



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Selman Samed Derin - 
Kerim Altiparmak - 

Trendanalyse der historischen Entwicklung von elektrischen Energiespeichern für die E- Mobilität zur Extrapolation ihrer Leistungsfähigkeit in die Zukunft

Selman Samed Derin & Kerim Altiparmak

**Trendanalyse der historischen Entwicklung von
elektrischen Energiespeichern für die E-Mobilität zur
Extrapolation ihrer Leistungsfähigkeit in die Zukunft**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen des Masterstudiums

im Studiengang M.Sc. Fahrzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Alexander Frenkel
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Alejandro Soler

Abgabedatum: 12.01.2025

Zusammenfassung

Selman Derin, Kerim Altiparmak

Thema der Masterthesis

Trendanalyse der historischen Entwicklung von elektrischen Energiespeichern für die E-Mobilität zur Extrapolation ihrer Leistungsfähigkeit in die Zukunft

Stichworte

Elektrofahrzeug, Traktionsbatterie, Energiespeicher, Extrapolation, Trendanalyse, Leistungsparameter, Regressionsanalyse

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, welche historischen Entwicklungen und langfristigen Trends sich aus der Leistungsfähigkeit von elektrischen Energiespeichern erkennen lassen und inwieweit diese Trends für zukünftige Extrapolationen genutzt werden können. Mit dem Ziel die Erkenntnisse zu dieser Fragestellung herauszukristallisieren, wird anhand einer systematischen Literaturrecherche eine Datenbasis geschaffen. Diese Daten werden zur Trendanalyse genutzt und auf Eignung zur Extrapolation geprüft. Aus den Erkenntnissen der Trendanalyse lassen sich Probleme identifizieren, welche beschrieben werden. Für die Probleme lassen sich mögliche Lösungen herleiten. Die Arbeit kommt zu dem Ergebnis, dass die Untersuchung Unterschiede in den Ergebnissen aufweist, die auf die begrenzte Datenbasis und die heterogene Auswahl der Daten aus verschiedenen Quellen zurückzuführen sind. Diese Einschränkungen wirken sich maßgeblich auf die Eignung der ermittelten Trends für eine zuverlässige Extrapolation aus.

Selman Derin, Kerim Altiparmak

Title of the paper

Trend analysis of the historical development of electrical energy storage systems for e-mobility to extrapolate their performance into the future

Keywords

Electric vehicle, traction battery, energy storage, extrapolation, trend analysis, performance parameters, regression analysis

Abstract

This study explores the question of which historical developments and long-term trends can be identified from the performance of electrical energy storage systems and to what extent these trends can be utilized for future extrapolations. To address this question, a systematic literature review is conducted to establish a data foundation. These data are used for trend analysis and assessed for their suitability for extrapolation. The insights gained from the trend analysis help identify existing challenges, which are subsequently described. Potential solutions for these challenges are also proposed. The study concludes that the analysis reveals differences in the results, which are attributable to the limited data foundation and the heterogeneous selection of data from various sources. These limitations significantly impact the suitability of the identified trends for reliable extrapolation.

Vorwort

Im Rahmen des Masterstudiengangs Fahrzeugtechnik soll die Leistung einer Masterarbeit erbracht werden. Hierbei sollen die Studierenden zur selbständigen Bearbeitung einer konstruktiven, experimentellen oder theoretischen Arbeit aus dem gewählten Studienfach angeleitet werden. Dieses soll in einer schriftlichen Ausarbeitung festgehalten werden. Die Arbeit folgt der Richtlinie des Departments Fahrzeug- und Flugzeugbau zur Erstellung von Abschlussarbeit.

Die Thematik der Masterarbeit wurde in Absprache mit den betreuenden Professoren festgelegt. Die Themenauswahl hatte einen großen Einfluss auf die Motivation während der Bearbeitung der Aufgabenstellung und führte zu einer großen Arbeitsbereitschaft und Neugier.

An dieser Stelle möchten wir uns an erster Linie bei unseren Dozenten, Prof. Dr.-Ing. Alexander Frenkel und Dipl.-Ing. Alejandro Soler, bedanken. Während der Bearbeitungszeit war die Kommunikation und Erreichbarkeit stets gegeben, was für uns nicht nur eine Erleichterung, sondern eine große fachliche Hilfe darstellte. Bei Fragen und Anregungen wurde uns immer geholfen, wofür wir uns bedanken wollen.

Nicht zuletzt bedanken wir uns beide bei unseren Familien die uns während des Studiums tatkräftig unterstützt und motiviert haben.

Aufgabenstellung der Masterarbeit

Student: Selman Samed Derin – [REDACTED]
Kerim Altiparmak – [REDACTED]

Titel: Trendanalyse der historischen Entwicklung von elektrischen Energiespeichern für die E-Mobilität zur Extrapolation ihrer Leistungsfähigkeit in die Zukunft

Kurzbeschreibung:

Elektrische Energiespeicher sind eine Schlüsselkomponente für die technologische Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft. Ihr ökonomischer Einsatz in E-Fahrzeugen ist in diesem Zusammenhang unabdingbar für die Senkung des CO₂-Ausstoßes des Verkehrssektors. Dabei galt der Einsatz von Batterien in E-Fahrzeugen lange Zeit als unpraktikabel, da davon ausgegangen wurde, dass Sie zu schwer sind, die Energiedichte zu gering für lange Fahrtstrecken ist und die Ladezeit zu hoch ist. Vor diesem Hintergrund wurde mit der Entwicklung von E-Fahrzeugen für den Massenmarkt durch die etablierten Fahrzeugbauer in Deutschland erst spät begonnen. Die technologische Entwicklung elektrischer Energiespeicher hat in den letzten Jahren größere Fortschritte gemacht, als es erwartet worden ist. Die hohe Dynamik der Technologieentwicklung macht es dabei für die Industrie schwierig, langfristige Investitionen und strategische Entscheidungen auf eine solide Informationsbasis zu stellen. Ein marktreifer Akkumulator ist ein Akkumulator, der in einem industriellen Maßstab hergestellt und eingesetzt wird. Dies impliziert, dass die jeweilige Technologie bzw. das Produkt zur Zeit des Markteintritts ein konkurrenzfähiges Preis/Leistungs-Verhältnis bietet und dass die Technologie allen zur Zeit des Markteintritts geltenden gesetzlichen Auflagen (zum Beispiel Sicherheit, Umweltschutz) genügt.

Die Bearbeitung der Masterarbeit erfolgt in Zusammenarbeit mit:

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Alexander Frenkel
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Alejandro Soler

Inhalt

1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
1.3 Problemstellung und Zielsetzung	3
2 Technische Grundlagen	5
2.1 Stand der Technik	5
2.2 Klassifizierung der elektrischen Energiespeicher	7
2.2.1 Bleiakku	7
2.2.2 Nickel-Cadmium-Akku	10
2.2.3 Nickel-Metallhydrid-Akku	11
2.2.4 Lithium-Ionen-Akku	13
2.2.4.1 Lithium-Cobaltdioxid-Akku	13
2.2.4.2 Lithium-Eisenphosphat-Akku	15
2.2.4.3 Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku	16
2.2.4.4 Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku	17
3 Methodische Grundlagen	19
3.1 Technologielebenszyklus	19
3.2 Grundlagen und Vorgehensweisen bei Trend-Extrapolation	20
3.2.1 Mooresches Gesetz	21
3.2.2 Erfahrungskurve	22
3.2.3 Carlson's Curve	23
3.2.4 Bell's Law	24
3.2.5 Anwendung auf Akkutechnologien	25
3.3 Vorgehensweise zur Analyse auf Eignung der Extrapolation	26
3.3.1 Regressionsanalyse	26
3.3.2 Bestimmtheitsmaß R^2	27
3.3.3 Grenzverlauf	29
3.3.4 Systematisches Bewertungsschema zur Trendextrapolation	30
3.4 Vorgehensweise zur Datenakquise	33
3.4.1 Systematische Literaturrecherche	33
3.4.2 Vorgehensweise bei der Literaturrecherche	33
3.4.3 Definierung des Untersuchungsrahmens	35

4 Datenrecherche und -erhebung zu marktreifen Speichertechnologien	40
4.1 Akkumulatoren bis 1960	40
4.1.1 Bleiakku	40
4.2 Akkumulatoren bis 1970	42
4.2.1 Bleiakku	42
4.2.2 Nickel-Cadmium-Akku.....	43
4.3 Akkumulatoren bis 1980	44
4.3.1 Bleiakku	44
4.3.2 Nickel-Cadmium-Akku.....	45
4.4 Akkumulatoren bis 1990	46
4.4.1 Bleiakku	47
4.4.2 Nickel-Cadmium-Akku.....	48
4.4.3 Nickel-Metallhydrid-Akku.....	48
4.5 Akkumulatoren bis 2000	50
4.5.1 Bleiakku	50
4.5.2 Nickel-Cadmium-Akku.....	52
4.5.3 Nickel-Metallhydrid-Akku.....	53
4.5.4 Lithium-Cobaltdioxid-Akku.....	55
4.5.5 Lithium-Eisenphosphat-Akku.....	56
4.5.6 Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid-Akku	57
4.6 Akkumulatoren bis 2010	57
4.6.1 Bleiakku	58
4.6.2 Nickel-Cadmium-Akku.....	59
4.6.3 Nickel-Metallhydrid-Akku.....	61
4.6.4 Lithium-Cobaltdioxid-Akku.....	62
4.6.5 Lithium-Eisenphosphat-Akku.....	63
4.6.6 Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku	65
4.6.7 Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid-Akku	66
4.7 Akkumulatoren bis 2024	67
4.7.1 Bleiakku	67
4.7.2 Nickel-Cadmium-Akku.....	69
4.7.3 Nickel-Metallhydrid-Akku.....	70
4.7.4 Lithium-Cobaltdioxid-Akku.....	72
4.7.5 Lithium-Eisenphosphat-Akku.....	73
4.7.6 Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku	75
4.7.7 Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku.....	77

5	Trendanalyse der marktreifen Speichertechnologien	79
5.1	Identifikation erkennbarer Trends	79
5.1.1	Trends der Markteintritte	79
5.1.2	Trends der gravimetrischen Energiedichten	81
5.1.3	Trends der volumetrischen Energiedichten	90
5.1.4	Trends der Batteriekosten	96
5.1.5	Trends der Anzahl der Ladezyklen.....	103
5.1.6	Trends der Ladegeschwindigkeit.....	109
5.1.7	Trends der Marktkapazität.....	111
5.1.8	Trends der Lebensdauer	113
5.2	Analyse auf Eignung von Extrapolation.....	115
5.2.1	Eignung der Extrapolation der Markteintritte	115
5.2.2	Eignung der Extrapolation der gravimetrischen Energiedichte	116
5.2.3	Eignung der Extrapolation der volumetrischen Energiedichte.....	121
5.2.4	Eignung der Extrapolation der Batteriekosten	127
5.2.5	Eignung der Extrapolation der Anzahl an Ladezyklen	133
5.2.6	Eignung der Extrapolation der Ladegeschwindigkeit	138
5.2.7	Eignung der Extrapolation der Marktkapazität	139
5.2.8	Eignung der Extrapolation der Lebensdauer	140
5.3	Auswertung der Trendanalyse	142
6	Schlussfolgerung aus der Trendanalyse	144
6.1	Identifikation und Lösungsansätze der potenziellen Herausforderungen aus der Trendanalyse.....	144
6.1.1	Datenbezogene Herausforderungen	144
6.1.2	Methodenbezogene Herausforderungen	148
6.2	Parallelen zu bestehenden Trendgesetzen.....	151
7	Fazit & Ausblick	152
	Literaturverzeichnis	155
	Anhänge.....	169
	Anhang A – Eingabe des ersten Suchstrings in Google Scholar	169
	Anhang B – Ergebnisse der Eingabe des ersten Suchstrings in Google Scholar	169
	Anhang C – Eingabe des ersten Suchstrings in Scopus.....	170
	Anhang D - Ergebnisse der Eingabe des ersten Suchstrings in Scopus.....	170
	Anhang E – Ergebnisse der Suche für die metrischen Einheiten bis 1960	171
	Anhang F – Ergebnisse der Suche für die metrischen Einheiten bis 1970	171
	Anhang G – Beispielrechnung für die lineare Regressionsanalyse	172

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ANZAHL DER ELEKTROAUTOS WELTWEIT VON 2013 BIS 2023 [EZSW 2024]	4
ABBILDUNG 2: AUFBAU DES BLEIAKKUS [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN GREIF 2023]	9
ABBILDUNG 3: AUFBAU DES NiCd-AKKUS [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN GREIF 2023]	11
ABBILDUNG 4: AUFBAU DES NiMH -AKKUS [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN GREIF 2023]	12
ABBILDUNG 5: AUFBAU DER LI-ION-AKKUS [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN GREIF 2023]	14
ABBILDUNG 6: AUFBAU DES LFP-AKKUS [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN GREIF 2023]	16
ABBILDUNG 7: AUFBAU DES NMC-AKKUS [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN GREIF 2023]	17
ABBILDUNG 8: AUFBAU DES NCA-AKKUS [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN GREIF 2023]	18
ABBILDUNG 9: TECHNOLOGIE-S-KURVE [GOCHERMANN 2020 NACH FOSTER 1986]	20
ABBILDUNG 10: ANZAHL DER TRANSISTOREN PRO MIKROPROZESSOR IN LOGARITHMISCHER DARSTELLUNG [WINKELHAKE 2024]	21
ABBILDUNG 11: ERFAHRUNGSKURVE [STILLER O.J.]	22
ABBILDUNG 12: CARLSON'S CURVE [DEGNARAIN 2018]	23
ABBILDUNG 13: ENTWICKLUNG UND EINFÜHRUNG VON AKKUTECHNOLOGIEN IN ELEKTROFAHRZEUGEN	80
ABBILDUNG 14: ENTWICKLUNG DER GRAV. ENERGIEDICHTE - BLEIAKKU	82
ABBILDUNG 15: ENTWICKLUNG DER GRAV. ENERGIEDICHTE – NICKEL-CADMIUM-AKKU	83
ABBILDUNG 16: ENTWICKLUNG DER GRAV. ENERGIEDICHTE – NICKEL-METALLHYDRID-AKKU	84
ABBILDUNG 17: ENTWICKLUNG DER GRAV. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKU	85
ABBILDUNG 18: ENTWICKLUNG DER GRAV. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-EISENPHOSPHAT-AKKU	86
ABBILDUNG 19: ENTWICKLUNG DER GRAV. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-NICKEL-MANGAN-COBALT-AKKU	87
ABBILDUNG 20: ENTWICKLUNG DER GRAV. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-NICKEL-COBALT-ALUMINIUM-OXID-AKKU	88
ABBILDUNG 21: ENTWICKLUNG DER GRAV. ENERGIEDICHTE – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	90
ABBILDUNG 22: ENTWICKLUNG DER VOL. ENERGIEDICHTE – BLEIAKKU	91
ABBILDUNG 23: ENTWICKLUNG DER VOL. ENERGIEDICHTE – NICKEL-CADMIUM-AKKU	91
ABBILDUNG 24: ENTWICKLUNG DER VOL. ENERGIEDICHTE – NICKEL-METALLHYDRID-AKKU	92
ABBILDUNG 25: ENTWICKLUNG DER VOL. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKU	93
ABBILDUNG 26: ENTWICKLUNG DER VOL. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-EISENPHOSPHAT-AKKU	93
ABBILDUNG 27: ENTWICKLUNG DER VOL. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-NICKEL-MANGAN-COBALT-AKKU	94
ABBILDUNG 28: ENTWICKLUNG DER VOL. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-NICKEL-COBALT-ALUMINIUM-OXID-AKKU	95
ABBILDUNG 29: ENTWICKLUNG DER VOL. ENERGIEDICHTE – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	96
ABBILDUNG 30: ENTWICKLUNG DER BATTERIEKOSTEN – BLEIAKKU	97
ABBILDUNG 31: ENTWICKLUNG DER BATTERIEKOSTEN – NICKEL-CADMIUM-AKKU	98
ABBILDUNG 32: ENTWICKLUNG DER BATTERIEKOSTEN – NICKEL-METALLHYDRID-AKKU	98
ABBILDUNG 33: ENTWICKLUNG DER BATTERIEKOSTEN – LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKU	99
ABBILDUNG 34: ENTWICKLUNG DER BATTERIEKOSTEN – LITHIUM-EISENPHOSPHAT-AKKU	100
ABBILDUNG 35: ENTWICKLUNG DER BATTERIEKOSTEN – LITHIUM-NICKEL-MANGAN-COBALT-AKKU	100
ABBILDUNG 36: ENTWICKLUNG DER BATTERIEKOSTEN – LITHIUM-NICKEL-COBALT-ALUMINIUM-OXID-AKKU	101
ABBILDUNG 37: ENTWICKLUNG DER BATTERIEKOSTEN – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	102
ABBILDUNG 38: ENTWICKLUNG DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – BLEIAKKU	103
ABBILDUNG 39: ENTWICKLUNG DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – NICKEL-CADMIUM-AKKU	104
ABBILDUNG 40: ENTWICKLUNG DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – NICKEL-METALLHYDRID-AKKU	104
ABBILDUNG 41: ENTWICKLUNG DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKU	105
ABBILDUNG 42: ENTWICKLUNG DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – LITHIUM-EISENPHOSPHAT-AKKU	106
ABBILDUNG 43: ENTWICKLUNG DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – LITHIUM-NICKEL-MANGAN-COBALT-AKKU	106
ABBILDUNG 44: ENTWICKLUNG DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – LITHIUM-NICKEL-COBALT-ALUMINIUM-OXID-AKKU	107
ABBILDUNG 45: ENTWICKLUNG DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	108
ABBILDUNG 46: ENTWICKLUNG DER LADEGESCHWINDIGKEIT – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	110
ABBILDUNG 47: ENTWICKLUNG DER NACHFRAGE – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG [THIELMANN ET AL. 2017]	112
ABBILDUNG 48: ENTWICKLUNG DER LEBENSDAUER – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	114
ABBILDUNG 49: VERTEILUNG DER ERGEBNISSE	143
ABBILDUNG 50: VERGLEICH DER UNTERSCHIEDLICHEN FUNKTIONSTYPEN DER REGRESSIONSANALYSE	149
ABBILDUNG 51: LINEARE REGRESSIONSANALYSE EINER GERADEN ZUR ERMITTLUNG DES BESTIMMTHEITSMAß	151

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: BEWERTUNGSMATRIX DES BESTIMMTHEITSMASß R^2	30
TABELLE 2: GEWICHTETE BEWERTUNGSMATRIX	32
TABELLE 3: PUNKTESYSTEM ZUR GESAMTBEWERTUNG AUF TRENDEXTRAPOLATION	32
TABELLE 4: FORMULIERTE SUCHSTRINGS AM BEISPIEL GOOGLE SCHOLAR	34
TABELLE 5: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES BLEIAKKUS BIS 1970	43
TABELLE 6: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NICKEL-CADMIUM-AKKUS BIS 1970	44
TABELLE 7: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES BLEIAKKUS BIS 1980	45
TABELLE 8: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NICKEL-CADMIUM-AKKUS BIS 1980	46
TABELLE 9: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES BLEIAKKUS BIS 1990	47
TABELLE 10: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NICKEL-CADMIUM-AKKUS BIS 1990	48
TABELLE 11: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NICKEL-METALLHYDRID-AKKUS BIS 1990	49
TABELLE 12: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES BLEIAKKUS BIS 2000	51
TABELLE 13: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NICKEL-CADMIUM-AKKUS BIS 2000	53
TABELLE 14: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NICKEL-METALLHYDRID-AKKUS BIS 2000	54
TABELLE 15: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKUS BIS 2000	56
TABELLE 16: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES BLEIAKKUS BIS 2010	59
TABELLE 17: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NICKEL-CADMIUM-AKKUS BIS 2010	60
TABELLE 18: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NICKEL-METALLHYDRID-AKKUS BIS 2010	62
TABELLE 19: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKU BIS 2010	63
TABELLE 20: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES LFP-AKKUS BIS 2010	64
TABELLE 21: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NMC-AKKUS BIS 2010	65
TABELLE 22: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NCA-AKKUS BIS 2010	66
TABELLE 23: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES BLEIAKKUS BIS 2024	68
TABELLE 24: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NICKEL-CADMIUM-AKKUS BIS 2024	70
TABELLE 25: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NICKEL-METALLHYDRID-AKKUS BIS 2024	71
TABELLE 26: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKUS BIS 2024	73
TABELLE 27: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES LFP-AKKUS BIS 2024	75
TABELLE 28: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NMC-AKKUS BIS 2024	77
TABELLE 29: ÜBERSICHT DER PARAMETER DES NCA-AKKUS BIS 2024	78
TABELLE 30: BEWERTUNGSMATRIX DER GRAV. ENERGIEDICHTE – BLEIAKKU	116
TABELLE 31: BEWERTUNGSMATRIX DER GRAV. ENERGIEDICHTE – NICKEL-CADMIUM-AKKU	117
TABELLE 32: BEWERTUNGSMATRIX DER GRAV. ENERGIEDICHTE – NICKEL-METALLHYDRID-AKKU	118
TABELLE 33: BEWERTUNGSMATRIX DER GRAV. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKU	118
TABELLE 34: BEWERTUNGSMATRIX DER GRAV. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-EISENPHOSPHAT-AKKU	119
TABELLE 35: BEWERTUNGSMATRIX DER GRAV. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-NICKEL-MANGAN-COBALT-AKKU	119
TABELLE 36: BEWERTUNGSMATRIX DER GRAV. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-NICKEL-MANGAN-COBALT-AKKU	120
TABELLE 37: BEWERTUNGSMATRIX DER GRAV. ENERGIEDICHTE – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	121
TABELLE 38: BEWERTUNGSMATRIX DER VOL. ENERGIEDICHTE – BLEIAKKU	122
TABELLE 39: BEWERTUNGSMATRIX DER VOL. ENERGIEDICHTE – NICKEL-CADMIUM-AKKU	122
TABELLE 40: BEWERTUNGSMATRIX DER VOL. ENERGIEDICHTE – NICKEL-METALLHYDRID-AKKU	123
TABELLE 41: BEWERTUNGSMATRIX DER VOL. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKU	123
TABELLE 42: BEWERTUNGSMATRIX DER VOL. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-EISENPHOSPHAT-AKKU	124
TABELLE 43: BEWERTUNGSMATRIX DER VOL. ENERGIEDICHTE – LITHIUM-NICKEL-MANGAN-COBALT-AKKU	125
TABELLE 44: BEWERTUNGSMATRIX DER VOL. ENERGIEDICHTE – NICKEL-COBALT-ALUMINIUM-OXID-AKKU	126
TABELLE 45: BEWERTUNGSMATRIX DER VOL. ENERGIEDICHTE – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	127
TABELLE 46: BEWERTUNGSMATRIX DER BATTERIEKOSTEN – BLEIAKKU	127
TABELLE 47: BEWERTUNGSMATRIX DER BATTERIEKOSTEN – NICKEL-CADMIUM-AKKU	128
TABELLE 48: BEWERTUNGSMATRIX DER BATTERIEKOSTEN – NICKEL-METALLHYDRID-AKKU	129
TABELLE 49: BEWERTUNGSMATRIX DER BATTERIEKOSTEN – LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKU	130
TABELLE 50: BEWERTUNGSMATRIX DER BATTERIEKOSTEN – LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKU	130
TABELLE 51: BEWERTUNGSMATRIX DER BATTERIEKOSTEN – LITHIUM-NICKEL-MANGAN-COBALT-AKKU	131
TABELLE 52: BEWERTUNGSMATRIX DER BATTERIEKOSTEN – LITHIUM-MANGAN-COBALT-ALUMINIUM-OXID-AKKU	132
TABELLE 53: BEWERTUNGSMATRIX DER BATTERIEKOSTEN – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	132
TABELLE 54: BEWERTUNGSMATRIX DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – BLEIAKKU	133
TABELLE 55: BEWERTUNGSMATRIX DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – NICKEL-CADMIUM-AKKU	134
TABELLE 56: BEWERTUNGSMATRIX DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – NICKEL-METALLHYDRID-AKKU	134

TABELLE 57: BEWERTUNGSMATRIX DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – LITHIUM-COBALTDIOXID-AKKU	135
TABELLE 58: BEWERTUNGSMATRIX DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – LITHIUM-EISENPHOSPHAT-AKKU	136
TABELLE 59: BEWERTUNGSMATRIX DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – LITHIUM-NICKEL-MANGAN-COBALT-AKKU	136
TABELLE 60: BEWERTUNGSMATRIX DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – NCA-AKKU	137
TABELLE 61: BEWERTUNGSMATRIX DER ANZAHL DER LADEZYKLEN – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	138
TABELLE 62: BEWERTUNGSMATRIX DER LADEGESCHWINDIGKEIT – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	139
TABELLE 63: BEWERTUNGSMATRIX DER LEBENSDAUER – GANZHEITLICHE BETRACHTUNG	141
TABELLE 64: GANZHEITLICHE BETRACHTUNG DER ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSMATRIZEN	142
TABELLE 65: AUFLISTUNG DER BESTIMMTHEITSMASSE R^2 DER UNTERSCHIEDLICHEN FUNKTIONSTYPEN	150

Glossar

C-Rate	Nach Müller 2024 ist „[...] die C-Rate [...] ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung von Batterien, insbesondere im Bereich der Elektromobilität. Sie gibt Aufschluss darüber, wie schnell eine Batterie ge- oder entladen werden kann und ist somit entscheidend für Ladezeiten, Leistungsfähigkeit und Lebensdauer.“
Depth of Discharge	Stippe 2024 definiert die Entladetiefe (DoD) als den Prozentsatz der Energie, der aus einem Energiespeicher, wie etwa einer Batterie, im Verhältnis zu dessen Gesamtkapazität entnommen wird. Ein hoher DoD-Wert zeigt an, dass ein großer Anteil der gespeicherten Energie genutzt wurde, wohingegen ein niedriger DoD-Wert darauf hinweist, dass nur ein geringer Teil der Energie entnommen wurde.
DNA-Sequenzierung	Die DNA-Sequenzierung, so Högemann o.J. , ist ein molekularbiologisches Analyseverfahren, das darauf abzielt, die Nukleotidabfolge der DNA zu bestimmen und somit die Erbinformation (Genom oder Gene) eines Organismus zu entschlüsseln.
DNA-Synthese	Hohentanner et al. o.J. beschreibt die DNA-Synthese als einen Prozess, bei dem eine neue DNA-Doppelstrang-Kopie basierend auf einem bestehenden DNA-Strang erzeugt wird. Dieser Prozess, der eine zentrale Funktion bei der Zellteilung einnimmt, erfordert spezifische enzymatische Aktivitäten.

Grav. Energiedichte	Gravimetrische (Grav.) Energiedichte gibt nach Sterner 2017 an, wie viel Energie pro Masse eines Energiespeichers gespeichert werden kann. Sie wird in Wattstunden pro Kilogramm (Wh/kg) gemessen und ist ein wichtiger Faktor für mobile Anwendungen wie Elektrofahrzeuge und tragbare Geräte, da sie die Reichweite und Effizienz bei geringem Gewicht beeinflusst.
Interkalation	Laut Antwerpes o.J. beschreibt die Interkalation die reversible Einlagerung von Atomen, Ionen oder Molekülen in die Zwischenräume eines Wirtsgitters, ohne die Grundstruktur des Wirtsmaterials wesentlich zu verändern.
Mainframe	Susnjara 2024 beschreibt Mainframes als Datenserver, die konzipiert sind, um täglich bis zu einer Billion Web-Transaktionen mit höchster Sicherheit und Zuverlässigkeit zu bewältigen.
Memory-Effekt	Nach Winter 2004 ein Phänomen in bestimmten Batterietypen (z.B. NiCd-Akku), bei dem die Batterie scheinbar Kapazität verliert, wenn sie nicht vollständig entladen wird.
Synproportionierung	Nach Dücker o.J. ist die Synproportionierung (auch Komproportionierung genannt) eine chemische Redoxreaktion, bei der zwei Verbindungen, die dasselbe Element in unterschiedlichen Oxidationsstufen enthalten, zu einer Verbindung reagieren, in der das Element eine mittlere Oxidationsstufe besitzt.
Traktionsbatterie	Simon o.J. beschreibt die Traktionsbatterie als einen elektrochemischen Energiespeicher, der auch als Antriebs- oder Zyklenbatterie bezeichnet wird. Dieser wiederaufladbare Akkumulator besteht typischerweise aus mehreren verbundenen Akkumulatorzellen und dient als Energiequelle für den Antrieb von Elektrofahrzeugen.

Variabilität

Nach **Grellmann 2023** beschreibt die Variabilität in der Statistik die Streuung oder Spannweite der Werte eines Datensatzes. Sie zeigt, wie stark die einzelnen Werte voneinander abweichen und in welchem Umfang sie sich vom Mittelwert unterscheiden.

Vol. Energiedichte

Gemäß **Sternner 2017** beschreibt die volumetrische (vol.) Energiedichte (in kWh/m³), wie viel Energie pro Volumen gespeichert werden kann. Sie ist besonders relevant für Batterien und gibt an, wie kompakt ein Energiespeicher ist.

