische Daten*
https://www.jugard-kuenstner.de/fileadmin/daten/Downloads/Datenblaetter_UR_und_Zubehoer/UR3_UR5_UR10/UR5/ur5_e_serie.pdf [Stand: 24.November.2018]

Mitutoyo (n.a.): *Digital Messuhr ID-S*

[https://shop.mitutoyo.de/web/mitutoyo/de/mitutoyo/01.04.01A/Digital%20Messuhr%20ID-S/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/543-790B/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.de/web/mitutoyo/de/mitutoyo/01.04.01A/Digital%20Messuhr%20ID-S/$catalogue/mitutoyoData/PR/543-790B/index.xhtml) [Stand: 24.November.2018]

Mitutoyo (n. a.): *Fußschalter*

[https://shop.mitutoyo.de/web/mitutoyo/de/mitutoyo/01.04.01A/Fu%C3%9Fschalter/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/937179T/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.de/web/mitutoyo/de/mitutoyo/01.04.01A/Fu%C3%9Fschalter/$catalogue/mitutoyoData/PR/937179T/index.xhtml) [Stand: 24.November.2018]

CADFEM GmbH (2016): *Statisch bestimmt*

http://www.cae-wiki.info/wikiplus/index.php/Statisch_bestimmt [Stand: 21.Januar.2019]

Beyerer, J.; Kammel, S.; Krahe, D.; Pérard, D.; Puente León, F.; vom Stein, D.; Ziegler, J. (n. a.): *Vermessung von Werkstücken mit Methoden der automatischen Sichtprüfung und Bildverarbeitung*

http://www.mrt.kit.edu/download/C_Bildverarbeitung.pdf [Stand: 27.Oktober.2018]

Bottke, Patrick (2013): *TU Graz: Skriptum zum Laborversuch "Lithium-Ionen-Batterien"*

https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/ICTM/education/downloads/Skript_Lithium-Ionen-Batterien.pdf [Stand: 8.September.2018]

Endres, Alexandra (2017): *Elektromobilität: Industrie warnt vor Rohstoffknappheit*

<https://www.zeit.de/wirtschaft/2017-11/elektromobilitaet-elektroauto-rohstoffe-knappheit-lithium> [Stand: 10.September.2018]

Gallasch, Andreas (n. a.): *Firmen - Optische Koordinatenmessgeräte*

<https://messraum.net/firmen/kmg-optisch.shtml> [Stand: 13.November.2018]

Möllring, Lara (2018): *Abbe'sches Komparatorprinzip*

<https://messpanda.de/strecken/abweichungen-strecken/abbesches-komparatorprinzip/> [Stand: 11.November.2018]

Rahimzei, Ehsan; Sann, Kerstin; Vogel, Moritz (2015): *Kompendium Li-Ionen-Batterien*

<https://www.dke.de/resource/blob/933404/fa7a24099c84ef613d8e7afd2c860a39/kompendium-li-ionen-batterien-data.pdf> [Stand: 21.Juli.2018]

Schlick, Thomas; Hertel, Guido; Hagemann, Bernhard; Maiser, Eric; Kramer, Michael (2011): *Der VDMA: Publikationen*

http://www.vdma.org/documents/105628/213471/DT_2_01_11_005_Komplett-04.pdf/3769fdb2-0c88-4619-8cad-81faa8f57fea [Stand: 22.Juli.2018]

Sorge, Nils-Viktor (2014): *Tesla baut seine Autos künftig ohne die legendären Laptop-Batterien*

<http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/tesla-stellt-in-gigafactory-nicht-batteriezellen-vom-typ-18650-her-a-998973.html> [Stand: 24.November.2018]

Walter, Christoph (2014): *Grundlagen der industriellen Bildverarbeitung und deren Anwendungsgebiete*

ftp://ftp.ni.com/pub/branches/germany/2014/events/nidays/at/bilderfassung-und-versuchssteuerung/01_walter_christoph.pdf [Stand: 27.November.2018]