Abkürzungsverzeichnis

Ah	Amperestunde
Akku	Akkumulator
Cd	Cadmium
CO₂	Kohlendioxid
DoD	Depth of Discharge
EUCAR	European Council for Automotive R&D
EV	Elektric Vehicle
Grav	gravimetrisch
GWh	Gigawattstunden
Kg	Kilogramm
KOH	Kaliumhydroxid
kWh	Kilowattstunde
L	Liter
lb	Pfund
LCO	Lithium-Cobaltdioxid
LFP	Lithium-Eisenphosphat
Li-Ion	Lithium-Ionen
LiFePO₄	Lithium-Eisenphosphat
LiPF₆	Lithiumhexafluorophosphat
LMO	Lithium-Mangandioxid
LTO	Lithium-Titanium-Oxide
NCA	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt
OEM	Original Equipment Manufacturer

Pb	Blei
PbO₂	Bleioxid
PbSO₄	Bleisulfat
PC	Personal Computer
R²	Bestimmtheitsmaß
SBA	Battery Association of Japan (BAJ)
SLR	Systematische Literaturrecherche / Systematic Literature Review
SSR	Residualstreuung (residual sum of Squares)
SST	Gesamtstreuung (total sum of squares)
TLA	Technologie-Lebenszyklus-Analyse
USABC	The United States Council for Automotive Research
Vol.	volumetrisch
VRLA	Valve-Regulated Lead-Acid
Wh	Wattstunde
ZEBRA	Zero Emissions Battery Research Activities

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Der Marktanteil von Kraftfahrzeugen mit Elektromotor hat in den vergangenen Jahrzehnten rasant zugenommen. Die ersten Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb wurden nach **Burton 2013** im 19. Jahrhundert entwickelt. Diese erfuhren jedoch kein ausreichendes Interesse aufgrund der Batterietechnologie. Um Elektrofahrzeuge erfolgreich einzuführen, war eine erhebliche Verbesserung der Batterietechnologie erforderlich, da diese zuvor als zu schwer galten. Zudem hatten diese eine zu geringe Energiedichte und zu hohe Ladezeiten. Verbrennungsmotoren weisen diese Probleme in Bezug auf ihre Marktfähigkeit nicht auf und sind deshalb die am meisten verbreitete Antriebstechnologie. Durch den Versuch den CO₂-Ausstoß im Straßenverkehr zu senken und durch die gleichzeitige Weiterentwicklung der elektrischen Energiespeicher, erfuhr die Elektromobilität in der Welt große Aufmerksamkeit.

Insbesondere haben die Lithium-Ionen-Akkus (Li-Ion) aufgrund ihrer hohen Energiedichte, geringeren Kosten und schnelleren Ladezeiten eine Revolution eingeleitet. In diesem Rahmen konnte die Reichweite und Nutzbarkeit deutlich verbessert werden. Neben der Batterietechnologie der Li-Ion-Akkus gibt es auch andere Technologien an denen geforscht wird. **Yada 2014** hebt die Feststoffbatterie, die eine noch höhere Energiedichte und damit eine höhere Reichweite ermöglichen soll, hervor. Die hohe Dynamik der Technologieentwicklung stellt die Industrie jedoch vor große Herausforderungen. Langfristige Investitionen und strategische Entscheidungen müssen getroffen werden, während sich die technologische und marktwirtschaftliche Landschaft volatil verhält. Unternehmen müssen abwägen, in welche Technologien und Produktionskapazitäten sie investieren sollen, um wettbewerbsfähig zu bleiben und zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden. Zudem beeinflussen regulatorische Unsicherheiten und sich ändernde Umweltvorschriften die Planungen. Strengere Emissionsvorschriften und staatliche Förderprogramme für Elektrofahrzeuge können einerseits Investitionsanreize bieten, andererseits jedoch auch zusätzliche Anforderungen und Risiken mit sich bringen. Insgesamt bleibt die Weiterentwicklung und Optimierung elektrischer Energiespeicher von zentraler Bedeutung, um die Mobilitätswende hin zu einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Wirtschaft erfolgreich zu gestalten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert. Im **Kapitel 1.3** wird die Problemstellung und die Zielsetzung beschrieben. Anschließend werden im **Kapitel 2** technische Grundlagen der Akkutechnologien erklärt. Dabei wird im **Kapitel 2.1** der Stand der Technik dargelegt. Die für die Arbeit relevanten Akkutechnologien werden im **Kapitel 2.1** klassifiziert und in die Funktionsweise in den **Unterkapiteln 2.2.1 – 2.2.4** erklärt. Innerhalb des **Unterkapitels 2.2.4** findet eine weitere Differenzierung in diesem Unterkapitel behandelten Akkutechnologie statt. Das **Kapitel 3** bezieht sich auf die Methodiken, die in dieser Arbeit angewendet werden. Hierbei wird erstmal in **Kapitel 3.1** der Technologielebenszyklen dargelegt. Anschließend werden im **Kapitel 3.2** die Grundlagen und die Vorgehensweise der Industrie zur Trendextrapolation beschrieben, welche sich in den **Kapiteln 3.2.1 – 3.2.4** in verschiedene Vorgehensweisen unterteilen lassen. Das **Kapitel 3.2.5** beschreibt, wie die genannten Trendextrapolationen auf die Akkutechnologien angewendet werden können. Im **Kapitel 3.3** wird die Vorgehensweise zur Analyse auf Eignung der Extrapolation dargestellt und wird in den **Unterkapiteln 3.3.1 – 3.3.4** in die verschiedenen Bewertungsverfahren unterteilt. Das Kapitel 3.4 behandelt die Vorgehensweise der Datenakquise und gibt in den **Unterkapiteln 3.4.1 – 3.4.3** einen tieferen Einblick. Die Ergebnisse der Datenrecherche werden im **Kapitel 4** dargestellt. Dabei wird in den **Kapitel 4.1 – 4.7** in den Jahren unterteilt und in den Unterkapiteln darin, nach Akkutechnologien differenziert. In den **Kapiteln 4.1 – 4.7** erfolgt eine Unterteilung nach Jahren, wobei die jeweiligen sich darunter befindenden Unterkapitel eine Differenzierung nach Akkutechnologien vornehmen. Die Trendanalyse wird im **Kapitel 5** durchgeführt. Das **Kapitel 5.1** behandelt die Beschreibung der Trends der behandelten Parameter und das **Kapitel 5.2** beinhaltet die anschließende Analyse auf Eignung einer Extrapolation. In **Kapitel 5.3** werden die Ergebnisse aus der Trendanalyse ausgewertet. Die Schlussfolgerung der Arbeit wird im **Kapitel 6** aufgefasst. Hierbei wird in **Kapitel 6.1** die Identifikation und die Lösungsansätze der potenziellen Herausforderungen aus der Trendanalyse behandelt, die in **Kapitel 6.1.1 – 6.1.2** in unterschiedliche Arten differenziert werden. Das **Kapitel 6.2** beschreibt parallelen zu den bestehenden Trendgesetzen. In **Kapitel 7** wird zum Abschluss ein Fazit gezogen und die Arbeit mit einem Ausblick beendet. Anschließend folgen das **Literaturverzeichnis** und der **Anhang**.

1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Die dynamische Entwicklung der Batterietechnologien und die damit verbundenen Fortschritte stellen sowohl Chancen als auch Herausforderungen für die Automobilindustrie dar. Trotz erheblicher Verbesserungen der Energiedichte, den Kosten und den Ladezeiten von Lithium-Ionen-Batterien bleibt unklar, wie sich diese Technologien in der Zukunft weiterentwickeln werden, weitgehend unbeantwortet. **Heidelberger 2021** berichtet, dass durch die Unvorhersehbarkeit technologischer Durchbrüche und Marktentwicklungen den Unternehmen erschwert wird, fundierte strategische Entscheidungen zu treffen. Zudem existieren Unsicherheiten hinsichtlich der langfristigen Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit der für die Batterien benötigten Rohstoffe.

Ein weiteres Problem ist die Integration neuer Batterietechnologien in bestehende Produktionsprozesse und Fahrzeugplattformen. Unternehmen müssen erhebliche Investitionen tätigen, um ihre Produktionskapazitäten und -prozesse an die neuen Technologien anzupassen. Dies erfordert laut **Kevlishvili et al. 2019** sowohl finanzielle Ressourcen als auch technisches Know-how und flexible Anpassungsstrategien. Die fehlende Standardisierung der Zellformate und Batteriearchitekturen stellen zusätzliche Herausforderungen dar und können zu Ineffizienzen und erhöhten Kosten führen. Zudem können die regulatorischen Rahmenbedingungen und die politischen Entscheidungen auf nationaler und internationaler Ebene ebenfalls eine entscheidende Rolle in der Weiterentwicklung von Energiespeichersystemen darstellen.

Ein Blick auf die weltweite Anzahl der Elektrofahrzeuge in **Abbildung 1** verdeutlicht die rasante Entwicklung und die zunehmende Bedeutung der Elektromobilität. Die Zahl der Elektroautos ist zwischen den Jahren 2013 und 2023 von 431.050 auf über knapp 42 Millionen gestiegen. Dies unterstreicht die wachsende Nachfrage nach effizienten und nachhaltigen Energiespeichern.

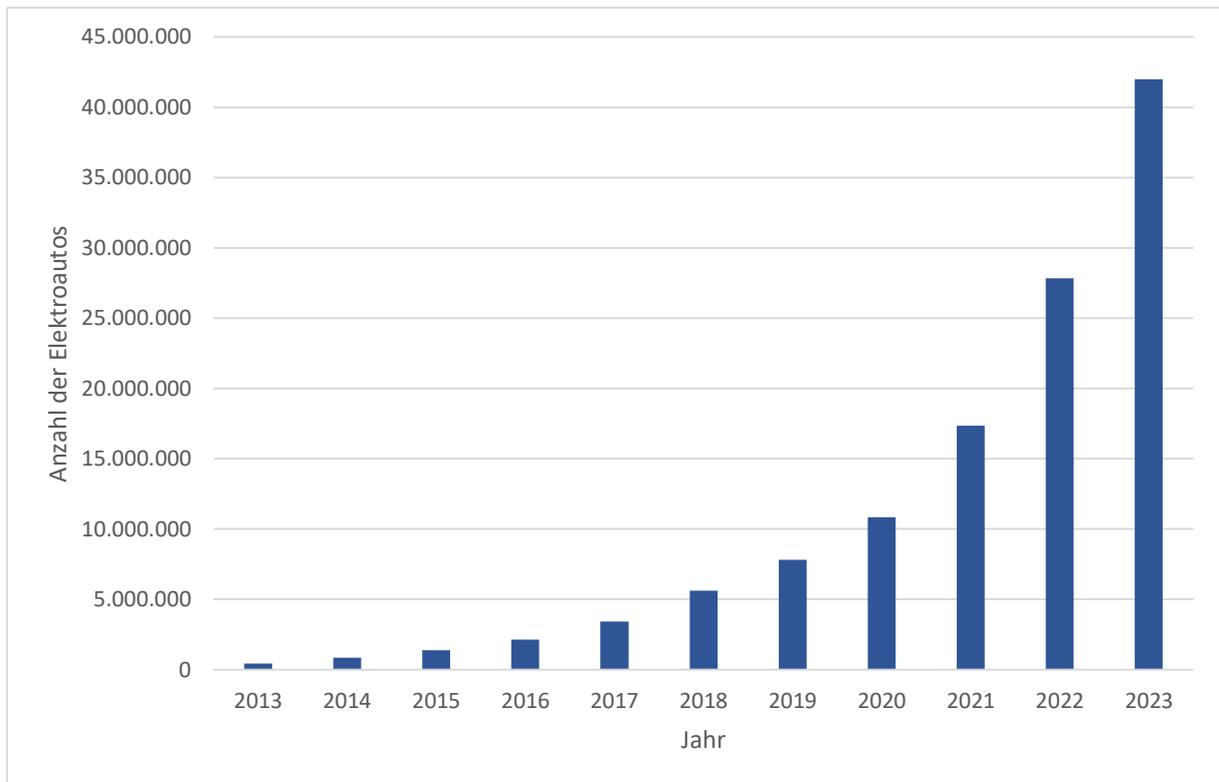


Abbildung 1: Anzahl der Elektroautos weltweit von 2013 bis 2023 [EZSW 2024]

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die historischen, langfristigen Trends in der technischen Entwicklung der Leistungsfähigkeit von Batterien zu untersuchen und daraus zu bewerten, ob sich erkennbare Trends ableiten lassen, die eine Extrapolation für die Zukunft ermöglichen. Diese Untersuchung soll einen Beitrag dazu leisten, die oben genannten Probleme zu adressieren, indem sie eine fundierte Grundlage für strategische Entscheidungen in der Automobilindustrie liefert. Diese Ziele sollen durch die Beantwortung der zentralen Forschungsfrage erreicht werden:

Welche historischen Entwicklungen und langfristigen Trends lassen sich in der technischen Leistungsfähigkeit von elektrischen Energiespeichern erkennen und inwieweit können diese Trends für zukünftige Extrapolationen genutzt werden?

Durch diese umfassende Analyse soll ein besseres Verständnis der Entwicklungspfade von Batterietechnologien gewonnen werden, wodurch Unternehmen befähigt werden sollen, fundierte Investitionsentscheidungen zu treffen und ihre strategischen Planungen entsprechend anzupassen.

2 Technische Grundlagen

2.1 Stand der Technik

Die historische Entwicklung der Batterietechnologien im Automobilsektor ist von fortlaufender Innovation und technologischem Fortschritt geprägt. Durch das hohe Interesse an Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebsstrang besteht ein ständiger Wettbewerb. Die Batterieeinheit ist die zentrale Komponente für die Leistung und Reichweite eines Elektrofahrzeugs, aus diesem Grund gibt es einen hohen Forschungsbedarf in der Weiterentwicklung der Batterietechnologien. Durch die Innovation und kontinuierliche Forschung wird angestrebt die Nachteile eines Elektrofahrzeugs zu einem verbrennungsmotorisierten Fahrzeug auszugleichen beziehungsweise zu minimieren. Nach **Sanguesa et al. 2021** ist die Automobilindustrie einer der wichtigsten Industriezweige weltweit, sowohl auf wirtschaftlicher Ebene als auch im Hinblick auf Forschung und Entwicklung. Die Forschung konzentriert sich nicht nur auf die Weiterentwicklung der vorhandenen Batterietechnologien, sondern vor allem auf die Entwicklung neuer, vielversprechender Technologien. Die führende Batterietechnologie ist nach **Nasajpour-Esfahani et al. 2024** die Lithium-Ionen-Batterie, bei der in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erreicht werden konnten. Insbesondere konnte hinsichtlich der spezifischen Energiedichte und der Kosten eine bemerkenswerte Verbesserung erreicht werden. Ein bedeutendes Forschungsfeld ist die Batterietechnologie der Festkörperbatterien, welche als Nachfolger der Lithium-Ionen-Batterie denkbar wäre. Diese Technologie verspricht nach **Zheng et al. 2018** eine weitere Zunahme der Energiedichte und der Sicherheit. Die Feststoffbatterien sind derzeit noch nicht marktreif, jedoch wird mit intensiver Forschung daran gearbeitet diese Technologie zur Marktreife zu bringen.

Um die Alltagstauglichkeit von Elektrofahrzeugen zu gewährleisten, bedarf es nicht nur einer hohen Energiedichte der Batterie. Zudem ist die Ladezeit ein ausschlaggebender Faktor. Diese gilt es weitestgehend zu verkürzen. Laut **Backhaus 2023** können die Batterien schneller geladen werden, wenn Silizium-Anoden eingesetzt werden. Im Bereich der Elektromobilität stehen mehrere marktreife elektrische Energiespeichertechnologien zur Verfügung.

Zu diesen Technologien zählt der Bleiakku, die Nickel-Cadmium-Akku (NiCd), die Nickel-Metallhydrid-Akku (NiMH), die Lithium-Cobaltdioxid-Akku (LCO), Lithium-Eisenphosphat-Akku (LFP) der Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku (NMC) und der Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku (NCA). Allerdings werden einige dieser Technologien gegenwärtig nicht mehr für den Einsatz als Traktionsbatterien verwendet.

In der Literatur werden die Begriffe „Batterie“ und „Akku“ häufig synonym verwendet, obwohl sie technisch unterschiedliche Konzepte bezeichnen. Diese Arbeit folgt dieser gängigen Vorgehensweise und nutzt die Begriffe ebenfalls synonym. Technisch gesehen handelt es sich bei einer Batterie in der Regel um ein nicht wiederaufladbares Energiespeichersystem, das nach der Entladung entsorgt wird. Ein Akkumulator hingegen ist eine wiederaufladbare Batterie, die mehrfach verwendet werden kann.

In dieser Arbeit werden die ZEBRA-Batterie (Natrium-Nickelchlorid-Batterie), die Lithium-Titanat-Batterie (LTO) und die Lithium-Manganoxid-Batterie (LMO) nicht weiter behandelt. Diese Technologien spielen im Automobilbau zwar eine Rolle, sind jedoch entweder auf Nischenanwendungen oder kleine Serien beschränkt und konnten sich bisher nicht als Hauptbatterie in großem Maßstab durchsetzen.

Die ZEBRA-Batterie wird, gemäß **Krausa o.J.**, aufgrund ihrer hohen Betriebstemperatur von etwa 270 °C und der damit verbundenen technischen Komplexität nur in wenigen Fahrzeugen eingesetzt, wie dem Think City. Diese Einschränkungen, kombiniert mit hohen Produktionskosten und den Anforderungen an spezielle Isolationssysteme, machen sie für den großflächigen Einsatz unattraktiv. Sie wird eher in Anwendungen mit sehr spezifischen Anforderungen bevorzugt, z. B. in stationären Energiespeichern oder Spezialfahrzeugen.

Die Lithium-Titanat-Batterie bietet laut **Nitta et al. 2015** außergewöhnliche Vorteile, darunter schnelle Ladezeiten und eine sehr hohe Zyklenfestigkeit, wodurch Anwendungen mit hoher Belastung und häufigem Laden besonders profitieren. Allerdings schränkt die niedrige Energiedichte den Einsatz erheblich ein, da die Reichweitenanforderungen moderner Elektrofahrzeuge nicht erfüllt werden. Zudem treten hohe Produktionskosten auf, welche die wirtschaftliche Attraktivität gegenwärtig erheblich beeinträchtigen. Aus diesen Gründen wird die LTO-Technologie meist in hybriden Batteriesystemen oder spezialisierten Fahrzeugen wie Bussen eingesetzt.

Die Lithium-Manganoxid-Batterie war eine der frühesten Varianten der Lithium-Ionen-Technologie und wird weiterhin in Kombination mit anderen Lithium-Ionen-Batterien, wie NMC oder NCA, genutzt. Nach **Camargos et al. 2022** sind die geringe Energiedichte und die begrenzte Lebensdauer jedoch alleinstehend unzureichend, um eine großflächige Nutzung in Elektrofahrzeugen zu ermöglichen. Zudem weisen LMO-Zellen im Vergleich zu anderen Lithium-Ionen-Batterien eine geringere Zyklenstabilität und eine höhere Wärmeentwicklung auf, was ihre Verwendung in anspruchsvollen Anwendungen weiter einschränkt.

Die Tatsache, dass diese Technologien nicht in großem Umfang oder als eigenständige Lösung eingesetzt werden, deutet darauf hin, dass sie derzeit nicht ausreichend marktfähig sind. Weder die elementaren Parameter wie Energiedichte, Zyklenlebensdauer und Kosten noch ihre technischen Eigenschaften ermöglichen es, sie in der Automobilindustrie in großer Serie einzusetzen. Stattdessen finden sie nur begrenzt Verwendung oder werden in Kombination mit anderen Technologien verbaut, um spezifische Vorteile in bestimmten Anwendungen zu nutzen.

2.2 Klassifizierung der elektrischen Energiespeicher

Im folgenden Kapitel wird die Funktionsweise der unterschiedlichen Batterietechnologien detailliert erklärt. Dabei werden die technologischen Grundlagen, Vor- und Nachteile sowie die jeweiligen Einsatzgebiete der Batterietechnologien erläutert. Hierbei werden die für die Elektromobilität relevanten Batterietypen genannt, zu denen der Bleiakku, Nickel-Cadmium-Akku, Nickel-Metallhydrid-Akku und die Lithium-Ionen-Technologien gehören.

2.2.1 Bleiakku

Der Bleiakku ist die erste marktreife und wiederaufladbare Batterie, die im Automobilbau eingesetzt wurde. Heute wird diese Technologie nicht mehr als Hauptbatterie eingesetzt, sondern findet hauptsächlich als Starterbatterie Verwendung.

Chemischer Aufbau der Zellen nach **Sterner 2017**

- Anode bzw. positive Elektrode besteht aus Bleidioxid (PbO_2)
- Kathode bzw. negative Elektrode besteht aus porösem Schwammblei (Pb)
- Elektroden sind in einem Elektrolyten aus verdünnter Schwefelsäure getaucht (H_2SO_4)

Funktionsweise der Batterietechnologie nach **Sterner 2017**

In einem Bleiakku laufen die zentralen chemischen Reaktionen in zwei getrennten Bereichen (Halbzellen) parallel ab. In einer Halbzelle wird Bleioxid reduziert, während in der anderen Halbzelle elementares Blei oxidiert wird. Durch diese Reaktionen entsteht auf beiden Elektroden Bleisulfat ($PbSO_4$). Die Gesamtreaktion in der Batterie ist eine Synproportionierung von Blei in zwei verschiedenen Stufen der Oxidation. Der Aufbau des Bleiakkus wird in der **Abbildung 2** dargestellt.

Nullwertiges Blei und vierwertiges Blei (PbO_2) reagieren zu zweiwertigem Blei ($PbSO_4$). Die Ionen (Pb^{2+} und HSO_4^-) und Elektronen werden durch die Elektrolyte transportiert. Es entsteht ein geschlossener Kreislauf, welcher den Stromfluss ermöglicht. Die chemischen Reaktionen an der Anode (I) und Kathode (II) werden wie folgt dargestellt:



Die Schwefelsäure übernimmt als Elektrolyt zwei Funktionen. Sie leitet die Ionen und beteiligt sich aktiv an den chemischen Reaktionen. Die Konzentration der Schwefelsäure ändert sich mit dem Ladezustand der Batterie. Zur Bestimmung des Ladezustandes wird diese Änderung verwendet.

Die Technologie der Blei-Säure-Batterie wird in den gegenwärtigen Elektrofahrzeugen nicht als Hauptbatterie eingesetzt. Nach **Budde-Meiwes et al. 2013** ist hierfür die niedrige Energiedichte und das hohe Gewicht maßgeblich. Eine Verbesserung der Energiedichte ist aufgrund der theoretischen Beschränkungen zudem nicht möglich. Die Blei-Säure-Batterie wird dennoch in Fahrzeugen eingesetzt, denn Sie zeichnet sich durch ihre niedrigen Materialkosten, hohe Sicherheit und hohe Stromstärke aus.

Die Batterie wird in modernen Elektrofahrzeugen verwendet, um beispielsweise das 12-V-System zu versorgen. Bei einem Unfall wird dadurch die Funktion wichtiger Systeme, wie die Warnblinklichter sichergestellt.

Laut **Jung et al. 2015** gibt es Bleiakkus in verschiedenen Varianten, die je nach Einsatzbereich unterschiedliche Eigenschaften bieten. Die klassische Form sind Nassbatterien (Flooded Lead-Acid Batteries), die mit flüssigem Schwefelsäure-Elektrolyt gefüllt sind. Sie sind robust, kostengünstig und insbesondere in der Automobilindustrie weit verbreitet. Allerdings erfordern sie regelmäßige Wartung, da der Elektrolyt nachgefüllt werden muss. Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batterien sind eine modernere, versiegelte Version, die weniger Wartung benötigen. Es gibt sie in zwei Hauptausführungen. Zum einen gehören hierzu die AGM-Batterien, die ein Glasfaservlies zur Bindung des Elektrolyten verwenden und sich durch eine geringe Selbstentladung sowie Vibrationsfestigkeit auszeichnen. Zum andern gibt es Gel-Batterien, die einen gelierten Elektrolyten enthalten, wodurch sie besser für tiefe Entladungen geeignet sind. AGM-Batterien sind für Notstromsysteme ideal, während Gel-Batterien für Anwendungen wie Solaranlagen bevorzugt werden.

Deep-Cycle-Batterien sind für wiederholte, tiefe Entladungen ausgelegt und werden häufig in Wohnmobilen und Solarsystemen verwendet. Sie haben eine höhere Zyklusfestigkeit, opfern jedoch Spitzenleistung im Vergleich zu Starterbatterien.

Diese Batteriearten unterscheiden sich deutlich in Bezug auf Wartungsanforderungen, Lebensdauer und Kapazitätsverhalten, wodurch sie je nach Anwendungsbedarf spezifische Vorteile bieten. Im chemischen Aufbau unterscheiden diese Batteriearten sich nur in ihrem Elektrolyten.

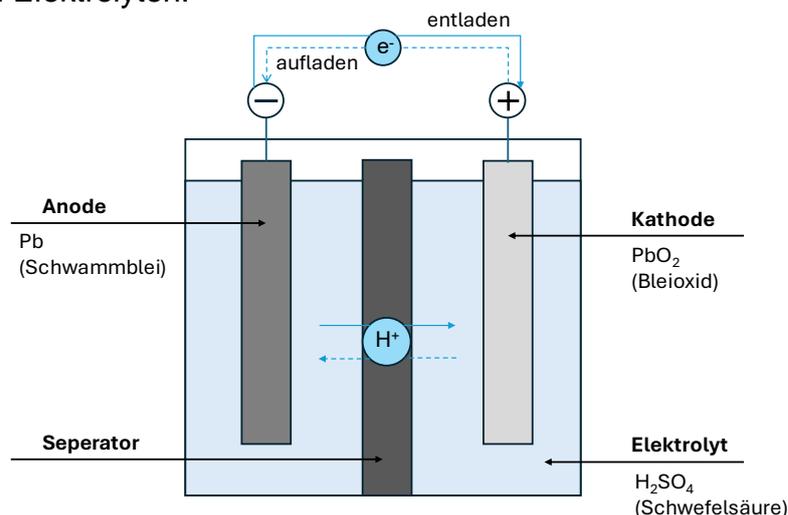


Abbildung 2: Aufbau des Bleiakkus [Eigene Darstellung in Anlehnung an Greif 2023]

2.2.2 Nickel-Cadmium-Akku

Nach **Linden 2002** wird die Nickel-Cadmium-Akku gegenwärtig beispielsweise in Notstromaggregaten und Notleuchten eingesetzt. In diesen Einsatzgebieten spielt die Zuverlässigkeit der Batterie eine ausschlaggebende Rolle. Diese Batterietechnologie wird als sehr robust und langlebig bezeichnet.

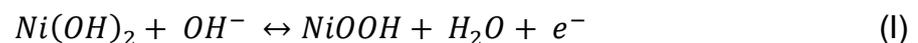
Chemischer Aufbau der Zellen nach **Bernard 2015**

- Anode bzw. negative Elektrode besteht aus Cadmium (*Cd*)
- Kathode bzw. positive Elektrode besteht aus Nickel(III)-oxidhydroxid (*NiO(OH)*)
- Elektroden sind in einem alkalischen Elektrolyten, üblicherweise Kalilauge (*KOH*)

Funktionsweise der Batterietechnologie nach **Bernard 2015**

Die Nickel-Cadmium-Batterie funktioniert auf der Basis von elektrochemischen Reaktionen zwischen Nickelhydroxid (*Ni(OH)₂*) an der positiven Elektrode und Cadmium an der negativen Elektrode, wie sie in der **Abbildung 3** dargestellt sind. Während der Entladung findet eine Oxidation an der negativen Elektrode statt. Hierbei wird das Cadmium zu Cadmiumhydroxid (*Cd(OH)₂*) oxidiert. Die dabei freigesetzten Elektronen wandern durch den äußeren Stromkreis, um die gewünschte elektrische Energie bereitzustellen.

Parallel wird an der positiven Elektrode das Nickel(III)-oxidhydroxid zu Nickel(II)-hydroxid (*Ni(OH)₂*) reduziert, indem es die Elektronen aufnimmt. Dadurch wird die Stromabgabe der Batterie ermöglicht. Die chemischen Reaktionen der Kathode (I) und der Anode (II) werden nachfolgend dargestellt. Diese sind reversible, daher werden Sie im Ladevorgang umgekehrt werden.



Die Nickel-Cadmium-Batterien haben die Fähigkeit, eine Vielzahl von Ladezyklen ohne große Einbuße in der Leistung zu überstehen. Zudem können Sie bei extremen Temperaturen eingesetzt werden, dies erhöht die Eignung für den Einsatz in beispielsweise der Luftfahrt. Ein Nachteil dieser Batterietechnologie ist, dass Sie einen Memory-Effekt hat. Wenn die Batterie wiederholt, nur teilweise entladen wird, kann sie scheinbar einen Teil ihrer Kapazität vernachlässigen. Dieser Effekt führt zu einer Verringerung der Nutzungsdauer.

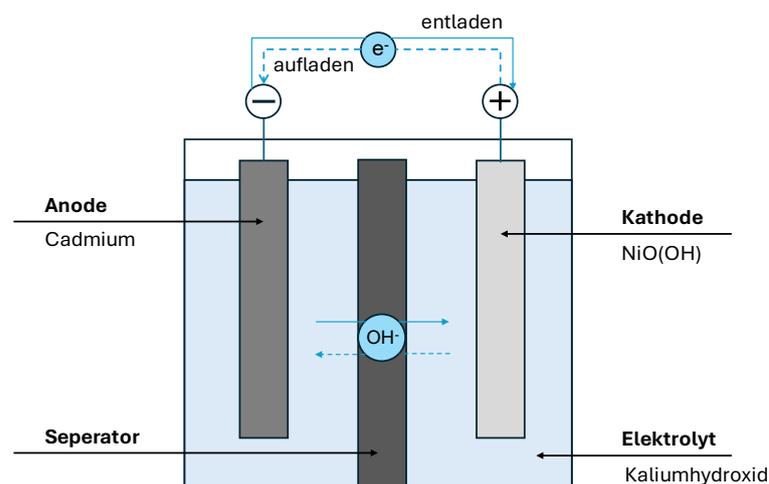


Abbildung 3: Aufbau des NiCd-Akkus [Eigene Darstellung in Anlehnung an Greif 2023]

2.2.3 Nickel-Metallhydrid-Akku

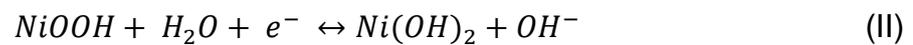
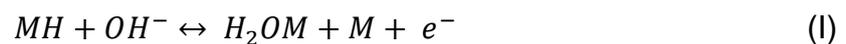
Der Nickel-Metallhydrid-Akku (NiMH-Akku) ist ein häufig genutzter Batterietyp, der sich durch eine gute Balance zwischen Leistung, Energiedichte und Umweltfreundlichkeit auszeichnet. Die Einsatzgebiete sind vielfältig und sind beispielsweise Digitalkameras, Hybridfahrzeuge oder Speicher von Solaranlagen.

Chemischer Aufbau der Zellen nach Kurzweil 2020

- Anode bzw. negative Elektrode besteht aus Metallhydrid (MH)
- Kathode bzw. positive Elektrode besteht aus Nickel(III)-oxidhydroxid (NiO(OH))
- Elektrolyt besteht üblicherweise aus einer wässrigen Kaliumhydroxid-Lösung (KOH)

Funktionsweise der Batterietechnologie nach Kurzweil 2020

Der Lade- und Entladevorgang basiert auf Redoxreaktionen (Reduktion und Oxidation). Bei diesen werden Elektronen übertragen und Energie freigesetzt und gespeichert. An der Anode gibt das Metallhydrid (MH) Elektronen ab und wird zu Metall (M). Parallel reagieren Hydroxid-Ionen (OH^-) mit dem Metallhydrid und bilden Wasser (H_2O). An der Kathode wird Nickel(III)-oxid-hydroxid ($NiO(OH)$) zu Nickel(II)-hydroxid ($Ni(OH)_2$) reduziert, indem es Elektronen von der Anode aufnimmt und Hydroxid-Ionen (OH^-) freisetzt. Der Aufbau wird in der **Abbildung 4** beschrieben. Die chemischen Reaktionen an der Anode (I) und an der Kathode (II) werden wie folgt dargestellt:



Die Nickel-Metallhydrid-Batterie bietet nach **Sauer et al. 2001** folgende Vor- und Nachteile. Zu den Vorteilen zählt unter anderem die längere Lebensdauer und Zyklenzahl, besseres Tieftemperaturverhalten, flachere Entladekurve und die hohe spezifische Energiedichte. Nachteilig an der NiMH-Batterie ist, dass Sie eine hohe Selbstentladung, einen Memory-Effekt und hohe spezifische Kosten hat.

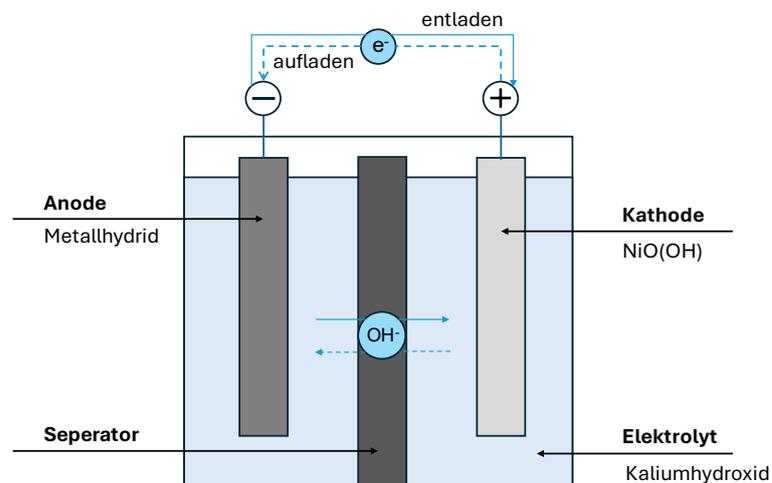


Abbildung 4: Aufbau des NiMH -Akkus [Eigene Darstellung in Anlehnung an Greif 2023]

2.2.4 Lithium-Ionen-Akku

Die Lithium-Batterien sind die derzeit am weit verbreitete Batterietechnologie. Durch die zahlreichen Vorteile des Lithiums in den Batterien, gibt es Weiterentwicklung dieser Batterietechnologie und es werden verschiedene Konstellationen erschaffen. Durch die Nutzung von Lithium als positive Elektrode können nach **Korthauer 2013** die Vorteile einer hohen spezifischen Energie, hohe spezifische Leistung, hoher Wirkungsgrad beim Laden und Entladen und eine geringe Selbstentladung genutzt werden. Lithium-Ionen-Akkumulatoren unterscheiden sich hauptsächlich im Kathodenmaterial, aus diesem Grund lassen sich, wie im Folgenden beschrieben wird, unterschiedliche Variationen dieser Technologie ergeben.

2.2.4.1 Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Die Lithium-Ionen-Technologie begann ihre Erfolgsgeschichte mit Lithium-Cobaltdioxid-Akkumulatoren, die zu den ersten kommerziell erfolgreichen Lithium-Ionen-Batterien zählten. Nach **Korthauer 2013** werden LCO-Akkus in vielen Bereichen eingesetzt, jedoch hat diese Technologie bisher keine signifikante Anwendung im Bereich der Elektrofahrzeuge gefunden. Dieses lag hauptsächlich an den Herausforderungen in Bezug auf Sicherheit, Zyklenfestigkeit und Rohstoffverfügbarkeit.

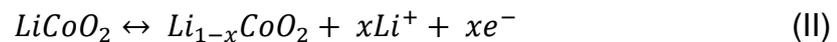
Trotz dieser Einschränkungen wird die LCO-Technologie im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Das Ziel besteht darin, die historischen und technischen Grundlagen der Lithium-Cobaltdioxid-Technologie zu erläutern. Zudem sollen aktuelle Trends im Vergleich zu anderen Technologien analysiert werden. Ein weiterer Schwerpunkt liegt darauf, zu untersuchen, ob technologische Fortschritte oder Marktveränderungen die Eignung von LCO-Akkus für den Automobilsektor verbessern könnten. Die Einbindung dieser Technologie in die Datenrecherche ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung der Entwicklungs-potenziale und marktspezifischen Anforderungen.

Chemischer Aufbau der Zellen nach **Ecker 2013**

- Anode bzw. negative Elektrode üblicherweise aus Graphit
- Kathode bzw. positive Elektrode besteht aus Lithium-Cobaltdioxid
- Elektrolyt besteht aus einem Lithium-leitfähigem Material, z.B. Lithiumsalz

Funktionsweise der Batterietechnologie nach Ecker 2013

Bei der Entladung des Lithium-Cobaltdioxid-Akkus wandern, wie in der **Abbildung 5** dargestellt, die Lithium-Ionen (Li^+) von der Anode zur Kathode durch den Elektrolyten, der oft aus einem Lithiumsalz (bspw. LiPF_6) besteht. Dieses Prinzip nennt sich Interkalation. Durch diese Bewegung wird zwischen der Anode und der Kathode eine Spannung erzeugt, wobei die Elektronen extern durch den Stromkreis fließen und elektrische Energie liefern. Bei Ladung des Batteriesystems läuft die Reaktion umgekehrt ab. Die chemische Reaktion an der Anode (I) und an der Kathode (II) können mit folgenden Reaktionsgleichungen dargestellt werden.



Durch die hohe Energiedichte und Leistungsfähigkeit des Lithium-Cobaltdioxid-Akkus wird die Technologie zur bevorzugten Wahl in Anwendungen, bei denen eine lange Lebensdauer, hohe Lade- und Entladegeschwindigkeiten sowie eine gute Stabilität gefordert sind. Zu den Nachteilen des LCO-Akkus zählen die hohen Produktionskosten, die primär auf den Einsatz kritischer Rohstoffe zurückzuführen sind. Darüber hinaus ist eine mit der Zeit abnehmende Kapazität sowie eine ausgeprägte Temperaturempfindlichkeit zu verzeichnen. Im Allgemeinen haben sich die Lithium-Ionen-Batterie-Technologien durch die positiven Eigenschaften zu Schlüsseltechnologien für moderne Anwendungen entwickelt, insbesondere für die Elektrifizierung von Fahrzeugen und tragbare Elektronik.

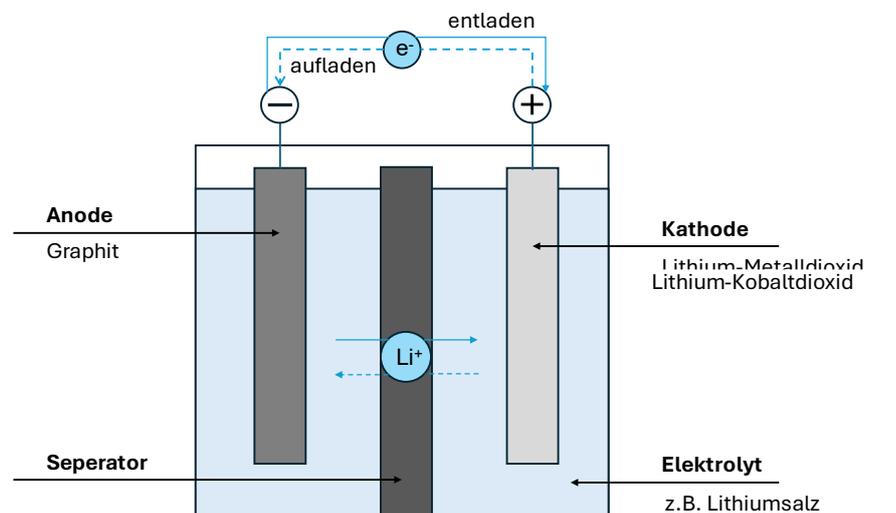


Abbildung 5: Aufbau der Li-Ion-Akkus [Eigene Darstellung in Anlehnung an Greif 2023]

2.2.4.2 Lithium-Eisenphosphat-Akku

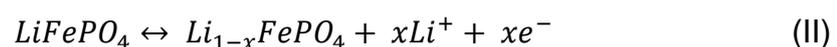
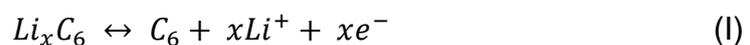
Der Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator, ebenfalls bekannt als LFP-Akku, ist eine spezielle Form von Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Sie unterscheiden sich durch ihr Kathodenmaterial, was zu unterschiedlichen Eigenschaften führt. Nach **Korthauer 2013** wird, durch die Nutzung unterschiedlicher Anodenmaterialien versucht, die Eigenschaften der Lithium-Akkumulatoren zu verbessern.

Chemischer Aufbau der Zellen nach Korthauer 2013

- Anode bzw. negative Elektrode üblicherweise aus Graphit
- Kathode bzw. positive Elektrode besteht aus Lithium-Eisenphosphat (LiFePO_4)
- Elektrolyt besteht aus einem Lithium-leitfähigem Material, beispielsweise Lithiumsalz

Funktionsweise der Batterietechnologie nach Crastan 2018

Der Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LFP) basiert, wie andere Lithium-Ionen-Akkumulatoren auf dem Prinzip der Interkalation von Lithium-Ionen. Lithium-Ionen bewegen sich dabei zwischen der Anode und der Kathode, wie in **Abbildung 6** dargestellt. Diese Bewegung erzeugt eine Spannung zwischen Anode und Kathode. Die Elektronen fließen extern durch den Stromkreis und liefern somit elektrische Energie. Bei Ladung des Batteriesystems läuft die Reaktion umgekehrt ab. Die chemische Reaktion an der Anode (I) und an der Kathode (II) können mit folgenden Reaktionsgleichungen dargestellt werden.



Nach **Ecker 2013** ist der Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator vor allem durch ihre erhöhte Sicherheit im Einsatz von Elektrofahrzeugen eine bevorzugte Option. Die Akkutechnologie weist eine geringere Spannungslage und Energiedichte auf, ist jedoch eine günstige und sichere Technologie.

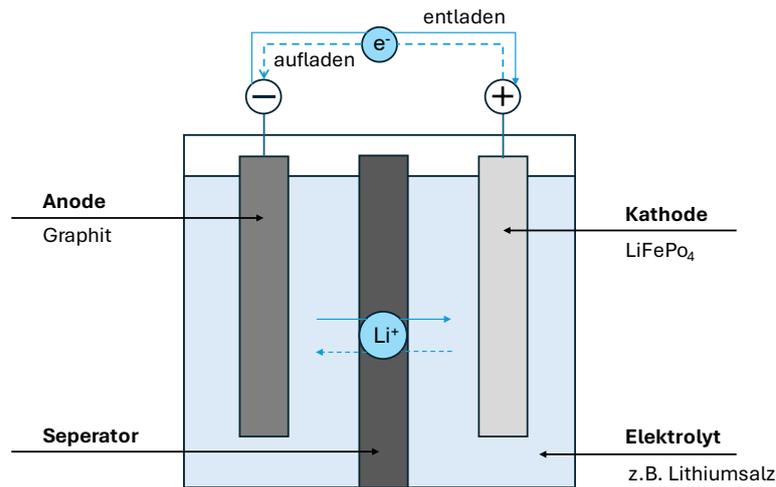


Abbildung 6: Aufbau des LFP-Akkus [Eigene Darstellung in Anlehnung an Greif 2023]

2.2.4.3 Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

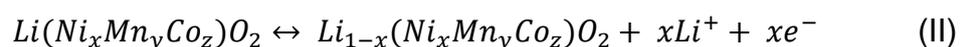
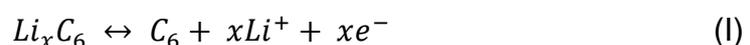
Die Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkumulatoren gehören ebenfalls zu den Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Durch die Abwandlung des Kathodenmaterials können die Eigenschaften des Akkumulators beeinflusst werden. So wird nach **Korthauer 2013** versucht die Lithium-Ionen-Akkumulatoren an die Anforderungen anzupassen.

Chemischer Aufbau der Zellen nach Tran et al. 2021

- Anode bzw. negative Elektrode üblicherweise aus Graphit
- Kathode bzw. positive Elektrode besteht aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt
- Elektrolyt besteht aus einem leitfähigen Material, beispielsweise Lithiumsalz

Funktionsweise der Batterietechnologie nach Tran et al. 2021

Der Lithium-NMC-Akkumulator basiert ebenfalls, wie bei anderen Lithium-Ionen-Batterien auf der Interkalation von Lithium-Ionen zwischen der Anode und der Kathode. Der Aufbau ist in der **Abbildung 7** dargestellt. Die chemischen Reaktionsgleichungen an der Anode (I) und Kathode (II) werden in den folgenden Formeln beschrieben.



Die Vorteile des NMC-Akkumulators sind nach **Tran et al. 2021** eine gute Lebensdauer, eine hohe thermische Stabilität und eine hohe Energiedichte. Zu den Nachteilen dieser Akkutechnologie gehören die hohen Kosten, bedingt durch den Cobaltanteil, die Wärmeempfindlichkeit sowie die aufwendige Fertigung. Die Einsatzgebiete des NMC-Akkus sind vielfältig und streuen sich von Elektronikkleingeräten bis hin zu Elektrofahrzeugen und Energiespeichern.

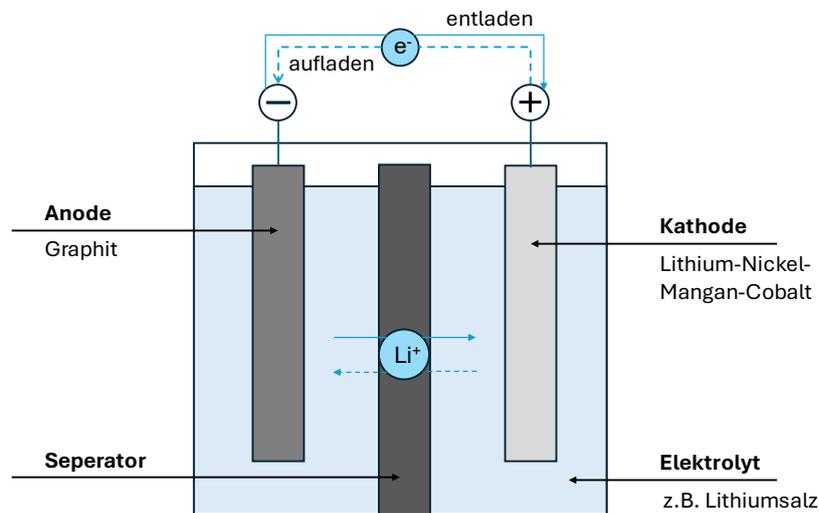


Abbildung 7: Aufbau des NMC-Akkus [Eigene Darstellung in Anlehnung an Greif 2023]

2.2.4.4 Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

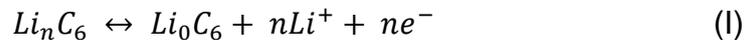
Die Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkumulatoren sind eine spezielle Form der Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Sie unterscheiden sich in ihrem Kathodenmaterial, um damit die Eigenschaften des Akkus zu beeinflussen. Nach **Tran et al. 2021** gibt es viele Gemeinsamkeiten zwischen dem NMC-Akku und dem NCA-Akku. Beide verfügen über eine geschichtete Kathodenstruktur, wobei das Mangan durch Aluminium ersetzt wurde.

Chemischer Aufbau der Zellen nach Tran et al. 2021

- Anode bzw. negative Elektrode üblicherweise aus Graphit
- Kathode bzw. positive Elektrode besteht aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt
- Elektrolyt besteht aus einem Lithium-leitfähigem Material, beispielsweise Lithiumsalz

Funktionsweise der Batterietechnologie nach **Tran et al. 2021**

Der Lithium-NCA-Akkumulator basiert ebenfalls, wie bei anderen Lithium-Ionen-Batterien auf der Interkalation von Lithium-Ionen zwischen der Anode und der Kathode. Eine Darstellung des Aufbaus ist in der **Abbildung 8** ersichtlich. Die chemischen Reaktionsgleichungen an der Anode (I) und Kathode (II) werden in den folgenden Formeln beschrieben.



Laut **Tran et al. 2021** führt der Einsatz von Aluminium als Kathodenmaterial zu einer Verbesserung der spezifischen Energie und der Lebensdauer im Vergleich zum NMC-Akkumulator. Vorteilhaft sind zudem die hohe Energiedichte und Effizienz beim Laden und Entladen. Ein Nachteil der NCA-Akkus ist die geringe Sicherheit, weshalb sie spezielle Überwachungsmaßnahmen erfordern, insbesondere für Anwendungen wie Elektrofahrzeuge. Neben dem Einsatz in Elektrofahrzeugen werden die NCA-Akkus beispielsweise als stationäre Energiespeicher oder in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt.

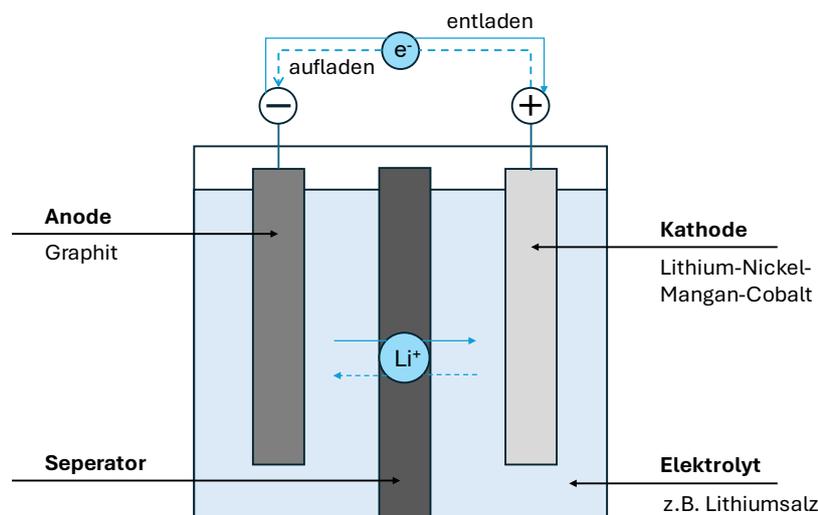


Abbildung 8: Aufbau des NCA-Akkus [Eigene Darstellung in Anlehnung an Greif 2023]

3 Methodische Grundlagen

Im Folgenden werden die methodischen Ansätze dargestellt, die zur Untersuchung und Bewertung der technischen Leistungsfähigkeit von Batterien verwendet werden. Hierbei werden verschiedenen Methoden erläutert, die in der Forschung zur Analyse von Technologieentwicklungen und Trendextrapolation zur Anwendung kommen.

3.1 Technologielebenszyklus

Die Technologieanalyse und -bewertung im Rahmen von Technologie-Lebenszyklus-Analysen ist ein zentraler Bestandteil des Technologiemanagements. Dabei spielt sie eine entscheidende Rolle bei der Identifikation, Bewertung und Nutzung von Technologien.

Nach **Gochermann 2020** ist die Technologieanalyse ein integraler Bestandteil des Innovationsprozesses, der die Planung, Umsetzung und Kontrolle technologischer Entwicklungen unterstützt. Die Analyse technischer Merkmale beinhaltet die Untersuchung der zugrunde liegenden wissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Prinzipien. Sie verfolgt das Ziel, den aktuellen Stand der behandelten Technologie hinsichtlich ihres zukünftigen Potenzials zu bewerten und die Position im Markt zu bestimmen. Diese Analyse ist erforderlich, um strategische Entscheidungen hinsichtlich der Weiterentwicklung oder des Einsatzes von Technologien zu treffen. **Völker 2018** unterteilt Technologien in verschiedene Typen. Die Basistechnologie, Schlüsseltechnologie und Schrittmachertechnologie. Diese Technologien wurden nach **Tiefel 2007** von Arthur D. Little, der ersten Unternehmensberatungsgesellschaft der Welt, im Technologielebenszyklus-Modell in unterschiedliche Phasen unterteilt. Die Basistechnologie, die von allen Wettbewerbern einer Branche beherrscht werden, befindet sich in der Reife- oder Altersphase ihres Lebenszyklus. Schlüsseltechnologien, die einen entscheidenden Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit in der Branche haben, befinden sich in der Wachstumsphase. Schrittmachertechnologien hingegen sind neue, noch in der Entstehungsphase befindliche Technologien, die jedoch bereits das Potenzial erkennen lassen, in Zukunft einen bedeutenden Einfluss auf den Wettbewerb in der Branche auszuüben.

Zur Bewertung und Einordnung von Technologien im Lebenszyklus werden verschiedene Methoden verwendet. Eine weitere anerkannte Methode ist das Konzept der Technologie-S-Kurve, dargestellt in **Abbildung 9**, die den Verlauf der Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit vom Entwicklungsaufwand darstellt. **Sure 2017** differenziert den Verlauf in drei Phasen. Die Entstehungsphase, die Wachstumsphase und die Reife-/Altersphase. Die Technologie steigert sich in der Entstehungsphase nur langsam in ihrer Leistungsfähigkeit, anschließend erfährt Sie ein schnelles Wachstum in der Wachstumsphase. In der Reife-/Altersphase erreicht die Leistung eine Sättigung und weitere Investitionen in die Technologie bringen nur eine geringe Leistungssteigerung.

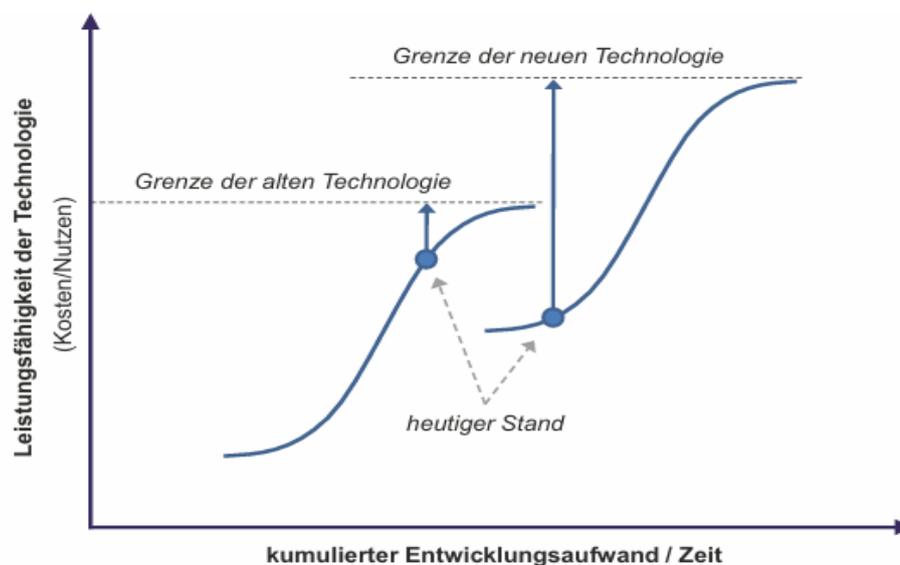


Abbildung 9: Technologie-S-Kurve [Goehermann 2020 nach Foster 1986]

3.2 Grundlagen und Vorgehensweisen bei Trend-Extrapolation

Die Möglichkeit, technologische Entwicklungen vorherzusagen, ist gerade in dynamischen Bereichen wie der Batterietechnologie von großer Bedeutung für eine erfolgreiche strategische Planung. Die Methode der Trend-Extrapolation hilft dabei, aus vergangenen Daten abzuleiten, wie sich Dinge in der Zukunft entwickeln könnten. Nach **Sterner 2017** ist dieses besonders nützlich, um technologische Trends abzuschätzen und fundierte Entscheidungen für Investitionen und Forschung zu treffen. Gerade bei Batterien, deren Leistungsfähigkeit und Kosten sich in den letzten Jahren stark verändert haben, könnte diese Methode einen bedeutenden Mehrwert bieten. Im Folgenden werden essenzielle Konzepte beschrieben, die in diesem Zusammenhang häufig diskutiert werden.

3.2.1 Mooresches Gesetz

1965 verfasste Gordon Moore die Beobachtung, dass sich die Anzahl der Transistoren auf einem Siliziumchip nach **Winkelhake 2024** etwa alle 18 bis 24 Monate verdoppelt. Diese Verdopplung führt zu einem exponentiellen Anstieg der Rechenleistung bei sinkenden Kosten. Diese Gesetzmäßigkeit, welche als Mooresches Gesetz bekannt ist, hat sich als Leitlinie für die Halbleiterindustrie etabliert und beschreibt das rasante Wachstum der Technologie in den letzten Jahrzehnten. Gegenwärtig sind, nach **Albany 2021**, Strukturgrößen von bis zu 2 Nanometern industriell umsetzbar, wobei Labore bereits an noch kleineren Strukturen arbeiten, die in naher Zukunft die Massenproduktion erreichen könnten.

Obwohl das Mooresche Gesetz auf einer empirischen Beobachtung basiert und keine wissenschaftlich gesicherte Gesetzmäßigkeit ist, dient es laut **Winkelhake 2024** in der Industrie als Planungsmaßstab und fördert die technologische Weiterentwicklung. Das Mooresche Gesetz bleibt somit ein zentraler Antrieb für die Leistungssteigerung in der Mikroelektronik. In **Abbildung 10** ist der lineare Anstieg der Transistoren von 1970 bis 2021 abgebildet.