Zausch, Jochen (n. a.): *Volumenänderung und Phasenseparation in Elektrodenmaterialien*
<https://www.itwm.fraunhofer.de/de/abteilungen/sms/elektrochemie-und-batterien/Volumenaenderung-Phasenseparation-Elektrodenmaterialien.html> [Stand: 4.November.2018]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Grundbild der Automatisierungstechnik, Quelle: Heidepriem (2000), S. 5 (leicht modifiziert).	2
Abbildung 2: Offline-Einsatz eines Rechners, Quelle: Lauber/Peter (1999) S. 18 (leicht modifiziert).	3
Abbildung 3: Online/open loop-Betrieb eines Rechnersystems, Quelle: Lauber/Peter (1999) S. 19 (leicht modifiziert).	4
Abbildung 4: Online/closed loop-Betrieb eines Rechnersystems, Quelle: Lauber/Peter (1999) S. 21 (leicht modifiziert).	5
Abbildung 5: Aufbau Lithium-Ionen-Batterie, Quelle: Karle (2015) S. 77.	8
Abbildung 6: Automotive-Batterien - Aufbau und Komponenten, Quelle: Schlick/Hertel/Hagemann/Maiser/Kramer (2011), Online-Quelle [22.Juli.2018], S. 16 (leicht modifiziert).	9
Abbildung 7: Verschiedene Zelltypen und Anwendungsmöglichkeiten, Quelle: Wöhrle (2013) S. 112.	10
Abbildung 8: Zylindrischer Wickel, Quelle: Wöhrle (2013) S. 114 (leicht modifiziert).	11
Abbildung 9: Prismatischer Flachwickel, Quelle: Wöhrle (2013) S. 114 (leicht modifiziert).	11
Abbildung 10: Stapeltechnologie bei Pouch-Zellen, Quelle: Wöhrle (2013) S. 114 (leicht modifiziert).	12
Abbildung 11: Potentiale und spezifische Kapazitäten verschiedener positiver und negativer aktiven Materialien für Lithium-Ionen-Zellen, Quelle: Wöhrle (2013) S. 110.	13
Abbildung 12: Übersicht der Elektrodenpotentiale verschiedener Aktivmaterialien (orange = negative Elektrode, dunkelgrau = positive Elektrode), Quelle: Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018], S. 12.	14
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Zyklenlebensdauer bei Beschränkung von SOC und DOD bis zur Restkapazität von 70 %, Quelle: Rahimzei/Sann/Vogel (2015), Online-Quelle [21.Juli.2018] S. 15.	16
Abbildung 14: Einflussfaktoren Thermal Runaway einer Lithium-Ionen-Zelle, Quelle: Vogt (2013) S. 315 (leicht modifiziert).	17
Abbildung 15: Supply Chain Management als Netzwerk, Quelle: Arndt (2008) S. 47 (leicht modifiziert).	20
Abbildung 16: Prozessdefinition, Quelle: Becker (2018) S. 8.	21
Abbildung 17: Die vier Ebenen der Prozessoptimierung, Quelle: Becker (2018) S.18.	22
Abbildung 18: Generischer hierarchischer Aufbau eines industriellen Automationssystems, Quelle: Favre-Bulle (2004) S. 18.	23
Abbildung 19: Ablauf Prozess-Reengineering, Quelle: Becker (2018) S. 27.	24
Abbildung 20: PDCA-Verbesserungszyklus, Quelle: Kostka/Kostka (2017) S. 7.	26
Abbildung 21: Übersicht Prinzipien und Konzepte Prozessverbesserungen, Quelle: Liebethuth (2016) S. 97 (leicht modifiziert).	27

Abbildung 22: Rundzelle mit DataMatrix-Code, Quelle: Eigene Darstellung.	29
Abbildung 23: Messung des Durchmessers mittels Lehre, Quelle: Eigene Darstellung.	29
Abbildung 24: Digitale Messuhr zum Messen der Zelllänge, Quelle: Eigene Darstellung.	30
Abbildung 25: Präzisionswaage zur Gewichtsmessung der Batteriezelle, Quelle: Eigene Darstellung. ...	30
Abbildung 26: Manuelle Kontaktanlage, Quelle: Eigene Darstellung.	31
Abbildung 27: Screenshot AVL Polarity Tester - Ampelsystem Statusanzeige, Quelle: AVL-interne Dokumentation.	32
Abbildung 28: Prozessflussdiagramm des aktuellen Prozesses bei Rundzellen, Quelle: Eigene Darstellung.	35
Abbildung 29: Internationale SI-Basiseinheiten, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 24.	42
Abbildung 30: Bezeichnung für Zehnerpotenzen, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 24.	43
Abbildung 31: Beispiele für statisch bestimmt und statisch überbestimmte Träger, Quelle: S. 31 (leicht modifiziert).	44
Abbildung 32: Freiheitsgrade von Körpern, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 25.	44
Abbildung 33: Messabweichung gemäß Abbeschem Grundprinzip, Bsp. Messschieber (links: keine Abweichung, rechts: Abweichung durch Schiefstellung), Quelle: Möllring (2018), Online-Quelle [11.November.2018].	45
Abbildung 34: Zusammenhang von Spezifikationsgrenze und Messunsicherheit, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 33.	46
Abbildung 35: Prinzipieller Aufbau eines konventionellen kartesischen Koordinatenmessgerätes in der Bauweise mit beweglichem Portal, Quelle: Weckenmann/Gawande (2012) S. 14.	47
Abbildung 36: Vergleich verschiedener Bauarten von KMG hinsichtlich der Messabweichungen, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 72.	48
Abbildung 37: Aufbau eines berührenden Messkopfsystems, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 74.	48
Abbildung 38: Schaltende (a) und messende (b) Messkopfsysteme, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 76.	49
Abbildung 39: Prinzip der passiven (a) und der aktiven (b) Triangulation, Quelle: Weckenmann/Gawande (2012) S. 216 (leicht modifiziert).	51
Abbildung 40: Multisensor-Messung mit a) gleichen und b) unterschiedlichen Sensoren, Quelle: Weckenmann/Gawande (2012) S. 18.	52
Abbildung 41: Ordnungssystem für Gestaltabweichung an Werkstücken, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 95 (leicht modifiziert).	53
Abbildung 42: Übersicht über Form- und Lagetoleranzen, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 97.	53