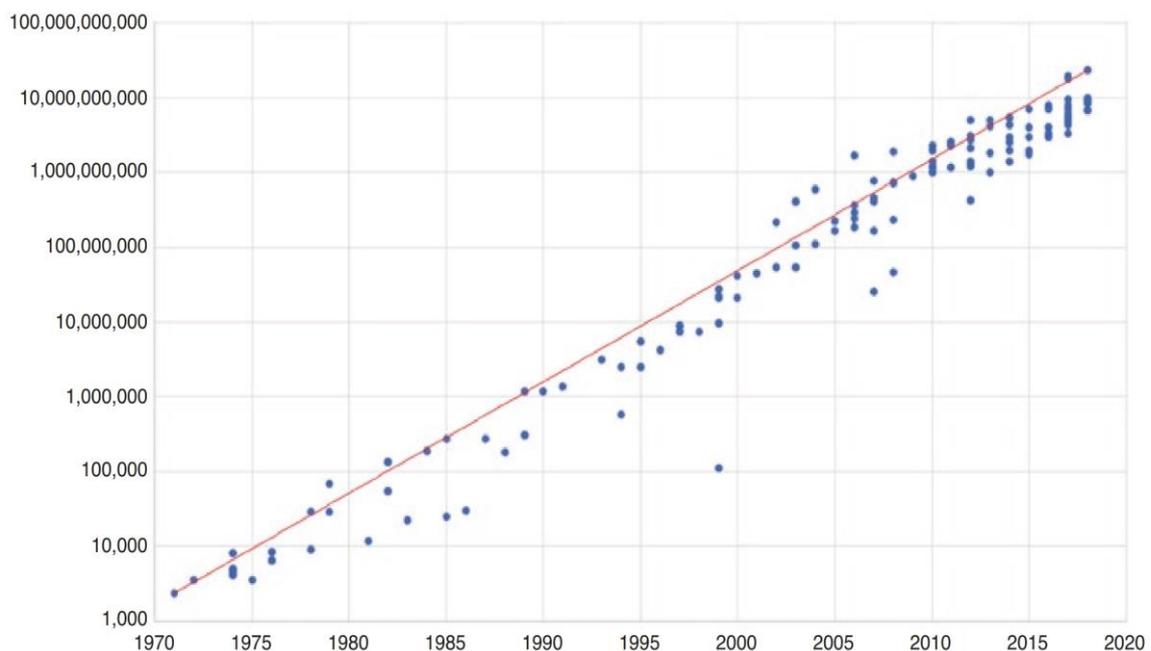
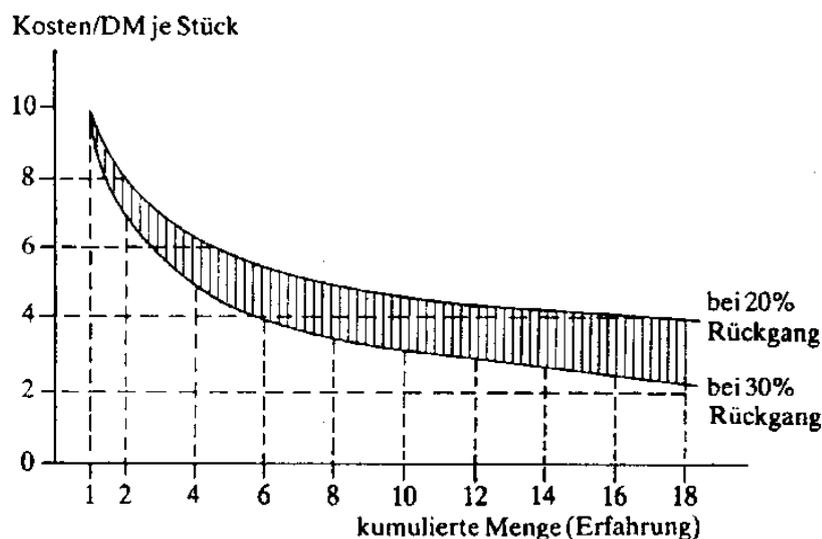


Abbildung 10: Anzahl der Transistoren pro Mikroprozessor in logarithmischer Darstellung [Winkelhake 2024]

3.2.2 Erfahrungskurve

Die Methode der Erfahrungskurve, auch bekannt als Wright's Law, beschreibt laut **Kaufmann 2021** den Zusammenhang zwischen kumulierter Produktionsmenge und den daraus resultierenden Stückkosten. Theodore P. Wright zeigte bereits in den 1930er Jahren auf, dass mit jeder Verdopplung der kumulierten Produktionsmenge die Stückkosten einer Technologie um einen konstanten Prozentsatz sinken. Nach **Kaufmann 2021** bewegen sich diese Kostensenkungen in einem Bereich zwischen 20% und 30% und resultieren aus Skalen- und Lerneffekten sowie aus Prozessverbesserungen.

Dieses Konzept ist von zentraler Bedeutung für die strategische Planung, da es Unternehmen ermöglicht, Kostensenkungspotenziale zu identifizieren. Dabei tritt der Effekt nicht automatisch ein, sondern erfordert gezielte Maßnahmen zur Optimierung der Produktionsprozesse sowie zur Weiterentwicklung technologischer Kompetenzen. Unternehmen, die die Erfahrungskurve aktiv nutzen, können, wie **Kaufmann 2021** beschreibt, ihre Wettbewerbsposition langfristig sichern, indem sie die erkannten Potenziale für Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen strategisch umsetzen. **Kaufmann 2021** erklärt, dass die in **Abbildung 11** dargestellte Erfahrungskurve nicht nur ein Prognoseinstrument ist, sondern auch als Grundlage für Investitionsentscheidungen dient, indem sie langfristige Kostenentwicklungen aufzeigt. Sie bildet somit ein entscheidendes Werkzeug für die Planung in dynamischen Märkten und Technologiebereichen.



Die Kosten-Erfahrungskurve bei linear eingeteilten Koordinaten

Abbildung 11: Erfahrungskurve [Stiller o.J.]

3.2.3 Carlson's Curve

Die Carlson-Kurve illustriert den exponentiellen Rückgang der Kosten für DNA-Sequenzierung und -Synthese sowie die gleichzeitige Verbesserung der Effizienz dieser Technologien. Die Kurve basiert laut **Carlson 2022** auf umfangreichen Daten, die Rob Carlson seit dem Jahr 2000 systematisch gesammelt hat. Sie zeigt, dass die Biotechnologie, insbesondere im Bereich der DNA-Sequenzierung, ein technisches und ökonomisches Wachstum durchläuft, das mit dem Mooreschen Gesetz der Halbleiterindustrie vergleichbar ist. Die Carlson-Kurve ist in **Abbildung 12** dargestellt.

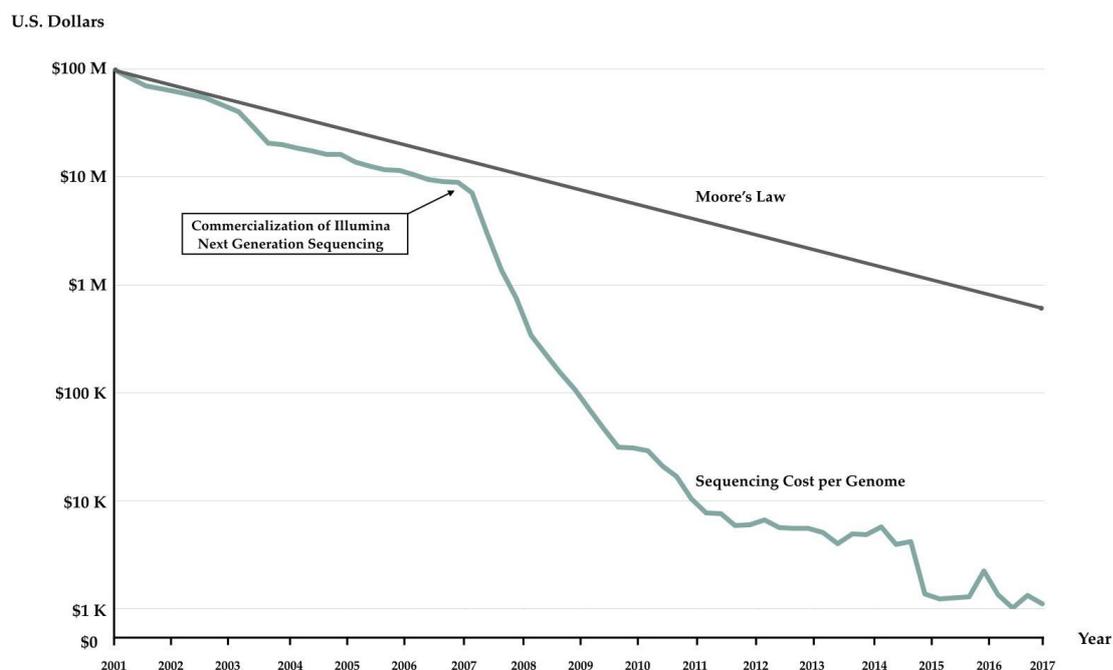


Abbildung 12: Carlson's Curve [Degnarain 2018]

Daten zur Entwicklung der DNA-Sequenzierung zeigen, dass diese Technologie seit ihrer Einführung eine exponentielle Entwicklung durchlaufen hat, bei der die Kosten schneller gesunken sind als ursprünglich prognostiziert. **Carlson 2022** hebt hervor, dass dieser Fortschritt nicht allein auf schrittweise Verbesserungen zurückzuführen ist, sondern auch auf revolutionäre technologische Durchbrüche, wie die Einführung von Hochdurchsatz-Sequenzierungstechnologien. Die Carlson-Kurve zeigt, dass DNA-Technologien zu den dynamischsten und zukunftsweisendsten Bereichen der modernen Wissenschaft gehören. Sie verdeutlicht, wie entscheidend kontinuierliche Investitionen in Forschung und Entwicklung sind, um den exponentiellen Fortschritt und die damit verbundenen Innovationen langfristig aufrechtzuerhalten.

3.2.4 Bell's Law

Bell's Law beschreibt, wie neue Arten von Computern entstehen, wachsen und schließlich durch modernere Technologien abgelöst werden. Laut **Bell 2008** bilden sich alle zehn Jahre durch technologische Innovationen neue Klassen, die jeweils ihre eigene Preiskategorie und spezifische Anwendungsbereiche haben. So entstanden in den 1950er Jahren große Mainframe-Computer, in den 1970er Jahren die ersten Personal Computer (PC) und später Smartphones sowie eingebettete Systeme. Diese Entwicklung zeigt, wie technologische Fortschritte nicht nur bestehende Geräte verbessern, sondern immer wieder neue Märkte und Anwendungen schaffen.

Ein zentraler Aspekt von Bell's Law ist, dass ältere Computerklassen häufig durch leistungsfähigere und kostengünstigere Technologien ersetzt werden. Jede neue Klasse verdrängt oft bestehende Ansätze, indem sie flexibler, preiswerter oder einfacher nutzbar ist. Gleichzeitig betont **Bell 2008** die universelle Natur von Computern. Mit ausreichend Speicher und Schnittstellen können neue Geräte die Funktionen älterer Technologien übernehmen, wodurch bestehende Klassen an Bedeutung verlieren.

Bell's Law steht dabei in enger Beziehung zum Mooreschen Gesetz, hebt jedoch nach **Bell et al. 1972** einen anderen Aspekt des technologischen Wandels hervor. Während das Mooresche Gesetz beschreibt, wie die Anzahl der Transistoren auf einem Chip sich etwa alle zwei Jahre verdoppelt und stetige Leistungssteigerungen ermöglicht, richtet Bell's Law den Blick darauf, welche Konsequenzen diese Entwicklungen für die Industrie und die Entstehung neuer Märkte haben. Die stetig steigende Leistungsfähigkeit führte beispielsweise in den 1970er Jahren zur Entstehung von Personal Computern, die eine neue Klasse von Computern einleiteten und die vorher dominierenden Mainframes für viele Anwendungsfälle ersetzten. So ergänzt Bell's Law das Mooresche Gesetz, indem es die Dynamik beschreibt, mit der technologische Fortschritte neue Märkte und Anwendungen schaffen.

Die Grundidee von Bell's Law verdeutlicht, wie wichtig kontinuierliche Innovationen und Anpassungen sind, um mit der Dynamik des technologischen Fortschritts Schritt zu halten. Sie zeigt, dass technologische Entwicklungen nicht nur bestehende Geräte verbessern, sondern regelmäßig ganze Branchen und ihre Strukturen verändern.

3.2.5 Anwendung auf Akkutechnologien

Die beschriebenen Gesetzmäßigkeiten wie Mooresches Gesetz, die Erfahrungskurve, Carlson's Curve und Bell's Law verdeutlichen, dass technologische Entwicklungen oftmals bestimmten Mustern oder Gesetzmäßigkeiten folgen, die sich aus historischen Daten ableiten lassen. Diese Gesetzmäßigkeiten zeigen, dass technologische Fortschritte nicht zufällig sind, sondern durch physikalische, ökonomische oder technische Limitierungen geprägt werden. Während das Mooresche Gesetz das exponentielle Wachstum der Transistoranzahl beschreibt, zeigt die Erfahrungskurve, wie Produktionskosten durch Lerneffekte und Skaleneffekte kontinuierlich sinken. Carlson's Curve illustriert wiederum die rasante Entwicklung in der Biotechnologie. Diese Mechanismen verdeutlichen, dass technologische Innovationen oft einer vorhersehbaren Dynamik folgen. Diese Gesetzmäßigkeiten bieten ein wertvolles Werkzeug, um technologische Fortschritte zu analysieren und vorherzusagen.

Die kontinuierliche Entwicklung von Batterietechnologien ist ein bemerkenswerter Aspekt der technologischen Innovation. Historisch gesehen, haben sich die Leistungsparameter wie beispielsweise die gravimetrische Energiedichte und Ladegeschwindigkeit erheblich verbessert, während gleichzeitig die Kosten reduziert wurden. Diese Verbesserungen können oft durch Mechanismen wie Lerneffekte und Skaleneffekte erklärt werden, ähnlich denen der Erfahrungskurve. Vor diesem Hintergrund wird die Hypothese aufgestellt, dass sich auch bei Batterietechnologien eine Gesetzmäßigkeit identifizieren lässt.

Um diese Hypothese zu überprüfen, wird im folgenden Kapitel das in dieser Arbeit angewandte Analyseverfahren umfassend erläutert. Ziel ist es, die Eignung der verfügbaren Daten zu bewerten und herauszufinden, ob diese für eine verlässliche Extrapolation geeignet sind. Im Fokus steht dabei die Anwendung der Methode auf die untersuchten Batterietechnologien, um die beobachteten Trends in den Leistungsparametern wie beispielsweise der Energiedichte zu analysieren. Diese Analyse bildet die Grundlage, um fundierte Aussagen über die Dynamik der technologischen Entwicklung zu treffen und darauf basierend mögliche zukünftige Entwicklungen vorherzusagen. Durch die Kombination von Theorie und praktischer Anwendung wird ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, der sowohl die Validität der Daten als auch deren Potenzial zur Trendprognose berücksichtigt.

3.3 Vorgehensweise zur Analyse auf Eignung der Extrapolation

In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit verwendeten Analysemethoden zur Trendanalyse vorgestellt. Ziel ist es, durch systematische Anwendung dieser Methoden Erkenntnisse über die historischen Entwicklungen der betrachteten Leistungsparameter zu gewinnen und diese für zukünftige Vorhersagen nutzbar zu machen. Zur systematischen Beurteilung der Ergebnisse wird zudem ein Bewertungsschema entwickelt, das eine transparente und nachvollziehbare Einordnung der Qualität der ausgearbeiteten Ergebnisse erlaubt.

3.3.1 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse wird nach **Backhaus et al. 2021** als eine Methode der statistischen Datenanalyse definiert, die dazu dient, den Zusammenhang zwischen einer abhängigen Variable und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu modellieren und Trends präzise abzubilden. Ziel ist es, durch eine funktionale Beziehung zwischen diesen Variablen sowohl die Stärke als auch die Richtung dieser Beziehung zu quantifizieren und vorherzusagen. Diese Analyse ermöglicht es, Hypothesen zu überprüfen, erklärende Modelle zu entwickeln und Prognosen zu erstellen.

Das in dieser Arbeit verwendete lineare Regressionsmodell gibt hierbei den Zusammenhang zwischen einer abhängigen Variable Y und einer unabhängigen Variable X an, die durch eine lineare Funktion zu beschreiben ist. Ziel ist es, eine Trendlinie zu finden, die die Beziehung zwischen den Variablen mathematisch modelliert und zukünftige Werte von Y basierend auf X vorhersagbar macht.

Für die Berechnung der Parameter der lineare Regressionsgleichung, die in **Gleichung 3.1** dargestellt ist, muss der Regressionskoeffizient b und der konstante Term a bestimmt werden. Dabei gibt der Regressionskoeffizient b in **Gleichung 3.2** die Steigung der linearen Regressionsgeraden an, wobei der konstante Term a in **Gleichung 3.5** die abhängige Variable Y der unabhängigen Variable X bei $X=0$ der linearen Regressionsgeraden angibt und den Wert der Geraden des Y -Achsenabschnittes repräsentiert.

$$\text{Lineare Regressionsgleichung: } Y = a + bX \quad (3.1)$$

$$\text{Regressionskoeffizient: } b = \frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

$$\text{Mittelwert der X-Werte: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3.3)$$

$$\text{Mittelwert der Y-Werte: } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad (3.4)$$

$$\text{Konstanter Term: } a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (3.5)$$

Die Berechnung der Parameter des Regressionskoeffizienten b basiert auf der Analyse der Abweichungen der Beobachtungswerte (x_i, y_i) von ihren Mittelwerten (\bar{x}, \bar{y}) . Dabei repräsentiert x_i die Beobachtungswerte der unabhängigen Variable während y_i die Beobachtungswerte der abhängigen Variable repräsentiert. Die Mittelwerte \bar{x} in **Gleichung 3.3** und \bar{y} in **Gleichung 3.4** stellen die Durchschnittswerte aller Beobachtungswerte der unabhängigen und abhängigen Variable dar. Für das weitere Verständnis und den Bezug der linearen Regressionsanalyse zu dieser Arbeit ist im **Anhang G** eine Beispielrechnung beigefügt.

In dieser Arbeit werden die berechneten Regressionsgleichungen als Trendlinien in die Diagramme der zu behandelnden Leistungsparameter integriert.

3.3.2 Bestimmtheitsmaß R^2

Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt die Anpassungsgüte der Regressionsanalyse wieder und ist eine zentrale Kennzahl zur Bewertung der Modellgüte. Es beschreibt, wie gut ein lineares Regressionsmodell die Variabilität der abhängigen Variablen Y durch die unabhängigen Variablen X erklären kann. Nach **Backhaus et al. 2021** wird das Bestimmtheitsmaß berechnet, indem die Residualstreuung (SSR) in Relation zur Gesamtstreuung (SST) gesetzt wird. Mathematisch lässt sich das Bestimmtheitsmaß durch die **Gleichung 3.6** ausdrücken:

$$\text{Bestimmtheitsmaß: } R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST} \quad (3.6)$$

Dabei gibt die Residualstreuung (SSR, residual sum of squares) an, wie stark die beobachteten Werte y_i von den durch ein Modell vorhergesagten Werten \hat{y} abweichen. Sie misst somit den unerklärten Anteil der Varianz der abhängigen Variable Y durch das Modell. Mathematisch lässt sie sich mit der **Gleichung 3.7** beschreiben.

$$\text{Residualstreuung: } SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.7)$$

Hierbei errechnen sich die Vorhersagewerte \hat{y}_i aus der linearen Regressionsgleichung. Zu jedem Beobachtungswert x_i wird mit der **Gleichung 3.1** ein korrespondierender Wert \hat{y}_i berechnet. Diese vorhergesagten Werte werden dann von den tatsächlichen Beobachtungswerten y_i subtrahiert. Die Differenzen werden quadriert, um sowohl positive als auch negative Abweichungen gleichermaßen zu berücksichtigen. Anschließend wird die Summe dieser quadrierten Differenzen gebildet, was die Residualstreuung ergibt. Ein hoher Wert der Residualstreuung weist darauf hin, dass das Modell die Daten nur unzureichend beschreibt.

Die Gesamtstreuung SST (total sum of squares) beschreibt die gesamte Variabilität der abhängigen Variable Y und wird berechnet als Summe der quadrierten Abweichungen der einzelnen Beobachtungen y_i vom Mittelwert \bar{y} . Mathematisch lässt sich der Ausdruck wie in **Gleichung 3.8** formulieren.

$$\text{Gesamtstreuung: } SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.8)$$

Ein R^2 -Wert von **0** bedeutet, dass das Modell keinerlei Varianz der abhängigen Variable Y erklären kann. Dies würde bedeuten, dass die Vorhersagen des Modells im Durchschnitt lediglich dem Mittelwert von Y entsprechen und kein Zusammenhang zwischen den unabhängigen und abhängigen Variablen besteht. Im Gegensatz dazu zeigt ein R^2 -Wert von **1**, dass das Modell die gesamte Varianz von Y vollständig erklären kann. In einem solchen Fall stimmen die durch das Modell vorhergesagten Werte \hat{y}_i exakt mit den tatsächlichen Beobachtungswerten y_i überein und es gibt keine Abweichungen (Residuen).

Insgesamt stellt das R^2 -Maß eine wesentliche Kennzahl dar, um die Effektivität und die Erklärungskraft eines Modells systematisch zu bewerten. Es ermöglicht nicht nur eine Beurteilung der Modellgüte, sondern auch den Vergleich verschiedener Modelle.

3.3.3 Grenzverlauf

Zur Analyse potenzieller Trends in einem Datensatz wird der Grenzverlauf als Indikator herangezogen. Diese Methode ermöglicht eine qualitative Bewertung der Datenentwicklung durch die visuelle Analyse der Maximal- oder Minimalwerte des Systems. Der Ansatz fokussiert sich auf die Untersuchung von drei zentralen Kriterien:

1. Annäherung an einen Wert:

Der Grenzverlauf wird daraufhin analysiert, ob sich die Maximal- oder Minimalwerte im Zeitverlauf einem konstanten Wert annähern. Eine solche Stabilisierung könnte auf das Erreichen einer natürlichen Kapazitätsgrenze oder auf eine Sättigung des Systems hinweisen. Bleibt eine Annäherung aus, könnte dies auf ein kontinuierliches Wachstum oder eine fortwährende Veränderung des betrachteten Prozesses hindeuten.

2. Periodizität des Verlaufs:

Es wird geprüft, ob der Grenzverlauf zyklische Muster aufweist. Ein periodischer Verlauf kann auf externe oder systematische Einflüsse hindeuten, die regelmäßig die Spitzenwerte des Systems beeinflussen. Die Identifikation solcher Muster bietet Hinweise auf die Struktur und Dynamik des zugrundeliegenden Prozesses.

3. Korrelation zwischen Grenzlinie und Trendlinie:

Es wird untersucht, ob der Verlauf der oberen Grenzlinie mit der allgemeinen Trendlinie des Datensatzes übereinstimmt. Eine Übereinstimmung legt nahe, dass die Maximalwerte die allgemeine Entwicklung des Systems widerspiegeln. Divergenzen zwischen Grenzlinie und Trendlinie könnten hingegen auf spezifische externe Einflüsse oder isolierte Effekte hindeuten, die ausschließlich die Maximalwerte betreffen.

Diese Methodik basiert auf einer qualitativen und visuellen Interpretation der Daten und bietet eine flexible Herangehensweise, um zentrale Muster und Trends zu identifizieren. Sie stellt in Analysen eine sinnvolle Ergänzung zu quantitativen Analyseverfahren dar.

3.3.4 Systematisches Bewertungsschema zur Trendextrapolation

Im vorliegenden Kapitel wird das Bewertungsschema zur Eignung der Extrapolation langfristiger Trends in der Entwicklung elektrischer Energiespeicher dargestellt. Die Bewertung der Modelle erfolgt unter anderem auf Basis des Bestimmtheitsmaß R^2 , welches, wie in **Kapitel 3.3.2** erläutert wurde, die Anpassungsgüte zwischen den empirischen Daten und den jeweiligen Modellen mathematisch quantifiziert. Um die Qualität der angewandten Regressionsmodelle einzuordnen, wird das Bestimmtheitsmaß R^2 anhand einer standardisierten Bewertungsmatrix, die in der **Tabelle 1** einsehbar ist, kategorisiert. Diese Matrix erlaubt eine klare Einteilung der Modelle in verschiedene Güteklassen und liefert eine Grundlage zur Bewertung der Anpassungsgüte und Aussagekraft. Modelle mit einem R^2 -Wert von mehr als 0,7 werden als „hoch“ eingestuft, da sie einen Großteil der Variabilität der zugrunde liegenden Daten erklären und somit eine hohe Zuverlässigkeit bieten. Werte von 0,4 bis 0,7 gelten als „mittel“. Diese Modelle erklären einen relevanten Teil der Datenvariabilität, weisen jedoch noch signifikante Unsicherheiten auf und sollten mit Vorsicht interpretiert werden. Bei R^2 -Werten unter 0,4 ist die Anpassung des Modells als unzureichend zu betrachten und fällt in die Kategorie „gering“.

Tabelle 1: Bewertungsmatrix des Bestimmtheitsmaß R^2

Güteklasse	R^2 -Wert	Interpretation
hoch	$R^2 > 0,7$	Das Modell erklärt einen Großteil der Variabilität. Die Anpassung ist solide und das Modell ist für die Vorhersage geeignet.
mittel	$0,4 < R^2 \leq 0,7$	Das Modell erklärt einen relevanten Teil der Variabilität, weist jedoch eine signifikante Streuung auf. Es sollte mit Vorsicht interpretiert werden.
gering	$R^2 \leq 0,4$	Das Modell erklärt keinen bis einen geringen Teil der Variabilität. Die Anpassung ist begrenzt und nicht für präzise Vorhersagen geeignet.

Das Bestimmtheitsmaß reicht allein jedoch nicht aus, um eine umfassende Bewertung der technologischen Entwicklungen zu gewährleisten. Insbesondere bei niedrigen R^2 -Werten besteht weiterhin die Möglichkeit, Trends zu erkennen, die für die Analyse relevant sind. Dieses lässt sich aus dem mathematischen Hintergrund zur Errechnung des Bestimmtheitsmaß interpretieren. Je größer die Streuung der einzelnen Datenpunkte sind, desto geringer fällt der R^2 -Wert aus.

Um eine präzise Interpretation der Daten zu gewährleisten und möglichen mathematischen Fehlinterpretationen entgegenzuwirken, wird ergänzend zum Bestimmtheitsmaß der Regressionsanalyse die Trendlinie einer qualitativen Bewertung unterzogen. Darüber hinaus wird die Grenzlinie der erhobenen Daten berücksichtigt, um die technologischen Leistungsgrenzen zu einem bestimmten Zeitpunkt aufzuzeigen. Die Kombination dieser drei Ansätze bietet eine fundierte und ganzheitliche Grundlage, um zuverlässige und aussagekräftige Extrapolationen der technologischen Entwicklung vorzunehmen.

Um die kombinierte Betrachtung der Eignung für die Extrapolation technologischer Trends zu präzisieren, wird ein gewichtetes Bewertungsschema entwickelt. Dieses Schema berücksichtigt drei zentrale Kriterien: das Bestimmtheitsmaß R^2 , die Trendlinie sowie die Grenzlinie der erhobenen Daten. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die Stärken und Schwächen jedes Kriteriums zu balancieren und eine fundierte Gesamtbewertung der Modelle zu ermöglichen.

Gewichtung der Kriterien

Das Bestimmtheitsmaß R^2 quantifiziert die Anpassungsgüte eines Modells und bietet eine grundlegende mathematische Orientierung. Aufgrund der möglichen Streuung und Varianz in den erhobenen Daten, insbesondere bei technologischen Entwicklungen, die in der Literatur oft durch heterogene Parameter geprägt sind, kann das R^2 jedoch anfällig für Fehlinterpretationen sein. Deshalb wird es mit einer Gewichtung von 0,2 in die Gesamtbewertung einbezogen.

Die Trendlinie stellt eine analytische und visuelle Darstellung des langfristigen Verhaltens der Daten dar. Sie ist weniger anfällig für punktuelle Ausreißer als das R^2 und bietet Einblicke in die übergeordnete Entwicklung eines Trends. Aufgrund dieser zentralen Rolle wird der Trendlinie eine höhere Gewichtung von 0,4 zugewiesen.

Ebenso bedeutsam ist die Betrachtung der Grenzlinie, welche die obere oder untere Grenze der erhobenen Daten beschreibt. Diese Grenze repräsentiert beispielsweise die maximale technologische Leistungsfähigkeit oder minimale Kosten, die zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht wurden. Die Grenzlinie hilft, realistische Zielwerte und Potenziale abzuleiten und wird daher ebenfalls mit einer Gewichtung von 0,4 berücksichtigt.

Jedes der drei Kriterien wird auf einer Skala von 1 bis 3 Punkten bewertet, wobei 3 die höchste und 1 die geringste Eignung beschreibt. Für das mathematische Modell des Bestimmtheitsmaßes werden hierbei für eine hohe Güteklasse 3 Punkte, für eine mittlere Güteklasse 2 Punkte und für die geringe Güteklasse 1 Punkt vergeben. Die Grundlagen der gewichteten Bewertungsmatrix ist in **Tabelle 2** ersichtlich:

Tabelle 2: Gewichtete Bewertungsmatrix

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	Punkte x	$0,2 \times \text{Punkte x}$
Trendlinie	0,4	Punkte y	$0,4 \times \text{Punkte y}$
Grenzklinie	0,4	Punkte z	$0,4 \times \text{Punkte z}$
Gesamtbewertung	-	-	Summe ($0,2x + 0,4y + 0,4z$)

Die Gesamtbewertung ergibt sich aus der gewichteten Summe der Punkte der jeweiligen Kriterien. Hierbei beträgt die maximal zu erreichbare Punktzahl 3. Die Ergebnisse für die Eignung auf Trendextrapolation der behandelten Leistungsparameter werden, wie in **Tabelle 3** beschrieben, in drei Kategorien eingeteilt.

Tabelle 3: Punktesystem zur Gesamtbewertung auf Trendextrapolation

Kategorie	Gesamtbewertung	Beschreibung
geeignet	2,1 – 3,0 Punkte	Modelle mit hoher Zuverlässigkeit und Aussagekraft, die für die Extrapolation technologischer Trends geeignet sind.
potenziell geeignet	1,5 – 2,0 Punkte	Modelle mit potenzieller Eignung, die durch zusätzliche Daten oder Anpassungen weiterentwickelt werden könnten.
ungeeignet	< 1,5 Punkte	Modelle mit keiner bis geringer Aussagekraft, die für die Extrapolation nicht nutzbringend eingesetzt werden können.

Durch diese strukturierte Kombination aus mathematischen und qualitativen Bewertungsansätzen wird eine fundierte Basis geschaffen, um die Aussagekraft und Zuverlässigkeit der betrachteten Modelle zu beurteilen.

Dieses Bewertungsverfahren wird auf alle Leistungsparameter angewendet, mit Ausnahme der Markteintritte und der Marktkapazität.

3.4 Vorgehensweise zur Datenakquise

In den folgenden Unterkapiteln wird die Methodik der vorliegenden Arbeit näher beleuchtet. Dazu wird zunächst in **Kapitel 3.4.1** die systematische Literaturrecherche beschrieben. In diesem Zusammenhang werden Informationen zum Literaturrechercheverfahren erfasst. Anschließend wird in **Kapitel 3.4.2** die Vorgehensweise zur Literaturrecherche dargelegt.

3.4.1 Systematische Literaturrecherche

Zur Bearbeitung der Thematik wurde eine Systematische Literaturrecherche (SLR) durchgeführt. Dafür wurden sowohl Suchmaschinen als auch wissenschaftliche Datenbanken herangezogen. Durch die Behandlung deutscher und englischer Veröffentlichungen, konnte eine umfassende Datenbasis für die Literaturrecherche generiert werden. Für die Erhebung der Literatur wurde eine strukturierte Vorgehensweise präferiert. Die Literaturrecherche wurde in den Suchmaschinen Scopus und Google Scholar durchgeführt.

3.4.2 Vorgehensweise bei der Literaturrecherche

Um für die Trendanalyse relevante Veröffentlichungen zu identifizieren, wird eine SLR durchgeführt. Dabei lässt sich der Rechercheprozess der vorliegenden Arbeit in fünf Schritte unterteilen, die wie folgt lauten:

1. Bestimmung des Suchinstrumentes
2. Identifizierung von Schlüsselbegriffen und Formulierung von Suchstrings
3. Eingabe der formulierten Suchstrings
4. Eingrenzung der Ergebnisse
5. Auswahl der Literatur

Die Bestimmung der Suchinstrumente für die SLR erfolgt mithilfe der aufgeführten Fachübersicht auf der Webseite der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Scopus gilt, im Rahmen der Kategorie „Elektrotechnik, Mess- und Regelungstechnik“, als eine der „Top-Datenbanken“. Dabei weist Google Scholar erheblich mehr Datensätze als Scopus auf. Nach **Martín-Martín et al. 2018** lassen sich 92% der Veröffentlichungen aus Google Scholar in Scopus finden.

Für Web of Science Core Collection (WOS) sind dies 95%. Aus diesem Grund wurde WOS in dieser Recherche nicht berücksichtigt.

Im zweiten Schritt werden relevante Schlüsselwörter identifiziert und zu Suchstrings zusammengefasst. Die Schlüsselwörter wurden anhand der Aufgabenstellung der vorliegenden Masterarbeit abgeleitet.

Für die Formulierung der Suchstrings kommen Boolesche Operatoren zum Einsatz. Diese ermöglichen eine detaillierte und individuelle Suche. Die Operatoren *AND* und *OR* erlauben es Suchbegriffe miteinander zu kombinieren und zu verknüpfen, um eine zielführendere Durchsuchung zu generieren. Bei der Kopplung durch den Operator *AND* finden sich alle angewendeten Suchbegriffe in den Ergebnissen wieder. Der Operator *OR* wird im Umgang mit Synonymen angewendet. In diesem Rahmen werden Wörter mit ähnlicher oder gleicher Bedeutung, wie in **Kosmol o.J.**, miteinander kombiniert, um die Suchanfrage zu erweitern und eine höhere Anzahl an Ergebnissen zu erhalten. Die ausgewählten Suchbegriffe und die formulierten Suchstrings können in der **Tabelle 4** eingesehen werden. In **Anhang A** und **Anhang B** werden die genauen Eingaben und Ergebnisse im Suchinstrument Google Scholar, anhand einer Bildschirmaufnahme, am Beispiel des ersten Suchstrings veranschaulicht. Im **Anhang C** und **Anhang D** ist identisches für das Suchinstrument Scopus dargestellt.

Tabelle 4: Formuliert Suchstrings am Beispiel Google Scholar

Such-instrument	#	Suchstring
Google Scholar	1	electric mobility OR electric vehicle AND battery AND lead-acid OR lithium-ion AND LCO OR lithium-ion AND LFP OR lithium-ion AND NMC OR lithium-ion AND NCA OR nickel-metal-hydrate OR nickel-cadmium AND energy density AND volumetric OR gravimetric
	2	electric mobility OR electric vehicle AND battery AND lead-acid OR lithium-ion AND LCO OR lithium-ion AND LFP OR lithium-ion AND NMC OR lithium-ion AND NCA OR nickel-metal-hydrate OR nickel-cadmium AND market entry OR market launch
	3	electric mobility OR electric vehicle AND battery AND lead-acid OR lithium-ion AND LCO OR lithium-ion AND LFP OR lithium-ion AND NMC OR lithium-ion AND NCA OR nickel-metal-hydrate OR nickel-cadmium AND cost
	4	electric mobility OR electric vehicle AND battery AND lead-acid OR lithium-ion AND LCO OR lithium-ion AND LFP OR lithium-ion AND NMC OR lithium-ion AND NCA OR nickel-metal-hydrate OR nickel-cadmium AND charging speed
	5	electric mobility OR electric vehicle AND battery AND lead-acid OR lithium-ion AND LCO OR lithium-ion AND LFP OR lithium-ion AND NMC OR lithium-ion AND NCA OR nickel-metal-hydrate OR nickel-cadmium AND market capacity
	6	electric mobility OR electric vehicle AND battery AND lead-acid OR lithium-ion AND LCO OR lithium-ion AND LFP OR lithium-ion AND NMC OR lithium-ion AND NCA OR nickel-metal-hydrate OR nickel-cadmium AND cycle life

Im dritten Schritt werden die formulierten Suchstrings mithilfe der Booleschen Operationen in den Suchinstrumenten eingegeben, um die Anzahl der Literatur auf relevante Veröffentlichungen zu reduzieren. Es wird nun Literatur gefunden, welche sich auf die Suchstrings beziehen, dennoch müssen diese im vierten Schritt gesichtet und gefiltert werden. Dabei umfasst das Filtern auch die Einschränkung der Suche auf bestimmte Jahre. Im fünften Schritt werden nun die am besten geeigneten Quellen ausgewählt, um die benötigten Informationen zu entnehmen.

3.4.3 Definierung des Untersuchungsrahmens

In diesem Kapitel werden die Parameter definiert, die für die Untersuchung der Eignung von Akkumulatoren und deren Technologien zur Extrapolation langfristiger Trends relevant sind. Diese Parameter umfassen im Detail:

Art der Speichertechnologie

Die Untersuchung umfasst auch die spezifische Speichertechnologie des Akkumulators, wie etwa Lithium-Ionen oder andere Technologien. Die Art der Speichertechnologie hat entscheidenden Einfluss auf die Parameter, wie beispielsweise die Leistungsfähigkeit der Akkumulatoren.

Markteintritt der Akkutechnologie

Für jede untersuchte Akkutechnologie wird das Jahr ihrer Erfindung dokumentiert. Diese Angabe ermöglicht es, technologische Entwicklungen und Innovationszyklen im Kontext der Lebenszyklusanalyse zu berücksichtigen und die Marktdynamik besser zu verstehen. Zudem wird der Markteintritt im Bereich von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen betrachtet.

Energiedichte des Akkumulators und der jeweiligen Technologie

Hierbei wird sowohl die Kapazität einzelner Zellen als auch die Kapazität des gesamten Akkusystems analysiert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung der gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte. Dies ermöglicht eine fundierte Einordnung und den Vergleich unterschiedlicher Akkutechnologien hinsichtlich ihrer Gewichts- und Platzanforderungen sowie ihrer Gesamtleistung.

Die Analyse umfasst dabei nicht nur die Zellen selbst, sondern schließt auch Peripherie- und Nebenkomponenten wie Gehäuse, Kühlung und Leistungselektronik mit ein, die zur Masse und zum Volumen des Gesamtsystems beitragen.

Kosten des Akkumulators

Die Batteriekosten werden in US-Dollar pro kWh angegeben, dies ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit der Akkutechnologien.

Ladegeschwindigkeit der Akkutechnologie

Die Ladegeschwindigkeit, also die Zeit, die benötigt wird, um eine Zelle oder das gesamte System vollständig aufzuladen, ist ein entscheidender Faktor in der Bewertung der Akkuleistung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Ladegeschwindigkeiten verschiedener Batterietechnologien aus unterschiedlichen Quellen zu verschiedenen Zeitpunkten recherchiert. In den Quellen wurden die Ladezeiten teils in C-Raten, teils in Stunden angegeben. Um die Vergleichbarkeit dieser Werte zu gewährleisten, war es notwendig, beide Darstellungen auf eine einheitliche Grundlage zu bringen. Dazu wurden für die Trendanalyse die C-Raten, die eine Ladegeschwindigkeit in Bezug auf die Batteriekapazität angeben, in Stunden umgerechnet.

Herleitung der Formel zur Umrechnung von C-Raten in Ladezeiten

Müller 2024 erläutert, dass eine C-Rate von 1C angibt, dass ein Akku innerhalb einer Stunde vollständig geladen werden kann. Eine C-Rate von 2C bedeutet, dass der Ladevorgang doppelt so schnell erfolgt, also in nur einer halben Stunde (30 Minuten). Im Gegensatz dazu benötigt eine C-Rate von 0,5C für eine vollständige Ladung zwei Stunden, was der doppelten Zeit entspricht. Diese Beobachtung zeigt, dass es einen klaren Zusammenhang zwischen der C-Rate und der Ladezeit gibt. Je höher die C-Rate, desto kürzer die Ladezeit. Die Beziehung lässt sich anschaulich beschreiben. Die Ladezeit verhält sich umgekehrt zur Höhe der C-Rate, dies lässt sich als ‚umgekehrte Proportionalität‘ beschreiben.

Wenn die C-Rate beispielsweise verdoppelt wird, halbiert sich die Ladezeit, und wenn die C-Rate halbiert wird, verdoppelt sich die Ladezeit.

Um diesen Zusammenhang mathematisch zu formulieren, verwenden wir für das weitere Vorgehen und der Vereinheitlichung **Formel 3.9** für die Berechnung der Ladezeit und **Formel 3.10** für die Berechnung der C-Rate:

$$\text{Ladezeit (in Stunden)} = \frac{1}{C\text{-Rate}} \quad (3.9)$$

$$C\text{-Rate} = \frac{1}{\text{Ladezeit (in Stunden)}} \quad (3.10)$$

Anzahl der Ladezyklen

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Anzahl der Ladezyklen, die ein Akkumulator durchlaufen kann, bevor seine Kapazität signifikant abnimmt. Die Zyklenzahl ist ein zentraler Indikator für die Lebensdauer und Nachhaltigkeit der Akkutechnologie.

Ergänzend zu diesen spezifischen Kriterien sollen, soweit möglich, allgemeine Marktdaten erhoben werden. Diese Daten umfassen insbesondere die Gesamtmarktkapazität für Akkumulatoren, wobei gegebenenfalls auch eine Differenzierung nach spezifischen Akkutechnologien vorgenommen wird. Die Entwicklung dieser Marktdaten über die Zeit hinweg ermöglicht eine Einschätzung des Wachstums und der Dynamik in der Energiespeicherbranche und liefert wertvolle Informationen über zukünftige Trends und Potenziale.

Um eine Vergleichbarkeit herzustellen und die Leistungsparameter der Akkutechnologien zu ihren Markteinführungen nachvollziehbar darzustellen, werden neben der Verwendung der Technologien in Elektrofahrzeugen auch Werte aus anderen Maschinen und Produkten herangezogen, in denen die jeweiligen Akkutechnologien zum Einsatz kamen. Dies ermöglicht eine fundierte Einordnung und verdeutlicht den historischen Trend der jeweiligen Akkutechnologien und dessen Leistungsparametern ab der Erfindung dieser.

In der energetischen Analyse und Bewertung von Batterien ist es üblich, zwischen den Leistungsparametern von einzelnen Zellen und kompletten Batteriesystemen zu differenzieren.

Dennoch zeigt die Analyse der verfügbaren Literatur, dass die Unterschiede beispielsweise zwischen den gravimetrischen und volumetrischen Energiedichten auf Zell- und Systemebene häufig vernachlässigbar sind.

Diese Erkenntnis erlaubt es, Werte aus beiden Bereichen in der Recherche zu verwenden, ohne dass signifikante Verzerrungen entstehen. **Broussely et al. 1997** veranschaulicht diesen Zusammenhang, indem für eine einzelne Zelle eine gravimetrische Energiedichte von 125 Wh/kg angegeben wird, während für das zugehörige Akkusystem lediglich ein minimal niedrigerer Wert von 120 Wh/kg berichtet wird. Dieser Unterschied von weniger als fünf Prozent unterstreicht, dass die zusätzlichen Strukturelemente und das Managementsystem eines Akkus nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtenergiedichte haben.

Johnson et al. 2008 liefert weitere Belege für diese Annahme. Für ein Batteriemodul mit 16 Zellen gibt **Johnson et al. 2008** eine gravimetrische Energiedichte von 120 Wh/kg und eine volumetrische Energiedichte von 210 Wh/L an. In einem Batteriepack, das aus zwei solcher Module besteht, werden die Werte mit über 100 Wh/kg für die gravimetrische Energiedichte und über 170 Wh/L für die volumetrische Energiedichte angegeben. Der beobachtete Rückgang der Werte lässt sich durch die zusätzlichen strukturellen und thermischen Managementelemente im Batteriepack erklären. Dennoch bleibt die Abweichung moderat und unkritisch, wenn die Daten in aggregierten Analysen verwendet werden.

Die geringe Differenz zwischen Zellen, Modulen und kompletten Systemen legt nahe, dass die Nutzung von Leistungsparametern aus unterschiedlichen Systemebenen für die Forschung und Entwicklung von Batterietechnologien zulässig ist. Dies gilt insbesondere, wenn keine spezifische Angabe zur Systemintegration erforderlich ist oder wenn die Abweichungen innerhalb einer akzeptablen Toleranz liegen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die geringe Abweichung zwischen Zell- und Systemwerten es ermöglicht, Werte aus beiden Bereichen in der Recherche zu kombinieren, ohne die Aussagekraft der Ergebnisse wesentlich zu beeinträchtigen und eine fundierte Trendanalyse durchzuführen.

In der weiteren Betrachtung legen wir in der Recherche den Fokus auf praktische Werte, da diese die realen Einsatzbedingungen und technischen Begrenzungen besser widerspiegeln als theoretische Angaben. Während theoretische Werte oft auf idealisierten Annahmen basieren und lediglich die maximale Energieausbeute unter perfekten Bedingungen beschreiben, berücksichtigen praktische Werte die unvermeidbaren Verluste und Effizienzgrenzen, die bei realem Betrieb auftreten.

Owen 1997 illustriert diesen Unterschied anschaulich am Beispiel eines Lithium-Ionen-Akkus. Für diese Technologie wird eine theoretische gravimetrische Energiedichte von 500 Wh/kg angegeben, während der praktische Wert bei lediglich 110 Wh/kg liegt. Dieser signifikante Unterschied zeigt, dass die theoretische Energiedichte durch mehrere Faktoren stark eingeschränkt wird, darunter interne Widerstände, Verluste durch Wärmeentwicklung, die Notwendigkeit von Sicherheitsmechanismen sowie das Gewicht zusätzlicher Komponenten wie Zellgehäuse, Elektrolyt und Separatoren.

Die Diskrepanz zwischen den theoretischen und praktischen Werten verdeutlicht, warum es für belastbare Analysen unerlässlich ist, sich auf praktische Werte zu stützen. Diese Werte liefern realistische Aussagen über die Leistungsfähigkeit eines Lithium-Ionen-Akkus unter tatsächlichen Betriebsbedingungen und ermöglichen eine valide Bewertung dieser Technologie in Hinblick auf ihre Anwendbarkeit und Effizienz. Indem wir in der Recherche praktische Werte priorisieren, stellen wir sicher, dass die gewonnenen Erkenntnisse direkt auf reale Szenarien übertragbar sind und die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Technologien und Systemen gewährleistet ist.

4 Datenrecherche und -erhebung zu marktreifen Speichertechnologien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Datenrecherche und -erhebung zu den marktreifen Speichertechnologien in verschiedenen Jahresspannen systematisch dargestellt. Dabei werden die ermittelten Werte den jeweiligen Quellen zugeordnet, um eine transparente Nachvollziehbarkeit der Datenbasis sicherzustellen. Zusätzlich werden ergänzende Informationen, sofern verfügbar, ebenfalls aufgeführt, um die Ergebnisse durch weitere kontextuelle Angaben zu bereichern. Diese umfassende Darstellung dient als Grundlage für die anschließenden Analysen und ermöglicht eine fundierte Bewertung der Leistungsparameter der betrachteten Technologien.

4.1 Akkumulatoren bis 1960

In dem folgenden Unterkapiteln werden alle marktreifen Akkutechnologien beschrieben, die bis zum Jahr 1960 im Automobilsektor für Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang zum Einsatz kamen. Die Darstellung konzentriert sich ausschließlich auf die technischen Parameter der Batterien. In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass bis zu diesem Zeitpunkt ausschließlich der Bleiakku als geeignete und marktreife Technologie in Betracht gezogen wurde.

4.1.1 Bleiakku

Der Bleiakku, der 1859 eingeführt wurde, ist laut **Kurzweil 2018** eine der ältesten und am weitesten verbreiteten Batterietechnologien. Das erste Elektrofahrzeug wurde, nach **Kampker 2024**, im Jahr 1881 entworfen. Trotz der Einführung des Bleiakkus waren präzise quantitative Angaben zu ihrer Energiedichte in den ersten Jahren ihrer Entwicklung nicht vorhanden. Dies ist dem geschuldet, dass die damals verfügbaren Messtechniken und wissenschaftlichen Standards keine Möglichkeit boten, solche Werte zu ermitteln. **Planté 1887** beschreibt in seinem grundlegenden Werk ‚The Storage of Electrical Energy‘ die Funktionsweise seiner Batterie und demonstriert deren Potenzial durch experimentelle Ergebnisse. Allerdings fehlen in seinem Buch Angaben zur gravimetrischen oder volumetrischen Energiedichte. Stattdessen konzentrieren sich die Beschreibungen auf qualitative Aussagen über die Leistungsfähigkeit.

Planté 1887 führte beispielsweise aus, dass die Batterie in der Lage sei, elektrische Energie zu speichern und diese zuverlässig wieder abzugeben. Dies entspricht der damaligen wissenschaftlichen Herangehensweise, die sich stärker auf die Demonstration praktischer Anwendungen als auf präzise Metriken stützte. Ein ähnliches Bild zeichnet sich in anderen frühen Werken zum Bleiakku ab. **Vinal 1955** beschreibt ebenfalls, dass in den Anfangsjahren der Batterietechnologie qualitative Beschreibungen dominierten. **Vinal 1955** betont, dass die Leistungsfähigkeit von Batterien oft durch experimentelle Beobachtungen und nicht durch standardisierte Maßeinheiten charakterisiert wurde: „The early records of storage batteries lacked precise quantification, relying instead on observational results and qualitative descriptions.“

Der Internationale Elektrizitätskongress, der 1881 in Paris stattfand, legte nach **Jerrard 1986** die Grundlage für die Standardisierung elektrischer Einheiten wie Volt, Ampere und Ohm fest. Auf diesem Kongress wurden diese Einheiten offiziell definiert, was es Wissenschaftlern und Ingenieuren ermöglichte, elektrische Phänomene systematisch zu quantifizieren und die Leistung von Geräten wie Batterien präziser zu bewerten.

Nach der Einführung und Standardisierung dieser elektrischen Einheiten und mit der kontinuierlichen Entwicklung neuer Batterietechnologien begann die Wissenschaft, Methoden zu entwickeln, um die Leistung von Batterien präziser zu messen und zu vergleichen. Mit den Fortschritten in der Elektrotechnik und der Einführung immer leistungsfähigerer Batterietypen wurde es notwendig, die Eigenschaften der Batterien so zu definieren, dass ein präziser Vergleich untereinander möglich war. Neben qualitativen Beschreibungen wurde ein quantitativer Vergleich unerlässlich, um die Leistungsfähigkeit verschiedener Technologien objektiv bewerten zu können.

Durch die folgende Methodik konnte nachgewiesen werden, dass quantitative Vergleiche, wie sie heute mit gravimetrischer und volumetrischer Energiedichte durchgeführt werden, zu damaliger Zeit noch nicht praktiziert wurden. Zudem wurde mithilfe dieser Methodik ermittelt, ab wann die gravimetrische und volumetrische Energiedichte ungefähr in der Forschung und Praxis Anwendung fanden. Bei Eingabe des Suchstrings "*energy density*" OR "*volumetric*" OR "*gravimetric*" AND "*kWh/kg*" OR "*kWh/m³*" und Anwendung eines Veröffentlichungsjahresfilters bis einschließlich 1960 in Google Scholar konnten keine geeigneten Quellen identifiziert werden.

Nach Anpassung des Filters auf Veröffentlichungen bis zum Jahr 1970 ließen sich hingegen die ersten relevanten Quellen finden. Dies deutet darauf hin, dass die Begriffe und Einheiten zur Beschreibung der volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte zwischen 1960 und 1970 eingeführt und erstmals in wissenschaftlichen Veröffentlichungen verwendet wurden. Die detaillierten Ergebnisse dieser Suche sind in den **Anhängen E und F** dokumentiert und können dort eingesehen werden. Bis zum Jahr 1960 dominierte der Bleiakku uneingeschränkt den Markt als Traktionsbatterie für Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang. Trotz intensiver Forschungen und technischer Fortschritte in der Elektrotechnik war keine andere Akkutechnologie zu dieser Zeit marktreif genug, um die spezifischen Anforderungen des Automobilsektors zu erfüllen.

4.2 Akkumulatoren bis 1970

Im folgenden Kapitel werden die marktreifen Akkutechnologien beschrieben, die bis zum Jahr 1970 im Automobilsektor für Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang zum Einsatz kamen.

4.2.1 Bleiakku

In den Jahren nach 1960 wurden weltweit metrische Einheiten entwickelt und standardisiert, um Messgrößen und technische Parameter einheitlich und leichter vergleichbar zu machen. Zudem wurden in dieser Zeit nicht alle für die angestrebte Trendanalyse relevanten Leistungsparameter erfasst oder dokumentiert. Daher konnten für den Bleiakku im Zeitraum von 1960 bis 1970 lediglich Werte für die gravimetrische Energiedichte, volumetrische Energiedichte und die Anzahl der Ladezyklen ermittelt werden.

Nach **Ragone 1968**¹ hatte der Bleiakкумулятор, der als Traktionsbatterie in Elektrofahrzeugen eingesetzt wurde, eine gravimetrische Energiedichte von 9,68 Wh/kg. Dieser Bleiakku zeichnete sich insbesondere durch seine Robustheit aus und erreichte als Traktionsbatterie eine Lebensdauer von etwa 1.000 Ladezyklen.

¹ Die Quelle gibt die gravimetrische Energiedichte in 19 kWh/lb an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/kg umgerechnet.

Laut **Swinkels 1968** hat der Bleiakku eine gravimetrische Energiedichte von 18 bis 33 Wh/kg, wobei **Witherspoon 1969** gravimetrische Energiedichten zwischen 22,05 Wh/kg und 26,46 Wh/kg erwähnt. Die volumetrische Energiedichte der Batterie liegt, nach **Swinkels 1968**², damit in einem Bereich von 51,01 kWh/m³ bis 61,21 kWh/m³, abhängig von der spezifischen Energiespeicherung pro Masse. Die Kosten für Bleiakumulatoren lagen in der betrachteten Zeitspanne zwischen 1970 und 1980 gemäß den Angaben von **Douglas 1967** im Bereich von 35 bis 70 US-Dollar pro Kilowattstunde. Nach **Caprioglio 1969** liegen die Kosten zwischen 70 bis 250 US-Dollar pro kWh. Die Minima und Maxima der unterschiedlichen Leistungsparameter sind in der **Tabelle 5** zusammengefasst.

Tabelle 5: Übersicht der Parameter des Bleiakkus bis 1970

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	9,68	25,5
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	56,11 ³	
Kosten	US-Dollar je kWh	35	250
Ladezyklen	Zyklen	1000	
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

4.2.2 Nickel-Cadmium-Akku

In diesem Zusammenhang wird der Nickel-Cadmium-Akku näher behandelt, obwohl diese Technologie nach **Reimann 2023** im Jahr 1899 erstmals entwickelt und nach **Kitaronka 2022** seit 1950 genutzt wird. Diese Akkutechnologie wurde nach **Sokoli 2022** erstmals 1993 in einem Elektrofahrzeug genutzt. Die ersten Fahrzeuge, die Nickel-Cadmium-Akkus als Traktionsbatterie einsetzten, waren nach **Sedlak 2019** der Peugeot 106 Electric und der Citroën Saxo Electric. Nach **Duddy 1961** erreichte die gravimetrische Energiedichte Werte von 33 Wh/kg, 40 Wh/kg und 50 Wh/kg, wobei die Abweichungen auf unterschiedliche Produktionsmethoden zurückzuführen sind.

² Die Quelle gibt das Gewicht mit 260 lb, das Volumen mit 1,80 cu ft und einer Dichte von 2.314 kg/m³ an. Zur Vereinheitlichung wurden diese Werte in die Einheit von kWh/kg umgerechnet.

³ Falls lediglich ein einzelner Wert vorliegt, erfolgt eine Zusammenführung der Spalten für Minimum und Maximum, sodass diese einheitlich dargestellt werden.

Shair et al. 1962 dokumentiert eine gravimetrische Energiedichte von 26,46 Wh/kg, was eine zusätzliche Referenz für die Bandbreite dieser Technologie bietet. **Barak 1968** ergänzt diese Daten mit einer weiteren gravimetrischen Energiedichte von 26 Wh/kg. Die volumetrische Energiedichte wird von **Barak 1968** mit 98 kWh/m³ angegeben.

Zusätzlich berichtet **Shair et al. 1962** von einer Lebensdauer von 1.500 Ladezyklen bei einer Entladungstiefe von 70%, während **Mandel 1966** bei einer Entladungstiefe von 75% bis zu 2.000 Ladezyklen erreicht. Nach **Caprioglio 1969** belaufen sich die Herstellungskosten eines Nickel-Cadmium-Akkus auf 450 bis 700 US-Dollar pro kWh. Für die Ladegeschwindigkeit nennt **Azulay 1967** eine C-Rate zwischen C/30 und C/40 dies wird ebenfalls in der **Tabelle 6** dargestellt.

Tabelle 6: Übersicht der Parameter des Nickel-Cadmium-Akkus bis 1970

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	26	50
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	80	98
Kosten	US-Dollar je kWh	459	700
Ladezyklen	Zyklen	1500	2000
Ladegeschwindigkeit	C	C/30	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

4.3 Akkumulatoren bis 1980

Im folgenden Kapitel werden die Batterietechnologien untersucht, die bis 1980 für den Einsatz in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen im Automobilssektor entwickelt und verfügbar waren.

4.3.1 Bleiakku

Schlotter 1977 nennt eine gravimetrische Energiedichte von 31 bis 32 Wh/kg. Nach **Bodamer et al. 1979** liegt die Energiedichte von Bleiakkus in den ersten Prototypen zur Nutzung in Elektrofahrzeugen sogar bei 36,5 Wh/kg. **Yao et al. 1980** berichtet von einer gravimetrischen Energiedichte von 40,5 bis 41,4 Wh/kg für verbesserte Bleiakkus, die im National Battery Test Laboratory (NBTL) getestet wurden.

Gleichzeitig werden andere Bleiakku-Module mit einer gemessenen gravimetrischen Energiedichte von 37 Wh/kg beschrieben. Ergänzend hierzu wurde nach **Schlotter 1979** eine volumetrische Energiedichte⁴ von 61 kWh/m³ erreicht.