Abbildung 43: Verfahren zur Bestimmung von Mittelpunkt und Durchmesser von Kreisen, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 99.	54
Abbildung 44: Rundheitsmessung, 1-Punkt-Messung zwischen Spitzen, Fourieranalyse, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 105.	55
Abbildung 45: Rundheitsmessgeräte, Bauformen, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 107.	55
Abbildung 46: Vorgehensmodell automatisierte Sichtprüfung, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 174.	57
Abbildung 47: Schema automatisierte Sichtprüfung, Quelle: Beyerer/Puente León/Frese (2016) S. 9. ...	58
Abbildung 48: Unterschiedliche Beleuchtungsarten: Durchlicht (a), Hellfeld (b), Dunkelfeld (c), Quelle: Walter (2014), Online-Quelle [27.November.2018] S. 16-18 (leicht modifiziert).	60
Abbildung 49: Prinzip der telezentrischen Abbildung, Quelle: Beyerer/Puente León/Frese (2016) S. 154.	60
Abbildung 50: Lasertriangulation, Aufbau und Messprinzip, Quelle: Keferstein/Marxer/Bach (2018) S. 217.	61
Abbildung 51: Prinzip Lichtschnittverfahren, Quelle: Schuth/Buerakov (2017) S. 11.	62
Abbildung 52: Ergebnis der Vernetzung einer Punktwolke, Quelle: Schuth/Buerakov (2017) S. 13.	63
Abbildung 53: Prozessflussdiagramm Konzeptvorschlag 1, Quelle: Eigene Darstellung.	65
Abbildung 54: Skizze Messvorrichtung Zellspannung, Quelle: Eigene Darstellung.	66
Abbildung 55: Möglicher Messaufbau zu Konzept 1, Quelle: Eigene Darstellung.	67
Abbildung 56: Skizze Messvorrichtung taktile Längen- und Durchmesser messung, Quelle: Eigene Darstellung.	67
Abbildung 57: Prozessflussdiagramm Konzept 2, Quelle: Eigene Darstellung.	68
Abbildung 58: Möglicher Messaufbau zu Konzept 2, Quelle: Eigene Darstellung.	69
Abbildung 59: Prozessflussdiagramm Konzept 3, Quelle: Eigene Darstellung.	70
Abbildung 60: Möglicher Messaufbau zu Konzept 3, Quelle: Eigene Darstellung (Quelle Abbildung Lichtschnittverfahren: Automation Technology GmbH (n. a.), Online-Quelle [28.November.2018] S. 7. ...	71
Abbildung 61: Komponenten Testaufbau: (a) Messuhr Mitutoyo, Quelle: Mitutoyo (n.a.), Online-Quelle [24.November.2018] ., (b) zugehöriger Fußschalter, Quelle: Mitutoyo (n. a.), Online-Quelle [24.November.2018].	72
Abbildung 62: Cobot UR5e des Herstellers Universal Robots, Quelle: JUGARD+KÜNSTNER GmbH (n. a.), Online-Quelle [24.November.2018] S. 1.	73

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Auszug Excel-Tabelle "Zellvermessung", Quelle: Eigene Darstellung.....	32
Tabelle 2: Übersicht optische Messverfahren, Quelle: Gallasch (n. a.), Online-Quelle [13.November.2018].	50
Tabelle 3: Technische Daten gängiger Kameras für die automatische Sichtprüfung, Quelle: Beyerer/Puente León/Frese (2016) S. 265 (leicht modifiziert).	59
Tabelle 4: Automatisierte Längenerfassung mit bedingter Formatierung in Excel, Quelle: Eigene Darstellung.	72
Tabelle 5: Quantifizierung, Quelle: Eigene Darstellung.	75
Tabelle 6: Ergebnisse der Konzeptbewertung, Quelle: Eigene Darstellung.	75

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
BOL	Begin of Life
BPR	Business Process Reengineering
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DOD	Depth of Discharge
EOL	End of Life
HMI	Human-Machine-Interface
KMG	Koordinatenmessgerät
KMT	Koordinatenmesstechnik
KVP	kontinuierlicher Verbesserungsprozess
OCR	Optical Character Recognition
OEM	Original Equipment Manufacturer
PC	Personal Computer
PDCA	Plan Do Check Act
PTE	Powertrain Engineering
QR	Quick Response
SCM	Supply Chain Management
SI	Le Système International d'Unités
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
SOC	State of Charge
USB	Universal Serial Bus