Schotter 1977 dokumentiert Anzahl an Ladezyklen von über 1.100 Zyklen. Eine Batterie kostet zu diesen Zeiten nach Angaben von **Yao 1978** 100 US-Dollar je kWh. Die Ergebnisse der Recherche werden mit der Spanne zwischen Minimum und Maximum in der **Tabelle 7** zusammengefasst.

Tabelle 7: Übersicht der Parameter des Bleiakkus bis 1980

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	31	41,4
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	61	
Kosten	US-Dollar je kWh	100	
Ladezyklen	Zyklen	1000	
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

4.3.2 Nickel-Cadmium-Akku

Zwischen den Jahren 1970 und 1980 spielte der Nickel-Cadmium-Akku im Automobilsektor weiterhin keine wesentliche Rolle.

Die Herstellung von Nickel-Cadmium-Zellen erforderte kostspielige Materialien und komplexe Produktionsverfahren, wodurch der Einsatz der Batterie in Elektrofahrzeugen wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig war. Im Bereich der Raumfahrt hingegen fand die Nickel-Cadmium-Technologie eine wichtige Anwendung, insbesondere in Orbit-Satelliten. **Sparks 1980** beschreibt die Energiedichte der Nickel-Cadmium-Akkuzelle, die in diesen Satelliten eingesetzt wurden. Sie erreichten eine gravimetrische Energiedichte von 36 Wh/kg sowie eine volumetrische Energiedichte⁵ von 120 kWh/m³. Die Kosten pro kWh belaufen sich zu diesen Zeiten laut **Ramakumar et al. 1976** nach **Douglas 1974** auf 600 US-Dollar.

⁴ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 61 Wh/dm³ an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁵ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 0,120 Wh/cm³ an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Weiterhin gibt **Ramakumar et al. 1976** an, dass die Leistungsparameter der Nickel-Cadmium-Batterie bei einer unterschiedlichen Entladedauer variieren. **Ramakumar et al. 1976** verzeichnet bei einer Entladedauer von einer Stunde eine gravimetrische Energiedichte⁶ von 33,1 Wh/kg, eine volumetrische Energiedichte⁷ von 88,27 kWh/m³ und eine Anzahl von 300 Ladezyklen. Bei einer deutlich langsameren Entladedauer von sechs Stunden betrug die gravimetrische Energiedichte⁸ 39,68 Wh/kg, die volumetrische Energiedichte 127,13 kWh/m³ und schaffte eine Anzahl von 3.000 Ladezyklen. Die **Tabelle 8** beschreibt die minimalen und maximalen Leistungswerte des Nickel-Cadmium-Akkus bis zum Jahr 1980.

Tabelle 8: Übersicht der Parameter des Nickel-Cadmium-Akkus bis 1980

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	36	
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	120	
Kosten	US-Dollar je kWh	600	
Ladezyklen	Zyklen	300	3000
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

4.4 Akkumulatoren bis 1990

In diesem Kapitel werden die Akkumulatortechnologien vorgestellt, die bis 1990 im Automobilsektor für Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang entwickelt und eingesetzt wurden. Bis zu diesem Zeitpunkt begann sich neben dem Bleiakkumulator auch der Nickel-Cadmium-Akku in ersten Anwendungen zu etablieren, insbesondere bei frühen Elektrofahrzeugen wie dem Peugeot 106 Electric. Dennoch war der Bleiakku weiterhin die am häufigsten verwendete Technologie, da alternative Systeme erst am Beginn ihrer praktischen Umsetzung standen.

⁶ Die Quelle gibt die gravimetrische Energiedichte in 15 Wh/lb an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in Wh/kg umgerechnet.

⁷ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 3,6 kWh/ft³ an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁸ Die Quelle gibt die gravimetrische Energiedichte in 18 Wh/lb an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in Wh/kg umgerechnet.

4.4.1 Bleiakku

Die gravimetrische Energiedichte des Bleiakкумуляtors variiert in der Literatur zwischen 29 und 35 Wh/kg. **Beck 1988** gibt für die Energiedichte einen Bereich von 30 bis 35 Wh/kg an, während **Andrew 1983** über einen Wert von 29 Wh/kg bei einer Entladungstiefe von 80% berichtet. **Linden 1984** beschreibt die gravimetrische Energiedichte mit 35 Wh/kg und ergänzt diese Angabe durch eine volumetrische Energiedichte von 80 kWh/m³.

Nach **Beck 1988** konnte der Bleiakku bei typischen Bedingungen bis zu 1.500 Ladezyklen erreichen. Im Gegensatz dazu dokumentiert **Andrew 1983** bei einer Entladungstiefe von 80% lediglich 200 bis 250 Ladezyklen, was die Verschlechterung durch tiefe Entladungen verdeutlicht. **Linden 1984** gibt eine Zyklenzahl von etwa 800 an. Fortschritte in der Technologie führten nach **Landgrebe et al. 1988** zu einer erheblichen Erhöhung der Ladezyklen auf 2.000 bei einem Herstellungsverfahren, während ein alternatives Verfahren sogar 2.500 Ladezyklen erreichte.

Landgrebe et al. 1988 gibt die Kosten für Bleiakkus mit 85 bis 131 US-Dollar pro kWh an. Ein anderes Verfahren hebt die Kosten auf 95,2 bis 146,7 US-Dollar pro kWh an. **Perez 1987** gibt die optimale Ladegeschwindigkeit mit C/20 an, was einer vollständigen Ladung über einen Zeitraum von 20 Stunden entspricht. Die gesamten Werte sind in **Tabelle 9** dargestellt.

Tabelle 9: Übersicht der Parameter des Bleiakkus bis 1990

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	20	35
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	80	
Kosten	US-Dollar je kWh	85	146,7
Ladezyklen	Zyklen	200	2500
Ladegeschwindigkeit	C	C/20	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

4.4.2 Nickel-Cadmium-Akku

Beck 1988 gibt für die gravimetrische Energiedichte einen Bereich von 40 bis 45 Wh/kg an. **Asbury et al. 1984** bestätigt dies mit einem Wert von 40 Wh/kg, während **Cheiky et al. 1990** mit 44 Wh/kg und **Ratner 1990** mit 45 Wh/kg leicht höhere Werte dokumentieren. **Hardin 1989** berichtet mit 49,9 Wh/kg von einer weiter optimierten Energiedichte, während **Steindler et al. 1990** mit 55 Wh/kg einen Spitzenwert angibt, der auf gezielte technologische Verbesserungen basiert. Die volumetrische Energiedichte⁹ wird von **Steindler et al. 1990** mit 104 kWh/m³ angegeben.

Cheiky et al. 1990 dokumentiert 700 Ladezyklen bei einer Entladungstiefe von 80%. **Ratner 1990** gibt eine Zyklenzahl von 500 bis 600 an. Bei vollständiger Entladung reduziert sich die Lebensdauer erheblich, wie **Steindler et al. 1990** mit lediglich 250 Ladezyklen zeigt. Hinsichtlich der Ladegeschwindigkeit dokumentiert **Morrow 1986** eine C-Rate von C/8, was einer vollständigen Ladung innerhalb von acht Stunden entspricht. Die Kostenstruktur für NiCd-Akkus variierte je nach Literatur und technologischem Stand, wie die Preisspanne in **Tabelle 10** verdeutlicht. **Cheiky et al. 1990** berichtet von 72 US-Dollar pro kWh. **Ratner 1990** gibt hingegen Kosten im Bereich von 100 bis 125 US-Dollar je kWh an.

Tabelle 10: Übersicht der Parameter des Nickel-Cadmium-Akkus bis 1990

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	40	55
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	104	
Kosten	US-Dollar je kWh	72	100
Ladezyklen	Zyklen	250	700
Ladegeschwindigkeit	C	C/8	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

4.4.3 Nickel-Metallhydrid-Akku

In den 1980er-Jahren befand sich die Technologie des Nickel-Metallhydrid-Akkus noch in der Entwicklungsphase und war für den Einsatz in Elektrofahrzeugen nicht geeignet.

⁹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 104 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Sakai 1990 gibt eine Spannbreite von 50 bis 60 Wh/kg für die gravimetrische Energiedichte an, während **Brill et al. 1990** einen Wert von 47 Wh/kg dokumentiert. Bei spezifischen Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt liegt die Energiedichte laut **Brill et al. 1990** bei lediglich 38 Wh/kg. Auch die volumetrische Energiedichte¹⁰ zeigte ähnliche Variationen. **Sakai 1990** berichtet von Werten zwischen 150 und 200 kWh/m³. **Brill et al. 1990** gibt einen Wert von 165 kWh/m³ an, während bei Luft- und Raumfahrtanwendungen die Energiedichte auf 130 kWh/m³ begrenzt war.

Hinsichtlich der Lebensdauer erreichten NiMH-Akkus nach **Fetcenko et al. 1990** 400 Ladezyklen bei einer vollständigen Entladung. Durch optimierte Zelldesigns konnten jedoch bis zu 700 Ladezyklen erreicht werden. Die C-Rate wurde ebenso von **Fetcenko et al. 1990** untersucht und mit C/2 angegeben, was einer vollständigen Ladung innerhalb von zwei Stunden entspricht.

Die Nickel-Metallhydrid-Akkus wurden gemäß **Thielmann et al. 2017** erst im Jahr 1989 eingeführt und kommerzialisiert. Diese Akkutechnologie wurde nach Aussage von **Chryssos 2012** 1901 erfunden und erstmal laut **Hutchinson et al. 2014** 1997 in einem serienreifen Elektrofahrzeug eingesetzt. Da diese Technologie in den Jahren zuvor noch in der Entwicklungsphase war, existieren für den Zeitraum von 1980 bis 1990 keine verlässlichen Daten oder Quellen zu den Produktions- oder Anwendungskosten der Akkus. Dennoch wurden die Spannen der recherchierten Werte zwischen den niedrigsten und den höchsten Werten der Leistungsparameter in der **Tabelle 11** kompakt dargestellt.

Tabelle 11: Übersicht der Parameter des Nickel-Metallhydrid-Akkus bis 1990

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	38	55
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	130	200
Kosten	US-Dollar je kWh	Keine Information	
Ladezyklen	Zyklen	400	700
Ladegeschwindigkeit	C	C/2	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

¹⁰ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 150 bis 200 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

4.5 Akkumulatoren bis 2000

Bis zum Jahr 2000 zeichneten sich die Entwicklungen in der Batterietechnologie durch wichtige Fortschritte aus, die maßgeblich von der Einführung der Lithium-Ionen-Technologie geprägt waren. Diese Batterien überzeugten nach **Korthauer 2013** durch hohe Energiedichte, lange Lebensdauer und vielseitige Einsatzmöglichkeiten. Auch Nickel-Metallhydrid-Batterien gewannen an Bedeutung, insbesondere durch ihren Einsatz in den ersten Hybridfahrzeugen, die laut **Linden 2002** den Grundstein für die moderne Elektromobilität legte. Nach **Gaines 2014** blieben trotz der Fortschritte Herausforderungen bestehen.

4.5.1 Bleiakku

Die Leistungsparameter von Bleiakkumulatoren wurden im Zeitraum von 1991 bis 2000 intensiv untersucht, da diese Technologie weiterhin eine zentrale Rolle in zahlreichen Anwendungen spielte, insbesondere in der Automobilindustrie.

Nach **Bullock 1994** beträgt sie bei konventionellen Bleiakkumulatoren 40 bis 50 Wh/kg. **Oman 1995** dokumentiert eine gravimetrische Energiedichte von 50 Wh/kg für Fahrzeugbatterien mit verbesserter Konstruktion und 51 Wh/kg für Valve-Regulated Akkumulatoren. Laut **Oman 1995** erreichen weniger optimierte Systeme lediglich niedrigere Werte von etwa 25 Wh/kg. **Appleby 1995** nennt einen Wert von 35 Wh/kg und **Rantik 1999**, basierend auf **Rand et al. 1998**, dokumentiert eine Spanne von 35 bis 50 Wh/kg. **Vissers et al. 1993** gibt Werte zwischen 33 und 36 Wh/kg an.

Die volumetrische Energiedichte zeigt einen breiten Bereich. **Chan 1993**¹¹ berichtet von 85 kWh/m³, während **Kondoh et al. 1999** Werte von 73 und 68 kWh/m³ dokumentiert. **Vissers et al. 1993**¹² gibt eine Spanne von 78 bis 92 kWh/m³ an, wobei der höchste Wert von 92 kWh/m³ optimierte Designs mit effizienter Raumnutzung repräsentiert.

¹¹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 85 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

¹² Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 78 bis 92 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Laut **O'Brien et al. 1996** liegen die Kosten eines Batteriepakets bei 140 US-Dollar pro kWh, während **Cheiky et al. 1991** einen deutlich niedrigeren Wert von 63 US-Dollar pro kWh verzeichnet. **Chan 1993** dokumentiert Kosten von 200 US-Dollar pro kWh und **Kempton 1997** nennt einen Wert von 150 US-Dollar pro kWh.

Die Ladezyklen, die ein Akkumulator vor Erreichen seines Kapazitätsverlusts bewältigen kann, gibt **Bullock 1994** mit 1.000 Zyklen an, während **Oman 1995** für eine Entladungstiefe von 50% 3.000 Zyklen feststellt. **Chan 1993** dokumentiert eine breite Spanne von 50 bis 1.500 Zyklen während **Kondoh et al. 1999** berichtet von 2.000 Zyklen. **Rantik 1999**, basierend auf **Rand et al. 1998**, beschreibt eine Spanne von 500 bis 1.000 Zyklen, während **Kempton 1997** lediglich 300 Ladezyklen angibt.

Bullock 1994 gibt die C-Rate zwischen C/4 und C/3 an, was eine Ladedauer von drei bis vier Stunden unter optimalen Bedingungen ermöglicht. **Chan 1993** beschreibt eine Lebensdauer von 20 Jahren, während **Kondoh et al. 1999** eine Lebensdauer von dreizehn Jahren dokumentiert. Dieser Bereich der Lebensdauer kann der **Tabelle 12** entnommen werden.

Bleiakkumulatoren wurden zuletzt in einem Serienfahrzeug, dem GM EV1, eingesetzt, dass laut **Paiola 2022** zwischen 1996 und 1999 gebaut wurde. Dieses Fahrzeug markiert einen Wendepunkt in der Automobilgeschichte und verdeutlichte zugleich die begrenzten Möglichkeiten von Bleiakkumulatoren im Vergleich zu aufkommenden Technologien wie Nickel-Metallhydrid- und Lithium-Ionen-Batterien.

Tabelle 12: Übersicht der Parameter des Bleiakkus bis 2000

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	25	51
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	68	92
Kosten	US-Dollar je kWh	63	150
Ladezyklen	Zyklen	50	3000
Ladegeschwindigkeit	C	C/3	C/4
Lebensdauer	Jahre	13	20

4.5.2 Nickel-Cadmium-Akku

In den Jahren 1990 bis 2000 erlebte die Nickel-Cadmium-Technologie trotz ihrer begrenzten Bedeutung im Automobilsektor eine Phase der Weiterentwicklung und Spezialisierung.

Nach **Oman 1994** und **Chan 1993** beträgt die gravimetrische Energiedichte von NiCd-Akkus 40 Wh/kg, wobei **Chan 1993** diesen Wert explizit auf Zellebene angibt. **Rantik 1999**, basierend auf **Rand et al. 1998**, dokumentiert eine Spanne von 40 bis 60 Wh/kg. **Putois 1995** berichtet von einem Wert von 65 Wh/kg bei guter Entwicklung und 56 Wh/kg bei normaler Entwicklung. **Cornu 1994** differenziert zwischen Entladeraten. Bei langsamer Entladung wurde ein Wert von 54 Wh/kg erreicht, während bei schneller Entladung 46 Wh/kg ermittelt wurde. **Vissers et al. 1993** gibt eine gravimetrische Energiedichte von 55 Wh/kg an.

Chan 1993¹³ dokumentiert eine volumetrische Energiedichte von 70 kWh/m³, während **Vissers et al. 1993**¹⁴ mit 104 kWh/m³ einen deutlich höheren Wert darlegt. **Chan 1993** berichtet, dass die Kosten für eine vollständige Batterie mit allen Komponenten bei 2.000 US-Dollar pro kWh lagen.

Chan 1993 und **Putois 1995** sowie **Cornu 1994** geben bei einer Entladungstiefe von 80% eine maximale Anzahl der Ladezyklen von 2.000 an. **Rantik 1999**, basierend auf **Rand et al. 1998**, dokumentiert hingegen eine deutlich geringere Anzahl von 800 Ladezyklen. **Vissers et al. 1993** berichtet von 1.018 Ladezyklen. Die Minima und Maxima der Anzahl der Ladezyklen können in der **Tabelle 13** eingesehen werden. Die Lebensdauer von NiCd-Akkus wird von **Chan 1993** mit 20 Jahren angegeben.

Zur Ladegeschwindigkeit konnten für diesen Zeitraum keine geeigneten Daten gefunden werden, was eine umfassende Bewertung dieses Parameters erschwert.

¹³ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 70 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

¹⁴ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 104 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Tabelle 13: Übersicht der Parameter des Nickel-Cadmium-Akkus bis 2000

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	40	65
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	56	104
Kosten	US-Dollar je kWh	2000	
Ladezyklen	Zyklen	800	2000
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	20	

4.5.3 Nickel-Metallhydrid-Akku

In den 1990er-Jahren erlebte die Nickel-Metallhydrid-Technologie ihren Durchbruch und etablierte sich zunehmend als vielversprechende Alternative zu Blei- und Nickel-Cadmium-Akkumulatoren. Nach **Dhar et al. 1997** stellten die NiMH-Akkus zu dieser Zeit das am schnellsten wachsende Marktsegment für wiederaufladbare Batterien dar und fanden gleichzeitig ihren Weg in den Automobilsektor. Erste Elektrofahrzeuge wie der Toyota RAV4 EV wurden, wie **Uehara et al. 1997** angibt, mit NiMH-Akkus ausgestattet, da diese eine bessere Leistungsfähigkeit als Nickel-Cadmium-Systeme und weniger umweltschädliche Materialien aufwiesen.

Oman 1995 gibt für gravimetrische Energiedichte von Fahrzeugbatterien einen Wert von 80 Wh/kg an, während **Oman 1994** und **Chan 1993** Werte von 55 Wh/kg bzw. 60 Wh/kg auf Zellbasis verzeichnen. **Rantik 1999**, der **Rand et al. 1998** zitiert, berichtet von einem Wertebereich zwischen 75 und 95 Wh/kg. **Vissers et al. 1993** nennt eine gravimetrische Energiedichte von 55 Wh/kg, während **Dhar et al. 1997** mit 70 Wh/kg einen höheren Wert dokumentiert. **Koehler et al. 1997** differenziert zwischen High-Energy- und High-Power-Zellen und dokumentieren Werte von 80 Wh/kg für High-Energy-Zellen und 55 Wh/kg für High-Power-Zellen.

Chan 1993¹⁵ beschreibt eine volumetrische Energiedichte von 120 kWh/m³, während **Vissers et al. 1993**¹⁶ mit 152 kWh/m³ einen höheren Wert angibt.

¹⁵ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 120 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

¹⁶ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 152 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Dhar et al. 1997¹⁷ berichtet von 170 kWh/m³, während **Koehler et al. 1997**¹⁸ Werte von 220 kWh/m³ für High-Energy-Zellen und 150 kWh/m³ für High-Power-Zellen dokumentiert. **Powers 2000**¹⁹ dokumentiert einen Spitzenwert von 350 kWh/m³.

Kempton 1997 berichtet von 400 US-Dollar pro kWh. **Powers 2000** notiert deutlich höhere Kosten von 2400 US-Dollar pro kWh. Die Anzahl der Ladezyklen, die ein NiMH-Akku bewältigen konnte, gab **Chan 1993** mit über 500 Zyklen an. **Rantik 1999**, basierend auf **Rand et al. 1998**, dokumentiert eine Spanne von 750 bis 1.200 Zyklen, während **Vissers et al. 1993** über 505 Zyklen berichtet. **Dhar et al. 1997** gibt 600 Zyklen bei einer Entladungstiefe von 80% an, während **Kempton 1997** eine maximale Ladezyklenanzahl von 1.000 dokumentiert. Das Minimum und Maximum der Anzahl der Ladezyklen kann der **Tabelle 14** entnommen werden.

Die Ladegeschwindigkeit von NiMH-Akkus wird von **Dhar et al. 1997** mit C/3 angegeben, was eine Ladedauer von etwa drei Stunden für eine vollständige Aufladung unter optimalen Bedingungen bedeutet. Die Lebensdauer von NiMH-Akkus wird von **Chan 1993** mit fünf Jahren angegeben.

Tabelle 14: Übersicht der Parameter des Nickel-Metallhydrid-Akkus bis 2000

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	55	95
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	120	350
Kosten	US-Dollar je kWh	400	2400
Ladezyklen	Zyklen	500	1200
Ladegeschwindigkeit	C	C/3	
Lebensdauer	Jahre	5	

¹⁷ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 170 Wh/dm³ an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

¹⁸ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 220 und 150 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

¹⁹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 350 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

4.5.4 Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Der Lithium-Cobaltdioxid-Akku wurde laut **Richter 2020** im Jahr 1979 erfunden und gemäß **Kitaronka 2022** 1991 kommerzialisiert. Obwohl diese Technologie den Grundstein für die Entwicklung von Lithium-Akkus legte, kam sie nach den vorliegenden Veröffentlichungen nie in einem serienmäßigen Fahrzeug zum Einsatz. Dennoch wird der Lithium-Cobaltdioxid-Akkumulator in dieser Arbeit, wie in **Kapitel 2.2.4.1** beschrieben, behandelt. Die Leistungsparameter von Lithium-Cobaltdioxid-Akku im Zeitraum von 1991 bis 2000 stellen eine revolutionäre Entwicklung in der Energiespeicherung dar. Die umfassende Analyse wissenschaftlicher Studien aus diesem Zeitraum verdeutlicht eine erhebliche Bandbreite in den gemessenen Leistungsparametern.

Oman 1994 dokumentiert einen Wert für die gravimetrische Energiedichte von 95 Wh/kg, während **Gaines 2000** 144 Wh/kg angibt. **Hyung et al. 1999** berichtet von 120 Wh/kg und präzisiert unter den standardisierten USABC-, SBA- und EUCAR-Testprozeduren²⁰ einen Wert von 114 Wh/kg. **Koehler et al. 1997** dokumentiert Werte von 120 Wh/kg und bei der Untersuchung von 30-Ah-Zellen 110 Wh/kg.

Gaines 2000²¹ berichtet für die volumetrische Energiedichte einen Wert von 175 kWh/m³, während **Hyung et al. 1999**²² für bestimmte Zelltypen bis zu 300 kWh/m³ angibt. Unter den standardisierten Testprozeduren für USABC, SBA und EUCAR wird ein Wert von 233 kWh/m³ dokumentiert. **Koehler et al. 1997**²³ nennt für 30-Ah-Zellen Werte von 300 kWh/m³ und 270 kWh/m³.

Laut **IEA 2020** liegen die Kosten 1995 für Zellen, die hauptsächlich in der Unterhaltungselektronik verwendet wurden bei 6.745 US-Dollar pro kWh. Im Jahr 1996 sanken die Kosten auf 6.238 US-Dollar pro kWh, 1997 auf 6.058 US-Dollar pro kWh und 1998 auf 5.263 US-Dollar pro kWh. Bis 1999 und 2000 setzten sich die Kostenreduktionen mit 3.774 US-Dollar pro kWh bzw. 3.382 US-Dollar pro kWh fort.

²⁰ Nicht-staatliche Organisationen, die Testprozeduren vorgeben, um einheitliche und vergleichbare Standards zu schaffen.

²¹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 175 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

²² Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 300 und 233 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

²³ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 300 und 270 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Kato et al. 1993 dokumentiert 800 Ladezyklen bei einer Entladungstiefe von 80% sowie 1.200 Zyklen bei 70% DoD. **Koehler et al. 1997** berichtet von 1.000 Zyklen und spezifiziert für 30-Ah-Zellen 600 Zyklen. Der Bereich zwischen Höchst- und Tiefstwert wird in **Tabelle 15** dargestellt. Die Ladegeschwindigkeit von Lithium-Cobaltdioxid-Akkus wird sowohl von **Kennedy et al. 2000** als auch von **Hyung et al. 1999** unter USABC-, SBA- und EUCAR-Testprozeduren mit C/3 dokumentiert. Diese Ladegeschwindigkeit entsprach einer Ladedauer von etwa drei Stunden.

Tabelle 15: Übersicht der Parameter des Lithium-Cobaltdioxid-Akkus bis 2000

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	95	144
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	175	300
Kosten	US-Dollar je kWh	3382	6745
Ladezyklen	Zyklen	600	1200
Ladegeschwindigkeit	C	C/3	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

4.5.5 Lithium-Eisenphosphat-Akku

Die Untersuchung der Leistungsparameter des Lithium-Eisenphosphat-Akkumulators im Zeitraum von 1991 bis 2000 gestaltet sich schwierig, da zu dieser Technologie in diesem Zeitraum keine geeigneten Quellen gefunden werden konnten. Der Lithium-Eisenphosphat-Akku wurde erst 1996 entdeckt und etablierte sich erst ab 1999 am Markt, wie **Zubi et al. 2018** dokumentiert. Diese Verzögerung zwischen Entdeckung und Markteintritt erklärt das Fehlen detaillierter Leistungsparameter für die 1990er Jahre. Laut **Hoese 2011** wurde der LFP-Akku erstmals in dem Fahrzeug BYD F3DM im Jahr 2008 eingesetzt.

Die Entdeckung des LFP-Akkus durch Forschungsteams in den 1990er Jahren war ein bedeutender Durchbruch in der Batterietechnologie. Seine Eigenschaften, darunter eine hohe thermische Stabilität, eine gute Zyklenfestigkeit und eine verbesserte Sicherheit im Vergleich zu anderen Lithium-Ionen-Systemen, machten ihn nach **Wang et al. 2015** zu einer vielversprechenden Alternative für zahlreiche Anwendungen. Allerdings wurden diese Vorteile erst in den frühen 2000er Jahren umfassend erforscht und dokumentiert.

In den 1990er Jahren stand die Technologie noch am Anfang ihrer Entwicklung, sodass belastbare Daten zu gravimetrischer und volumetrischer Energiedichte, Kosten, Ladezyklen oder Ladegeschwindigkeit fehlen.

4.5.6 Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid-Akku

Die Untersuchung der Leistungsparameter des Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkumulators im Zeitraum von 1991 bis 2000 erweist sich als schwierig, da für diese Technologie nur begrenzt Daten verfügbar sind. Laut **Camargos et al. 2022** trat der NCA-Akku erst im Jahr 1999 in den Markt ein und wurde nach **Orecchini et al. 2014** erstmals 2008 im Tesla Roadster eingesetzt, sodass umfassende wissenschaftliche Untersuchungen zu seinen Eigenschaften in den 1990er Jahren weitgehend fehlen.

Der NCA-Akku wurde gegen Ende der 1990er Jahre als Teil der Lithium-Ionen-Technologie entwickelt und ist nach **Tran et al. 2021** für seine hohe Energiedichte und Stabilität bekannt. Trotz seiner potenziellen Vorteile wurden Leistungsparameter wie gravimetrische und volumetrische Energiedichte, Kosten, Ladezyklen oder Ladegeschwindigkeit erst nach 1999 systematisch erforscht.

In den Jahren zuvor konzentrierte sich die Forschung vorwiegend auf andere Lithium-Ionen-Chemien, was dazu beitrug, dass der NCA-Akku keine wesentliche Beachtung in wissenschaftlichen Studien fand.

4.6 Akkumulatoren bis 2010

Zwischen 2000 und 2010 rückte die Lithium-Ionen-Technologie zunehmend in den Vordergrund, da sie sowohl durch ihre hohe Effizienz als auch ihr großes Potenzial für zukünftige Anwendungen überzeugte. Besonders die NMC-Batterien etablierten sie sich als Schlüsseltechnologie, da sie mit ihrer hohen Energiedichte und verbesserten Leistungsfähigkeit neue Standards setzten. Gleichzeitig verloren Nickel-Cadmium-Akkus aufgrund ihres hohen Cadmiumgehalts und der damit verbundenen Umweltproblematik an Bedeutung. Die Europäische Union verabschiedete mit der **Richtlinie 2006/66/EG** eine Regelung, die das Inverkehrbringen von Batterien mit einem Cadmiumgehalt von mehr als 0,002 Gewichtsprozent untersagte.

4.6.1 Bleiakku

Laut **Hariprakash et al. 2004** kann durch die Verwendung leichter Kunststoffgitter in den Zellstrukturen eine gravimetrische Energiedichte von 30 bis 50 Wh/kg erreicht werden. **Valenciano et al. 2009** bestätigt eine Energiedichte von 40 Wh/kg, während **Martha et al. 2006** einen Wert von 50 Wh/kg dokumentiert.

Edwards 2001 gibt einen Wert von 35 Wh/kg während **Sullivan 2010** einen Wertebereich zwischen 35 und 50 Wh/kg verzeichnet. **Cheng 2009** dokumentiert einen Wert von 40 Wh/kg und **Chen et al. 2009** meldet eine Spanne von 30 bis 50 Wh/kg. **Pedram et al. 2010** zeigt selbe Ergebnisse, wie **Chen et al. 2009**.

Edwards 2001 dokumentiert eine volumetrische Energiedichte²⁴ von 92,3 kWh/m³, während **Ahmad 2010** im Bereich der Telekommunikation²⁵ 140 kWh/m³ nennt. **Chiriac et al. 2009** berichtet von 60,95 kWh/m³, während **Loyns et al. 2005**²⁶ und **Chen et al. 2009**²⁷ Werte zwischen 50 und 80 kWh/m³ festhalten.

Nach **Kaldellis 2008**²⁸ liegen die Kosten zwischen 218 und 280 US-Dollar pro kWh, während **Saakes et al. 2005**²⁹ 208 US-Dollar pro kWh und **McDowall 2006** 250 US-Dollar pro kWh dokumentieren. **Conte 2006** gibt 150 US-Dollar pro kWh an, während **Pedram et al. 2010** und **Chen et al. 2009** Kosten zwischen 100 und 200 US-Dollar pro kWh angegeben haben.

Edwards 2001 gibt 600 Zyklen bei einer Entladungstiefe von 80% an, während **Ruetschi 2004** eine Zyklenzahl von 1.500 dokumentiert, indem das aktive Material (Blei, Bleioxid) der Batterie unter gezielten mechanischen Druck gesetzt wird. Dieser Druck sorgt dafür, dass die Bewegung des Materials verhindert wird und die chemischen Reaktionen effizienter ablaufen, was die Lebensdauer der Batterie deutlich verlängert.

²⁴ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 92,3 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

²⁵ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 140 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

²⁶ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 50 bis 80 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

²⁷ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 50 bis 80 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

²⁸ Die Quelle gibt die Kosten in 210 bis 280 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet.

²⁹ Die Quelle gibt die Kosten in 200 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet.

Bei Valve-Regulated-Bleiakkus meldet **Ruetschi 2004** 800 Ladezyklen, während **Cheng 2009** 500 Ladezyklen angibt. **Conte 2006** verzeichnet lediglich 200 Zyklen bei 80% Entladungstiefe. **Pedram et al. 2010** dokumentiert 500 bis 800 Zyklen, während **Chen et al. 2009** 400 Zyklen festhält. Für den Einsatz in Elektrofahrzeugen gibt **Sullivan 2010** 500 bis 1.000 Zyklen an. **Chen et al. 2009** gibt 500 bis 1.000 Ladezyklen an, während **Chih-Chiang Hua 2010** hingegen nur 400 Ladezyklen dokumentiert.

Im Bereich der Ladegeschwindigkeit wurden keine relevanten Werte gefunden. Die Lebensdauer von Bleiakкумуляtoren, die auch der **Tabelle 16** entnommen werden kann, wird von **Chen et al. 2009** mit 5 bis 15 Jahren angegeben.

Tabelle 16: Übersicht der Parameter des Bleiakkus bis 2010

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	30	50
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	50	140
Kosten	US-Dollar je kWh	100	280
Ladezyklen	Zyklen	200	1500
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	13	20

4.6.2 Nickel-Cadmium-Akku

Die Nickel-Cadmium-Akkumulatoren fanden auch im Zeitraum von 2001 bis 2010 ihre Verwendung und wurden weiterhin entwickelt.

Für die gravimetrische Energiedichte dokumentiert **Chiriac et al. 2009** Werte zwischen 40 und 55 Wh/kg, während **Loyns et al. 2005** sowie **Van den Bossche et al. 2006** jeweils einen Wert von 40 Wh/kg angeben. **Lailier et al. 2001** bestätigt ebenfalls einen Bereich von 40 bis 55 Wh/kg. Höhere Werte werden von **Valsera-Naranjo et al. 2009** sowie **Pedram et al. 2010** und **Chen et al. 2009** mit 50 bis 75 Wh/kg angegeben, wobei **Valsera-Naranjo et al. 2009** sogar 50 bis 80 Wh/kg dokumentiert. **Williamson et al. 2005** gibt 55 Wh/kg für die gravimetrische Energiedichte an.

Chiriac et al. 2009³⁰ gibt eine volumetrische Energiedichte zwischen 70 und 90 kWh/m³ an, während **Loyns et al. 2005**³¹ einen Wert von 60 kWh/m³ dokumentiert. **Lailier et al. 2001**³² gibt einen Wert von 100 kWh/m³ an, während **Chen et al. 2009**³³ eine Bandbreite von 60 bis 150 kWh/m³ dokumentiert. **Pedram et al. 2010** berichtet von Kosten zwischen 800 und 1.000 US-Dollar pro kWh, während **Chen et al. 2009** einen Bereich von 800 bis 1500 US-Dollar pro kWh angibt.

Chiriac et al. 2009 dokumentiert 1.200 Ladezyklen, während **Van den Bossche et al. 2006** mit 1.350 Zyklen einen höheren Wert angibt. **Sullivan 2010** berichtet von 800 Ladezyklen. **Valsera-Naranjo et al. 2009** nennt 1.000 Ladezyklen, während **Pedram et al. 2010** sowie **Chen et al. 2009** einen Bereich von 2.000 bis 2.500 Ladezyklen dokumentieren. Im Gegensatz dazu berichtet **Chih-Chiang Hua 2010** von lediglich 500 Ladezyklen.

Die Lebensdauer von NiCd-Akkus wurde von **Chen et al. 2009** mit 10 bis 20 Jahren angegeben. Für die Ladegeschwindigkeit von NiCd-Akkus konnten keine geeigneten Werte gefunden werden, wie die **Tabelle 17** verdeutlicht.

Tabelle 17: Übersicht der Parameter des Nickel-Cadmium-Akkus bis 2010

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	40	80
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	60	150
Kosten	US-Dollar je kWh	800	1500
Ladezyklen	Zyklen	500	2500
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	10	20

³⁰ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 70 bis 90 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

³¹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 60 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

³² Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 100 Wh/dm³ an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

³³ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 60 bis 150 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

4.6.3 Nickel-Metallhydrid-Akku

Zwischen 2001 und 2010 erlebte der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator eine Weiterentwicklung hinsichtlich seiner Leistungsparameter, da er trotz der wachsenden Dominanz von Lithium-Ionen-Batterien in zahlreichen Anwendungen eine wichtige Rolle spielte.

Hariprakash et al. 2004 dokumentiert für die gravimetrische Energiedichte 60 Wh/kg, während **Chiriac 2009** einen Wertebereich von 60 bis 90 Wh/kg angibt. **Loyns et al. 2005** meldet einen Wert von 46 Wh/kg, während **Van den Bossche et al. 2006** 60 Wh/kg berichtet. **Lailier et al. 2001** gibt eine Spanne von 55 bis 70 Wh/kg an und **Sullivan 2010** dokumentiert für Elektrofahrzeuge Werte von 75 bis 95 Wh/kg. **Cheng 2009** nennt 70 Wh/kg, während **Conte 2006** 40 bis 60 Wh/kg angibt. **Valsera-Naranjo et al. 2009** berichtet von einem Wertebereich zwischen 40 und 100 Wh/kg und **Pedram et al. 2010** dokumentiert Werte zwischen 60 und 80 Wh/kg.

Die volumetrische Energiedichte beläuft sich nach **Chiriac 2009**³⁴ auf Werte von 150 bis 220 kWh/m³, dies stellt ein Maximum dar, was aus der **Tabelle 18** hervorgeht. **Loyns et al. 2005**³⁵ dokumentiert 124 kWh/m³, während **Lailier et al. 2001**³⁶ Werte von 180 bis 200 kWh/m³ angibt. **Conte 2006**³⁷ bestätigt einen Wert von 200 kWh/m³. **Pedram et al. 2010** berichtet von Kosten zwischen 450 und 1.000 US-Dollar pro kWh, zudem nennt **Conte 2006** Kosten von 500 US-Dollar pro kWh.

Chiriac 2009 dokumentiert 600 bis 1.200 Zyklen, während **Van den Bossche et al. 2006** von 1.350 Zyklen berichtet. **Shukla et al. 2001** gibt eine Spanne von 500 bis 1.000 Zyklen an, gleichzeitig notiert **Valsera-Naranjo et al. 2009** 1.000 Zyklen. **Sullivan 2010** meldet für Elektrofahrzeuge 750 bis 1.200 Zyklen, während **Cheng 2009** 800 Zyklen dokumentiert. **Conte 2006** berichtet von 2.500 oder mehr Zyklen, dabei erwähnt **Pedram et al. 2010** eine Spanne von 500 bis 1.000 Zyklen. **Chih-Chiang Hua 2010** gibt hingegen 500 Zyklen an.

³⁴ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 150 bis 220 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

³⁵ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 124 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

³⁶ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 180 bis 200 Wh/dm³ an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

³⁷ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 200 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Für die Ladegeschwindigkeit und die Lebensdauer von NiMH-Akkus wurden keine geeigneten Werte gefunden.

Tabelle 18: Übersicht der Parameter des Nickel-Metallhydrid-Akkus bis 2010

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	40	100
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	124	220
Kosten	US-Dollar je kWh	450	1000
Ladezyklen	Zyklen	500	2500
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

4.6.4 Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Zwischen 2001 und 2010 wurden Lithium-Cobaltdioxid-Akkus intensiv erforscht und weiterentwickelt. Die gravimetrische Energiedichte von Lithium-Cobaltdioxid-Akkus wird von **Chiriac 2009** mit einem Wert von 90 Wh/kg dokumentiert, während **Loyns et al. 2005** 106 Wh/kg und **Van den Bossche et al. 2006** einen Wert von 125 Wh/kg berichten. **Lailier et al. 2001** differenziert zwischen Hochenergieanwendungen mit 120 Wh/kg und hohen Entladeraten mit 60 bis 80 Wh/kg. **Sullivan 2010** nennt 75 Wh/kg, wohingegen **Cheng 2009** 110 Wh/kg dokumentiert. **Conte 2006** meldet eine Bandbreite von 100 bis 200 Wh/kg, während **Valseira-Naranjo et al. 2009** 160 Wh/kg und **Pedram et al. 2010** eine Spannweite von 100 bis 250 Wh/kg angeben. **Chen et al. 2009** berichtet von 75 bis 200 Wh/kg, **Tredeau 2009** von 140 Wh/kg und **Srinivasan 2008** von 190 Wh/kg. **Chiriac 2009**³⁸ nennt 150 kWh/m³ für die volumetrische Energiedichte, hingegen **Loyns et al. 2005**³⁹ dokumentiert 137 kWh/m³. **Conte 2006**⁴⁰ gibt eine Spanne von 150 bis 250 kWh/m³ an, während **Chen et al. 2009**⁴¹ Werte zwischen 200 und 500 kWh/m³ nennt.

³⁸ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 150 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

³⁹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 137 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁴⁰ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 150 bis 250 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁴¹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 200 bis 500 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Cheng 2009 dokumentiert die Batteriekosten mit einem Wert von 5.000 US-Dollar pro kWh, dabei meldet **Conte 2006** 800 US-Dollar pro kWh. **Pedram et al. 2010** berichtet von einer Spanne zwischen 600 und 2.500 US-Dollar pro kWh, während **Chen et al. 2009** eine Preisspanne von 1.200 bis 4.000 US-Dollar pro kWh angibt.

Van den Bossche et al. 2006 dokumentiert 1.000 Zyklen, während **Chiriac et al. 2009** dieses unterstreicht. **Cheng 2009** bestätigt ebenfalls 1.000 Zyklen, während **Conte 2006** 2.500 Zyklen dokumentiert. **Valsera-Naranjo et al. 2009** meldet 1.200 Zyklen, wohingegen **Pedram et al. 2010** und **Chen et al. 2009** ein Minimum von 1.000 Zyklen nennen. **Chih-Chiang Hua 2010** berichtet hingegen von über 500 Zyklen. Die Lebensdauer von Lithium-Cobaltdioxid-Akkus wurde von **Chen et al. 2009** mit fünf bis 15 Jahren angegeben.

Für die Ladegeschwindigkeit von Lithium-Cobaltdioxid-Akkus wurden in der Literatur keine geeigneten Werte gefunden, wie der **Tabelle 19** entnommen werden kann.

Tabelle 19: Übersicht der Parameter des Lithium-Cobaltdioxid-Akku bis 2010

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	75	250
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	137	500
Kosten	US-Dollar je kWh	600	5000
Ladezyklen	Zyklen	500	2500
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	5	15

4.6.5 Lithium-Eisenphosphat-Akku

Zwischen 2001 und 2010 wurden Lithium-Eisenphosphat-Akkus als vielversprechende Alternative zu anderen Lithium-Ionen-Chemien wie LCO, NMC und NCA betrachtet. Während sich die Forschung und Anwendung in diesem Zeitraum noch in einem frühen Stadium befand, dokumentieren mehrere Studien bereits die Leistungsparameter dieser Technologie.

DiLeo et al. 2010 dokumentiert eine gravimetrische Energiedichte von 132 Wh/kg, wohingegen **Tredeau 2009** über einen niedrigeren Energiedichte von 100 Wh/kg berichtet. **Hülsebusch et al. 2010** differenziert zwischen Zell- und Systemenergiedichte und gibt 108 Wh/kg für Zellen und 83 Wh/kg für vollständige Batteriesysteme an. Der chinesische Automobilhersteller BYD produzierte LFP-Zellen mit einer Energiedichte von 140 Wh/kg speziell für Elektrofahrzeuge, wie **Lowe et al. 2010** berichtet. **Axsen 2008** dokumentiert 90 Wh/kg. Für die volumetrische Energiedichte berichtet **Gu et al. 2007**⁴² von Werten zwischen 179,9 kWh/m³ und 226,9 kWh/m³. **Ferguson et al. 2008**⁴³ dokumentiert 128 kWh/m³ für militärische Anwendungen.

Die Kosten von LFP-Akkus werden nur von einer Quelle dokumentiert, wie aus **Tabelle 20** ersichtlich wird. **Choi et al. 2010** berichtet von etwa 300 US-Dollar pro kWh für stationäre Anwendungen. Die Ladezyklen von LFP-Akkus werden von **Gu et al. 2007** mit 1.664 Zyklen erwähnt, während **Chih-Chiang Hua 2010** über 2.000 Ladezyklen dokumentiert. **Choi et al. 2010** meldet sogar mehr als 3.000 Ladezyklen für stationäre Anwendungen.

Im betrachteten Zeitraum konnten für die Ladegeschwindigkeit und Lebensdauer von LFP-Akkus keine relevanten Daten identifiziert werden, wie die **Tabelle 20** verdeutlicht.

Tabelle 20: Übersicht der Parameter des LFP-Akkus bis 2010

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	83	140
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	128	226,9
Kosten	US-Dollar je kWh	300	
Ladezyklen	Zyklen	1664	3000
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

⁴² Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 179,9 bis 226,9 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁴³ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 128 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

4.6.6 Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Zwischen 2001 und 2010 wurden Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid-Akkus nur begrenzt wissenschaftlich untersucht. Die meisten Veröffentlichungen zu NMC-Akkus stammen aus der Zeit nach 2010, als die Forschung insbesondere im Bereich der Elektrofahrzeuge stark intensiviert wurde. Vor 2010 lag der Schwerpunkt nicht auf dieser Lithium-Ionen-Chemie. Dennoch können einige Erkenntnisse zur frühen Entwicklungsphase der NMC-Technologie gewonnen werden, die ihre Entwicklung und das vorhandene Potenzial beleuchten. Der NMC-Akku wurde nach der Patentschrift **Lu 2005** im Jahr 2001 erfunden und erstmals nach **Zubi et al. 2018** im Jahr 2008 im Chevrolet Volt eingesetzt.

Die gravimetrische Energiedichte von NMC-Akkus zeigt bereits vor 2010 ein beachtliches Potenzial. **Hülsebusch et al. 2010** berichtet von einer Zellenergiedichte von 196 Wh/kg und einer Systemenergiedichte von 151 Wh/kg. **Lowe et al. 2010** dokumentiert eine Energiedichte von 150 Wh/kg, die von der Firma LG Chem speziell für Elektrofahrzeuge produziert wurde. **Axsen 2008** gibt einen Wert von 140 Wh/kg an. Die Kosten von NMC-Akkus werden in einer Veröffentlichung dokumentiert. **Choi et al. 2010** berichtet von etwa 285 US-Dollar pro kWh für stationäre Anwendungen.

Für die volumetrische Dichte, Anzahl der Ladezyklen, Ladegeschwindigkeit und Lebensdauer von NMC-Akkus sind in der Literatur vor 2010 keine spezifischen Daten verfügbar, weshalb hierfür in **Tabelle 21** keine Einträge vorhanden sind.

Tabelle 21: Übersicht der Parameter des NMC-Akkus bis 2010

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	140	196
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	Keine Information	
Kosten	US-Dollar je kWh	285	
Ladezyklen	Zyklen	Keine Information	
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

4.6.7 Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid-Akku

Zwischen 2001 und 2010 wurden Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkus aufgrund ihrer hohen Energiedichte und guten Leistungsfähigkeit als eine vielversprechende Variante unter den Lithium-Ionen-Chemien betrachtet. Viele wissenschaftliche Studien und technische Analysen zu NCA-Akkus stammen erst aus der Zeit nach 2010.

Lowe et al. 2010 berichtet von einer gravimetrischen Energiedichte von 160 Wh/kg, die von den Firmen JCI/SAFT speziell für den Einsatz in Elektrofahrzeugen produziert wurde. Die volumetrische Energiedichte wird ebenfalls in begrenztem Umfang veröffentlicht. **Ferguson et al. 2008**⁴⁴ dokumentiert einen Wert von 175 kWh/m³ für militärische Anwendungen.

Die Kosten von NCA-Akkus wurden in einer Studie quantifiziert. **Choi et al. 2010** berichtet von etwa 280 US-Dollar pro kWh, wobei dieser Wert sich auf stationäre Anwendungen bezieht.

Aus der **Tabelle 22** wird ersichtlich das für die Anzahl der Ladezyklen und für die Ladegeschwindigkeit von NCA-Akkus bis 2010 keine geeigneten Quellen gefunden werden konnten.

Tabelle 22: Übersicht der Parameter des NCA-Akkus bis 2010

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	160	
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	175	
Kosten	US-Dollar je kWh	280	
Ladezyklen	Zyklen	Keine Information	
Ladegeschwindigkeit	C	Keine Information	
Lebensdauer	Jahre	Keine Information	

⁴⁴ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 175 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

4.7 Akkumulatoren bis 2024

Zwischen 2011 und 2024 erlebte die Batterietechnologie erhebliche Fortschritte, die maßgeblich dazu beitrugen, die Elektromobilität als eine wettbewerbsfähige Alternative zu traditionellen Antriebsarten zu etablieren. Insbesondere die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterie stellte einen entscheidenden Wendepunkt dar.

4.7.1 Bleiakku

Zwischen 2011 und 2024 erlebte der Bleiakкумулятор trotz wachsender Konkurrenz durch Lithium-Ionen-Technologien eine anhaltende Nutzung in spezifischen Anwendungen wie stationären Energiespeichern Notstromsystemen und als Starterbatterien in Fahrzeugen.

Die gravimetrische Energiedichte von Bleiakkus zeigt einen erheblichen Wertebereich. **Berndt 2014** und **Sabihuddin et al. 2015** berichten von Werten von 20 bis 50 Wh/kg und 10 bis 50 Wh/kg. **Shah Bukhari et al. 2015** dokumentiert eine Energiedichte von 60 Wh/kg, während **Jafari 2020** sowie **Kurzweil 2017** über eine gravimetrische Energiedichte von 30 bis 40 Wh/kg bzw. 35 Wh/kg berichten. **Honsberg 2019** dokumentiert 30 bis 50 Wh/kg, **Kitaronka 2022** 30 bis 45 Wh/kg und **Šimić et al. 2021** einem Wertebereich von 25 bis 50 Wh/kg.

Berndt 2014⁴⁵ berichtet von 60 bis 100 kWh/m³ für die volumetrische Energiedichte, während **Sabihuddin et al. 2015** einen Bereich von 25 bis 90 kWh/m³ notiert und **Šimić et al. 2021** diese mit derselben Angabe bestätigt. **Jafari 2020**⁴⁶ dokumentiert Werte zwischen 60 und 75 kWh/m³, während **Kitaronka 2022**⁴⁷ über eine volumetrische Energiedichte von 50 bis 80 kWh/m³ berichtet.

⁴⁵ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 60 bis 100 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁴⁶ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 60 bis 75 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁴⁷ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 50 bis 80 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Sabihuddin et al. 2015 berichtet von Kosten ab 50 US-Dollar pro kWh, während **Jafari 2020** sowie **Budde-Meiwes et al. 2013**⁴⁸ Werte von 26 bis 42 US-Dollar pro kWh für OEMs und 104 bis 187 US-Dollar pro kWh im Aftermarket dokumentieren. **Kurzweil 2017** gibt einen Wert von 80 US-Dollar pro kWh an, während **Šimić et al. 2021**⁴⁹ Kosten von 42 bis 177 US-Dollar pro kWh meldet.

Die Anzahl der Ladezyklen wird von **Shah Bukhari et al. 2015** mit 450 Zyklen angegeben, während **Kurzweil 2017** für eine 90 Ah AGM-Batterie 700 Ladezyklen dokumentiert. **Honsberg 2019** nennt 200 bis 300 Ladezyklen bei einer Entladungstiefe von 80%, während **Kitaronka 2022** eine Breite von 250 bis 1.500 Ladezyklen und **Šimić et al. 2021** 250 bis 2.000 Ladezyklen verzeichnet.

Honsberg 2019 berichtet von einer Schnellladedauer von acht bis 16 Stunden, wobei die beste Ladegeschwindigkeit bei 0,2C lag. Kurzfristig konnten Spitzenlasten von 5C erreicht werden. **Sabihuddin et al. 2015** gibt eine Lebensdauer von drei bis 20 Jahren an, während **Šimić et al. 2021** eine Spanne von zwei bis 15 Jahren und **Shah Bukhari et al. 2015** nur zwei bis drei Jahre nennen.

Kurzweil 2017 gibt eine Lebensdauer von drei bis fünf Jahren an, während **Kitaronka 2022** Werte zwischen fünf und 15 Jahren dokumentiert. Dieser sehr breite Wertebereich wird aus der **Tabelle 23** ersichtlich.

Tabelle 23: Übersicht der Parameter des Bleiakkus bis 2024

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	10	60
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	25	100
Kosten	US-Dollar je kWh	26	187
Ladezyklen	Zyklen	200	2000
Ladegeschwindigkeit	C	0,2C	5C
Lebensdauer	Jahre	2	20

⁴⁸ Die Quelle gibt die Kosten in 25 bis 40 Euro und 100 bis 180 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁴⁹ Die Quelle gibt die Kosten in 40 bis 170 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

4.7.2 Nickel-Cadmium-Akku

Zwischen 2011 und 2024 behielten Nickel-Cadmium-Akkumulatoren trotz der zunehmenden Dominanz moderner Lithium-Ionen-Technologien ihre Relevanz. **Berndt 2014** berichtet von Werten für die gravimetrische Energiedichte zwischen 20 und 50 Wh/kg, während **Sabihuddin et al. 2015** einen Wertebereich von 10 bis 80 Wh/kg dokumentiert. **Jafari 2020** verzeichnet Werte zwischen 40 und 60 Wh/kg. **Kurzweil 2017** gibt eine Energiedichte von 50 Wh/kg an und **Honsberg 2019** berichtet von 45 bis 80 Wh/kg. **Šimić et al. 2021** verzeichnet einen Wertebereich für die gravimetrische Energiedichte von 30 bis 80 Wh/kg.

Die volumetrische Energiedichte wird von **Berndt 2014**⁵⁰ mit Werten zwischen 40 und 60 kWh/m³ dokumentiert, während **Sabihuddin et al. 2015** eine Bandbreite von 15 bis 150 kWh/m³ angibt. **Jafari 2020**⁵¹ verzeichnet Werte von 50 bis 150 kWh/m³ und **Šimić et al. 2021** bestätigt diese Werte mit einer Spanne von 15 bis 150 kWh/m³.

Sabihuddin et al. 2015 dokumentiert einen Kostenbereich von 330 bis 3.500 US-Dollar pro kWh, während **Jafari 2020**⁵² sowie **Budde-Meiwes et al. 2013**⁵³ Werte von 208 bis 520 US-Dollar pro kWh für OEMs berichten. **Kurzweil 2017** notiert Kosten von 450 US-Dollar pro kWh, während **Šimić et al. 2021**⁵⁴ von Kosten zwischen 707 bis 1.352 US-Dollar pro kWh dokumentiert.

Sabihuddin et al. 2015 berichtet von 300 Ladezyklen, während **Kurzweil 2017** 1.500 Ladezyklen dokumentiert. **Honsberg 2019** gibt 1.000 Zyklen bei einer Entladungstiefe von 80% an, während **Šimić et al. 2021** eine Anzahl von 1.000 Zyklen angibt.

⁵⁰ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 40 bis 60 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁵¹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 50 bis 150 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁵² Die Quelle gibt die Kosten in 200 bis 500 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁵³ Die Quelle gibt die Kosten in 200 bis 500 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁵⁴ Die Quelle gibt die Kosten in 680 bis 1.300 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

Honsberg 2019 dokumentiert eine Ladegeschwindigkeit von bis zu 1C und eine Spitzenlastfähigkeit von 20C. Die Schnellladedauer beträgt in einigen Anwendungen lediglich eine Stunde. Die Lebensdauer von NiCd-Akkus wurde auf zwei bis 20 Jahre geschätzt, abhängig von den Betriebsbedingungen. **Sabihuddin et al. 2015** dokumentiert diese Spannweite, die der **Tabelle 24** entnommen werden kann.

Tabelle 24: Übersicht der Parameter des Nickel-Cadmium-Akkus bis 2024

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	10	80
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	15	150
Kosten	US-Dollar je kWh	208	3500
Ladezyklen	Zyklen	300	1500
Ladegeschwindigkeit	C	1C	20C
Lebensdauer	Jahre	2	20

4.7.3 Nickel-Metallhydrid-Akku

Zwischen 2011 und 2024 blieben Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren eine wichtige Energiespeichertechnologie, insbesondere in Anwendungen wie Hybridfahrzeugen, tragbaren Geräten und stationären Energiesystemen.

Berndt 2014 berichtet von gravimetrischen Energiedichten im Bereich 50 und 60 Wh/kg, während **Sabihuddin et al. 2015** eine größere Spannweite von 30 bis 90 Wh/kg dokumentiert. **Jafari 2020** gibt eine Spanne zwischen 30 und 80 Wh/kg, wobei **Kurzweil 2017** über einen Spitzenwert von 90 Wh/kg berichtet. **Honsberg 2019** dokumentiert eine Bandbreite von 60 bis 120 Wh/kg, während **Šimić et al. 2021** Werte zwischen 40 und 110 Wh/kg erwähnt. **Berndt 2014**⁵⁵ dokumentiert Werte zwischen 50 und 70 kWh/m³, während **Sabihuddin et al. 2015** eine Spanne von 38,9 bis 300 kWh/m³ angibt. **Jafari 2020**⁵⁶ berichtet von 140 bis 300 kWh/m³ und **Šimić et al. 2021** bestätigt Werte zwischen 40 und 300 kWh/m³.

⁵⁵ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 50 bis 70 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁵⁶ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 140 bis 300 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Sabihuddin et al. 2015 erwähnt Kosten zwischen 200 und 729 US-Dollar pro kWh, während **Jafari 2020**⁵⁷ sowie **Budde-Meiwes et al. 2013**⁵⁸ Werte von 286 bis 573 pro kWh für OEMs nennen. Für Hybridfahrzeuge liegen die Kosten laut der Veröffentlichung von **Jafari 2020**⁵⁹ bei etwa 625 US-Dollar pro kWh. **Kurzweil 2017** meldet eine Bandbreite von 200 US-Dollar pro kWh für Zellen und für Endverbraucher bis 650 US-Dollar pro kWh für industrielle Batterien. **Šimić et al. 2021**⁶⁰ ergänzt diese Daten mit Kosten von 177 bis 666 US-Dollar pro kWh.

Die Anzahl der Ladezyklen wird von **Sabihuddin et al. 2015** mit 300 bis 3.000 Zyklen berichtet, während **Kurzweil 2017** eine Anzahl von 1.000 Ladezyklen dokumentiert. **Honsberg 2019** meldet 300 bis 500 Zyklen bei einer Entladungstiefe von 80%, während **Šimić et al. 2021** Werte zwischen 300 und 1.800 Zyklen angibt. **Honsberg 2019** dokumentiert eine maximale Ladegeschwindigkeit von 0,5C, wobei Spitzenlasten von bis zu 5C möglich waren. Die Schnellladedauer lag typischerweise zwischen zwei und vier Stunden. Die Lebensdauer von NiMH-Akkus wird mit zwei bis 15 Jahre angegeben. Sowohl **Sabihuddin et al. 2015** als auch **Šimić et al. 2021** dokumentieren diese Spannweite, die in **Tabelle 25** veranschaulicht wird.

Tabelle 25: Übersicht der Parameter des Nickel-Metallhydrid-Akkus bis 2024

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	30	120
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	38,9	300
Kosten	US-Dollar je kWh	170	729
Ladezyklen	Zyklen	300	3000
Ladegeschwindigkeit	C	0,5C	5C
Lebensdauer	Jahre	2	15

⁵⁷ Die Quelle gibt die Kosten in 275 bis 550 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁵⁸ Die Quelle gibt die Kosten in 275 bis 550 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁵⁹ Die Quelle gibt die Kosten in 600 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁶⁰ Die Quelle gibt die Kosten in 170 bis 640 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

4.7.4 Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Zwischen 2011 und 2024 etablierten sich Lithium-Cobaltdioxid-Akkumulatoren als die führende Energiespeichertechnologie in einer Vielzahl von Anwendungen, darunter tragbare Geräte und stationäre Energiespeicher.

Ubaldi 2023 berichtet von Werten zwischen 150 und 200 Wh/kg für die gravimetrische Energiedichte, während **Sabihuddin et al. 2015** eine größere Spannweite von 30 bis 300 Wh/kg dokumentiert. **Shah Bukhari et al. 2015** berichtet über Spitzenwerte von 250 Wh/kg, hingegen **Jafari 2020** 160 Wh/kg und **Kurzweil 2017** 200 Wh/kg verzeichnen. **Honsberg 2019** gibt Werte von 150 bis 190 Wh/kg an, **Šimić et al. 2021** dokumentiert Werte zwischen 80 und 250 Wh/kg wobei **Shah Bukhari et al. 2015** einen Wertebereich von 110 bis 160 Wh/kg nennt. **Kurzweil 2017** berichtet von 90 bis 180 Wh/kg.

Sabihuddin et al. 2015 beschreibt eine Bandbreite für die volumetrische Energiedichte von 94 bis 500 kWh/m³, während **Jafari 2020**⁶¹ 270 kWh/m³ und **Kurzweil 2017**⁶² Werte zwischen 220 und 350 kWh/m³ notieren. **Šimić et al. 2021** ergänzte diese Zahlen mit einer Spannweite von 95 bis 500 kWh/m³.

Sabihuddin et al. 2015 berichtet von Kosten zwischen 200 und 4.000 US-Dollar pro kWh, während **Jafari 2020**⁶³ sowie **Budde-Meiwes et al. 2013**⁶⁴ eine Preisspanne von 208 bis 521 US-Dollar pro kWh dokumentieren, wobei die Kosten der Zellen pro kWh für Hybridfahrzeuge nach **Jafari 2020**⁶⁵ bei 417 bis 833 US-Dollar liegen. **Kurzweil 2017** meldet Werte von 170 US-Dollar pro kWh für Zellen für Endverbraucher und einen Preis von 350 US-Dollar pro kWh für industrielle Batterien.

⁶¹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 270 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁶² Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 220 bis 350 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁶³ Die Quelle gibt die Kosten in 200 bis 500 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁶⁴ Die Quelle gibt die Kosten in 200 bis 500 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁶⁵ Die Quelle gibt die Kosten in 400 bis 800 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

Šimić et al. 2021⁶⁶ ergänzt diese Zahlen mit einer Preisspanne von 521 bis 2.187 US-Dollar pro kWh.

Sabihuddin et al. 2015 gibt die Anzahl der Ladezyklen von Lithium-Cobaltdioxid-Akkus mit 250 bis 1.000 Zyklen an, während **Shah Bukhari et al. 2015** 1.000 Zyklen bei 80% Entladungstiefe dokumentiert. **Kurzweil 2017** dokumentiert 1.000 bis 1.500 Ladezyklen und **Honsberg 2019** nennt 500 bis 1.000 Zyklen bei 80% Entladungstiefe. **Šimić et al. 2021** ergänzt diese Zahlen mit einer Bandbreite von 100 bis 1.000 Ladezyklen. **Honsberg 2019** dokumentierte Ladegeschwindigkeiten zwischen 1C und 3C bei Spitzenlast, dieser Bereich kann der **Tabelle 26** entnommen werden. Die Lebensdauer von Lithium-Cobaltdioxid-Akkus variiert zwischen zwei und 20 Jahren, abhängig von den Nutzungsbedingungen. **Sabihuddin et al. 2015** dokumentiert diese Spannweite, während **Shah Bukhari et al. 2015** eine Lebensdauer von fünf bis sechs Jahren und **Šimić et al. 2021** Werte zwischen fünf und 15 Jahren angibt.

Tabelle 26: Übersicht der Parameter des sich Lithium-Cobaltdioxid-Akkus bis 2024

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	30	300
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	94	500
Kosten	US-Dollar je kWh	170	4000
Ladezyklen	Zyklen	100	1500
Ladegeschwindigkeit	C	1C	3C
Lebensdauer	Jahre	2	20

4.7.5 Lithium-Eisenphosphat-Akku

Lithium-Eisenphosphat-Akkus haben sich im Zeitraum von 2011 bis 2024 zu einer etablierten Energiespeicherlösung entwickelt. Die gravimetrische Energiedichte von LFP-Akkus liegt in diesem Zeitraum nach **Ubaldi 2023** zwischen Werten von 90 und 120 Wh/kg, **Jafari 2020** beschreibt eine ähnliche Spannweite von 80 bis 120 Wh/kg. **Kurzweil 2017** weist auf höhere Werte für spezifische Anwendungen hin.

⁶⁶ Die Quelle gibt die Kosten in 500 bis 2.100 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

Der Einsatz im Bluecar von Bolloré erreichte 228 Wh/kg, während im Coda EV 116 Wh/kg gemessen wurden. Weitere Studien, wie beispielsweise **Kurzweil 2017** liefern Angaben von 80 bis 129 Wh/kg. **Das et al. 2021** beschreibt die gravimetrische Energiedichte mit 137 Wh/kg. **Honsberg 2019** und **Porzio 2021** ergänzen diese Werte mit Spannen zwischen 90 und 140 Wh/kg. **Hasselwander et al. 2023** berichtet über aktuelle Werte von 160 bis 190 Wh/kg.

Jafari 2020⁶⁷ führt 170 kWh/m³ für die volumetrische Energiedichte an, während **Kurzweil 2017**⁶⁸ spezifische Werte für Anwendungen wie den Bluecar von Bolloré mit 364 kWh/m³ und den Coda EV mit 226 kWh/m³ hervorhebt. Die Studie von **Das et al. 2021**⁶⁹ ergibt eine volumetrische Energiedichte von 237 kWh/m³. **Hasselwander et al. 2023** hingegen verzeichnet Werte von 320 bis 360 kWh/m³.

Jafari 2020⁷⁰ und **Budde-Meiwes et al. 2013**⁷¹ geben Kosten zwischen 208 und 521 US-Dollar pro kWh für OEMs an, wobei hybride Anwendungen nach **Jafari 2020**⁷² zwischen 417 und 833 US-Dollar pro kWh erfordern. **Kurzweil 2017** und **Das et al. 2021** nennen jeweils 150 US-Dollar pro kWh, während **Hasselwander et al. 2023**⁷³ einen Kostenpunkt von 56 bis 114 US-Dollar pro kWh angibt.

Kurzweil 2017 vermerkt über 2.000 Zyklen und erwähnt für eine 60 Ah-Batterie 820 Zyklen. **Das et al. 2021** beziffert 3.600 Zyklen bei 80% Entladungstiefe, während **Honsberg 2019** Werte zwischen 1.000 und 2.000 Zyklen bei ähnlichen Bedingungen angibt. **Porzio 2021** fügt hinzu, dass über 3.000 Zyklen erreicht werden können und **Hasselwander et al. 2023** dieses bestätigt und mit 3.500 Ladezyklen erweitert.

⁶⁷ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 170 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁶⁸ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 364 und 226 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁶⁹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 237 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁷⁰ Die Quelle gibt die Kosten in 200 bis 500 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁷¹ Die Quelle gibt die Kosten in 200 bis 500 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁷² Die Quelle gibt die Kosten in 400 bis 800 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

⁷³ Die Quelle gibt die Kosten in 54 bis 110 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

Das et al. 2021 spricht von einer Ladegeschwindigkeit von 1C, während **Honsberg 2019** Spitzenwerte von bis zu 10C und kurzfristig sogar 30C für Spitzenlasten angibt, was einen Höchstwert markiert und aus der **Tabelle 27** entnommen werden kann. **John 2024** gibt eine Lebensdauer von fünf bis 15 Jahren an. **Kurzweil 2017** nennt zehn Jahre und **Porzio 2021** betont eine Haltbarkeit von acht bis 12 Jahren.

Tabelle 27: Übersicht der Parameter des LFP-Akkus bis 2024

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	80	190
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	170	360
Kosten	US-Dollar je kWh	56	833
Ladezyklen	Zyklen	820	3600
Ladegeschwindigkeit	C	1C	30C
Lebensdauer	Jahre	5	15

4.7.6 Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Zwischen 2011 und 2024 wurde die Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid-Technologie als führende Speichertechnologie für zahlreiche Anwendungen weiterentwickelt. **Ubaldi 2023** nennt eine für die gravimetrische Energiedichte eine Spannweite von 150 bis 220 Wh/kg, während **Kurzweil 2017** spezifische Anwendungen untersucht und 140 Wh/kg für den Einsatz im Smart sowie 89 Wh/kg im Honda Fit dokumentiert. Höhere Werte von 180 Wh/kg werden ebenfalls von **Kurzweil 2017** für andere Anwendungsfälle gemeldet. **Hasselwander et al. 2023** gibt für die unterschiedlichen Zellchemien des NMC-Akkus verschiedene Werte an. Für NMC-111 liegt die gravimetrische Energiedichte zwischen 150 und 190 Wh/kg, während sie bei NMC-532 170 bis 220 Wh/kg beträgt. NMC-622 erreicht Werte von 200 bis 280 Wh/kg, während NMC-811 eine gravimetrische Energiedichte im Bereich von 240 bis 340 Wh/kg bietet. Noch leistungsfähigere Varianten erreichen laut **Das et al. 2021** Energiedichten zwischen 170 und 250 Wh/kg, ergänzt durch Angaben von **Porzio 2021** mit 140 bis 200 Wh/kg. **Keil et al. 2015** gibt einen Energiedichte von 170 Wh/kg an.

Kurzweil 2017⁷⁴ berichtet über eine volumetrische Energiedichten von 270 kWh/m³ für den Einsatz im Smart und 200 kWh/m³ für den Honda Fit. **Das et al. 2021**⁷⁵ dokumentiert Spitzenwerte zwischen 355 und 500 kWh/m³. **Hasselwander et al. 2023**⁷⁶ differenziert zwischen den verschiedenen Zellchemien von NMC-Akkus⁷⁷. Dabei wird für NMC-111 eine volumetrische Energiedichte von 300 bis 450 kWh/m³ angegeben, für NMC-532 ein Bereich von 450 bis 500 kWh/m³, für NMC-622 Werte zwischen 550 und 650 kWh/m³ und für NMC-811 eine Energiedichte von 550 bis 740 kWh/m³.

Nach **Das et al. 2021** betragen die Batteriekosten 130 US-Dollar pro kWh, während **Hasselwander et al. 2023** für die Zellchemie NMC-111 Kosten von 122 bis 140 US-Dollar pro kWh angibt. Für NMC-532 werden 112 bis 131 US-Dollar pro kWh verzeichnet und für NMC-622 94 bis 112 US-Dollar pro kWh angegeben. Der NMC-811 wird mit 84 bis 94 US-Dollar pro kWh beziffert.

Über die Anzahl von Ladezyklen vom NMC-Akku berichtet **Das et al. 2021** eine Anzahl von 3.000 Zyklen bei 80% Entladetiefe, während **Porzio 2021** mehr als 2.000 Zyklen dokumentiert. **Hasselwander et al. 2023** differenziert unter den verschiedenen Zellchemien. NMC-111 erreicht 1.000 bis 1.800 Zyklen, NMC-532 und NMC-622 jeweils 1.000 bis 1.500 Zyklen, während NMC-811 eine Lebensdauer von 1.000 bis 1.200 Zyklen aufweist.

Die Ladegeschwindigkeit von NMC-Akkus werden mit einer C-Rate von 1C angegeben, wie **Das et al. 2021** und **Keil et al. 2015** berichten. Dieser Wert kann der **Tabelle 28** entnommen werden. **Porzio 2021** berichtet von einer Lebensdauer von acht bis zehn Jahren, während **Shafique 2022** eine Spannweite von fünf bis zehn Jahren angibt.

⁷⁴ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 270 und 200 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁷⁵ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 355 und 500 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁷⁶ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 300 bis 450 Wh/L, 450 bis 500 Wh/L, 550 bis 650 Wh/L und 550 bis 740 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁷⁷ Die NMC-Akkus haben je nach Zellchemien unterschiedliche Nummern. (Bsp.: NMC-111, NMC- 532)

Tabelle 28: Übersicht der Parameter des NMC-Akkus bis 2024

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	89	340
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	200	740
Kosten	US-Dollar je kWh	84	140
Ladezyklen	Zyklen	1000	3000
Ladegeschwindigkeit	C	1C	
Lebensdauer	Jahre	5	15

4.7.7 Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkus haben sich zwischen 2011 und 2024 zu einem wichtigen Bestandteil moderner Energiespeichertechnologien entwickelt.

Ihr Einsatz in Elektrofahrzeugen wie dem Tesla Model S, nach **Kurzweil 2017**, unterstreicht ihre Bedeutung für Anwendungen, die eine hohe Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Energieeffizienz erfordern.

Ubaldi 2023 führt Werte von 200 bis 260 Wh/kg an, während **Kurzweil 2017** spezifische Anwendungen wie den Tesla Model S mit 233 Wh/kg sowie für weitere Einsatzgebiete mit 140 Wh/kg beschreibt. Höhere Werte werden von **Das et al. 2021** angegeben, der eine Spannweite von 240 bis 300 Wh/kg nennt. **Porzio 2021** ergänzt diese Angaben mit 200 bis 250 Wh/kg. **Keil et al. 2015** verweist auf einen Wert von 220 Wh/kg während **Hasselwander et al. 2023** eine Spanne von 240 bis 340 Wh/kg angibt.

Kurzweil 2017⁷⁸ gibt für den Tesla Model S eine volumetrische Energiedichte von 630 kWh/m³ an, während **Das et al. 2021**⁷⁹ Werte von bis zu 670 kWh/m³ nennt. **Hasselwander et al. 2023**⁸⁰ ergänzt die volumetrische Energiedichte mit 700 bis 750 kWh/m³.

⁷⁸ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 630 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁷⁹ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 670 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

⁸⁰ Die Quelle gibt die volumetrische Energiedichte in 700 bis 750 Wh/L an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in kWh/m³ umgerechnet.

Laut **Das et al. 2021** lagen die Kosten bei etwa 120 US-Dollar pro kWh und wurden von **Hasselwander et al 2023**⁸¹ mit 75 bis 135 US-Dollar pro kWh ergänzt.

Das et al. 2021 berichtet von 500 Ladezyklen, was ein Minimum markiert und aus der **Tabelle 29** hervorgeht, bei einer Entladetiefe von 80%, während **Porzio 2021** von mehr als 2.000 Zyklen spricht. **Hasselwander et al. 2023** fügt eine Ladezyklenanzahl von 1.000 bis 1.600 hinzu. Die maximale Ladegeschwindigkeit wird von **Das et al. 2021** und **Keil et al. 2015** mit 0,5C angegeben. Die Lebensdauer von NCA-Akkus erstreckt sich typischerweise über acht bis zehn Jahre, wie **Porzio 2021** angibt.

Tabelle 29: Übersicht der Parameter des NCA-Akkus bis 2024

Parameter/ Kriterium	Einheit	Minimum	Maximum
Grav. Energiedichte	Wh/kg	140	340
Vol. Energiedichte	kWh/m ³	630	750
Kosten	US-Dollar je kWh	75	135
Ladezyklen	Zyklen	500	2000
Ladegeschwindigkeit	C	0,5C	
Lebensdauer	Jahre	8	10

⁸¹ Die Quelle gibt die Kosten in 72 bis 130 Euro pro kWh an. Dieser Wert wurde zu Zwecken der Vereinheitlichung in US-Dollar pro kWh umgerechnet und gerundet. (Umrechnungskurs 1 Euro = 1,04 US-Dollar am 26.12.2024)

5 Trendanalyse der marktreifen Speichertechnologien

In diesem Kapitel werden die technologischen und wirtschaftlichen Trends marktreifer Energiespeichertechnologien analysiert. Ziel ist es, sowohl langfristige Entwicklungen in der Kapazitätssteigerung als auch die Reduktion der Kosten und die Effizienzsteigerungen der in dieser Arbeit behandelten Speicherlösungen einheitlich aufzuzeigen. Folglich wird untersucht, ob die analysierten Parameter sich für eine Extrapolation eignen. Dabei steht die Frage im Fokus, ob die identifizierten Trends ausreichend stabil und konsistent sind, um fundierte Vorhersagen über zukünftige Entwicklungen zu treffen. Das Kapitel versucht somit nicht nur eine detaillierte Betrachtung der technologischen Trends zu liefern, sondern ein theoretisches Fundament zu schaffen, um mögliche Grenzen und Potenziale dieser Entwicklungen zu erkennen.

5.1 Identifikation erkennbarer Trends

Im Folgenden werden die Trends der behandelten Parameter von Akkumulatoren analysiert, um deren Entwicklung und Zukunftspotenzial zu bewerten. Jede Akkutechnologie wird dabei separat betrachtet, um eine detaillierte und differenzierte Analyse der spezifischen Anforderungen an Energiespeicher für die Verwendung in Elektrofahrzeugen zu ermöglichen. Zudem findet über die einzelne Betrachtung hinaus eine ganzheitliche Analyse statt, um die Entwicklung der Gesamtheit im Kontext der Elektromobilität zu bewerten. Die aus der Datenerhebung gewonnenen Daten werden hierbei als Diagrammen visualisiert. Dabei werden sowohl die aus der Regressionsanalyse abgeleiteten Trendlinien als auch die Grenzlinien genutzt, um die Entwicklung der Parameter anschaulich darzustellen.

5.1.1 Trends der Markteintritte

In diesem Abschnitt wird die zeitliche Entwicklung der Markteinführung verschiedener Batterietechnologien analysiert und in **Abbildung 13** dargestellt. Basierend auf den Ergebnissen der Datenrecherche wurden die Zeitspannen zwischen der Entwicklung und dem tatsächlichen Einsatz in der Mobilität für jede Batterietechnologie separat dargestellt. Dies ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Geschwindigkeit, mit der neue Technologien von der Forschung bis zur industriellen Anwendung gelangen.

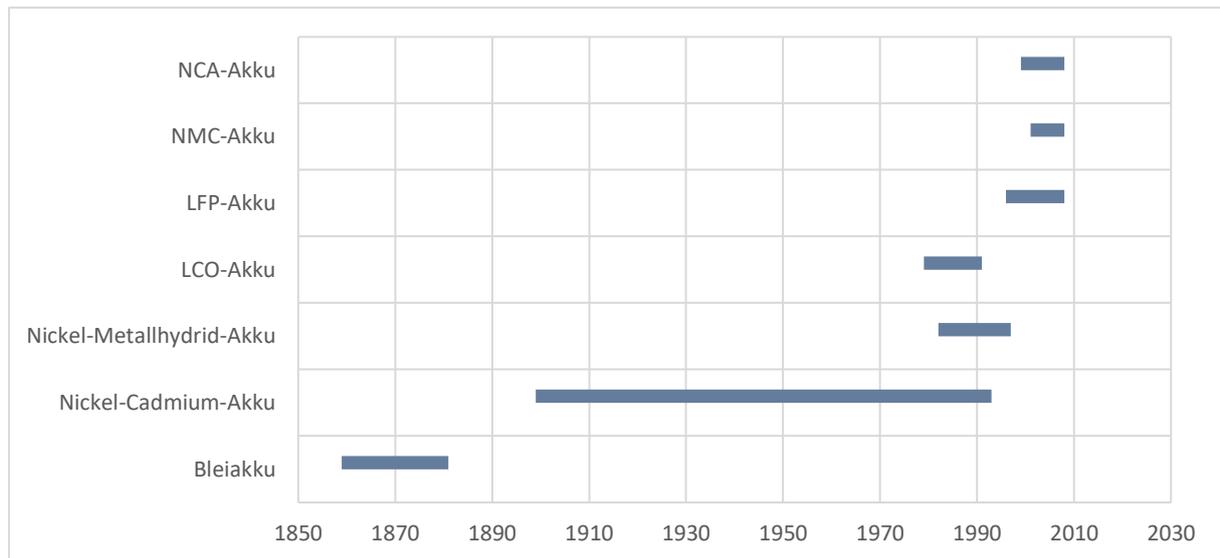


Abbildung 13: Entwicklung und Einführung von Akkutechnologien in Elektrofahrzeugen

Frühere Technologien wie der Bleiakku, der bereits 1859 entwickelt wurde, dominierten über Jahrzehnte den Markt für elektrische Energiespeicherung. Der erste Einsatz des Bleiakkus in Elektrofahrzeugen erfolgte 1881, was eine Übergangszeit von 22 Jahren von der Entwicklung bis zur ersten Anwendung darstellt. In dieser frühen Phase war der Bleiakku die einzige praktikable Lösung zur Speicherung elektrischer Energie. Der Nickel-Cadmium-Akku, entwickelt im Jahr 1899, benötigte im Vergleich eine deutlich längere Übergangszeit. Erst 1993, nach 94 Jahren, wurde er erstmals in Elektrofahrzeugen eingesetzt, was die technologischen Herausforderungen und die begrenzte Nachfrage nach elektrischer Mobilität in dieser Zeit widerspiegelt. Deutlich schneller verlief die Marktdurchdringung des Nickel-Metallhydrid-Akkus. Diese Technologie, die 1982 als Weiterentwicklung des Nickel-Cadmium-Akkus entwickelt wurde, fand bereits 1997, nach einer Übergangszeit von 15 Jahren, Einsatz in Hybridfahrzeugen wie dem Toyota Prius. Die Verbesserung gegenüber dem Nickel-Cadmium-Akku ermöglichte eine beschleunigte Einführung auf dem Markt. Der Lithium-Cobaltdioxid-Akku⁸², entwickelt 1991, markiert den Beginn der Ära der Lithium-Ionen-Technologien. Varianten wie der Lithium-Eisenphosphat-Akku, der 1996 entwickelt wurde, fanden ebenfalls schnell Anwendung. Der LFP-Akku wurde bereits 2008 in Elektrofahrzeugen eingesetzt, was eine Übergangszeit von nur 12 Jahren darstellt.

⁸² Diese Akkutechnologie wurde nicht in Elektrofahrzeugen verwendet, weshalb hier das Jahr der Kommerzialisierung in Betracht gezogen wurde.

Gleichzeitig kamen spezialisierte Varianten wie der NMC-Akku und der NCA-Akku auf den Markt. Beide Technologien, die um die Jahrtausendwende entwickelt wurden, fanden ebenfalls 2008 Einzug in die Elektromobilität. Der NCA-Akku wurde 1999 eingeführt und benötigte somit neun Jahre Übergangszeit. Hingegen wurde der NMC-Akku 2001 eingeführt und benötigte eine Übergangszeit von sieben Jahren.

Die unterschiedlichen Übergangszeiten von der Entwicklung bis zur Marktreife reichen von sieben bis 94 Jahren. Der Durchschnitt beträgt etwa 25 Jahre, was die technologische Weiterentwicklung und die wachsende Nachfrage nach effizienten Energiespeicher-systemen in der Elektromobilität widerspiegelt.

5.1.2 Trends der gravimetrischen Energiedichten

In diesem Abschnitt werden die aus der Literatur gewonnenen gravimetrischen Energiedichten zunächst getrennt nach Batterietechnologien analysiert und anschließend zusammengeführt, um einen umfassenden Überblick zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden Punktdiagramme erstellt, die die gravimetrischen Energiedichten der einzelnen Technologien über die Jahre bis zum aktuellen Stand der Technik abbilden.

Um langfristige Entwicklungsmuster sichtbar zu machen, wurde die in **Kapitel 3.3.1** beschriebene lineare Regressionsanalyse angewandt und aus den Punktdaten Trendlinien generiert, die den zeitlichen Fortschritt der Technologien verdeutlichen. Zusätzlich wurden die maximal erreichten gravimetrischen Energiedichten jeder Technologie identifiziert und durch eine Verbindung dieser Punkte der Verlauf der technologischen Spitzenleistungen dargestellt. Diese Herangehensweise ermöglicht es, die Fortschritte und die maximal erreichbaren Werte der einzelnen Technologien im zeitlichen Kontext zu betrachten und so Trends und Entwicklungspotenziale klar hervorzuheben.

Bleiakku

Die Trendlinie des Bleiakkus in **Abbildung 14** zeigt eine jährliche Steigerung von etwa 0,2 Wh/kg, die einen technologischen Fortschritt über die Jahre widerspiegelt. In Betrachtung der einzelnen Datenpunkte wird ersichtlich, dass sich in den frühen Jahren, zwischen den 1960er und 1980er Jahren, eine deutliche Verbesserung erkennen lässt. Mit dem Beginn der 1990er Jahre flacht dieser Anstieg jedoch ab.

Die oberen Grenzwerte, die die maximal erreichbaren Energiedichten zu den jeweiligen Zeitpunkten darstellen, weisen bis 1994 einen klaren Anstieg auf. Zwischen 1994 und 2015 erreicht der Bleiakкумулятор wiederholt maximale Energiedichten von etwa 50 Wh/kg, Dieser Wert wurde mehrfach durch verschiedene Studien bestätigt. Ein Spitzenwert von 60 Wh/kg, dokumentiert im Jahr 2015 durch **Shah Bukhari et al. 2015**, stellt eine Ausnahme dar. In den darauffolgenden Jahren kehrten die maximalen Werte jedoch auf etwa 50 Wh/kg zurück.

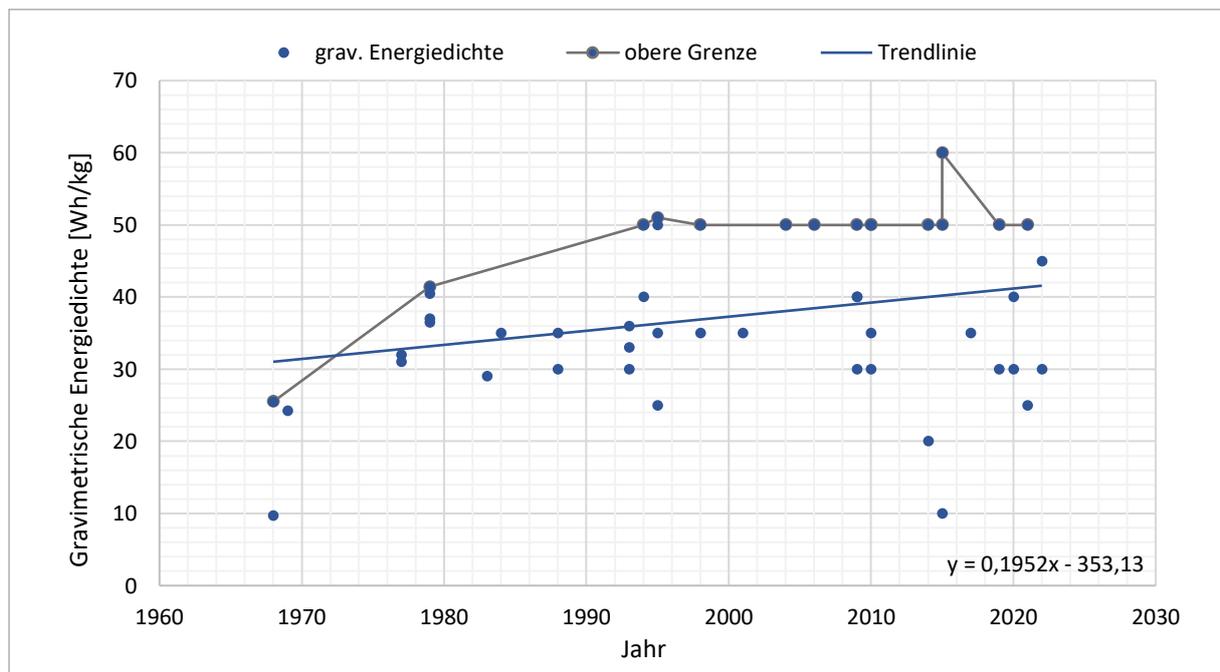


Abbildung 14: Entwicklung der grav. Energiedichte - Bleiakku

Nickel-Cadmium-Akku

Die Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte des Nickel-Cadmium-Akkus zeigt einen positiven Trend. Die Steigung beläuft sich auf ein jährliches Wachstum der gravimetrischen Energiedichte von etwa 0,32 Wh/kg.

Bei Betrachtung der oberen Grenze der **Abbildung 15** wird ersichtlich, dass die maximal erreichte gravimetrische Energiedichte bis 1990 nicht überboten wurde. Zwischen 1990 und 2010 ist jedoch ein signifikanter Anstieg erkennbar, der anschließend in einer Stagnation bei 80 Wh/kg verbleibt.

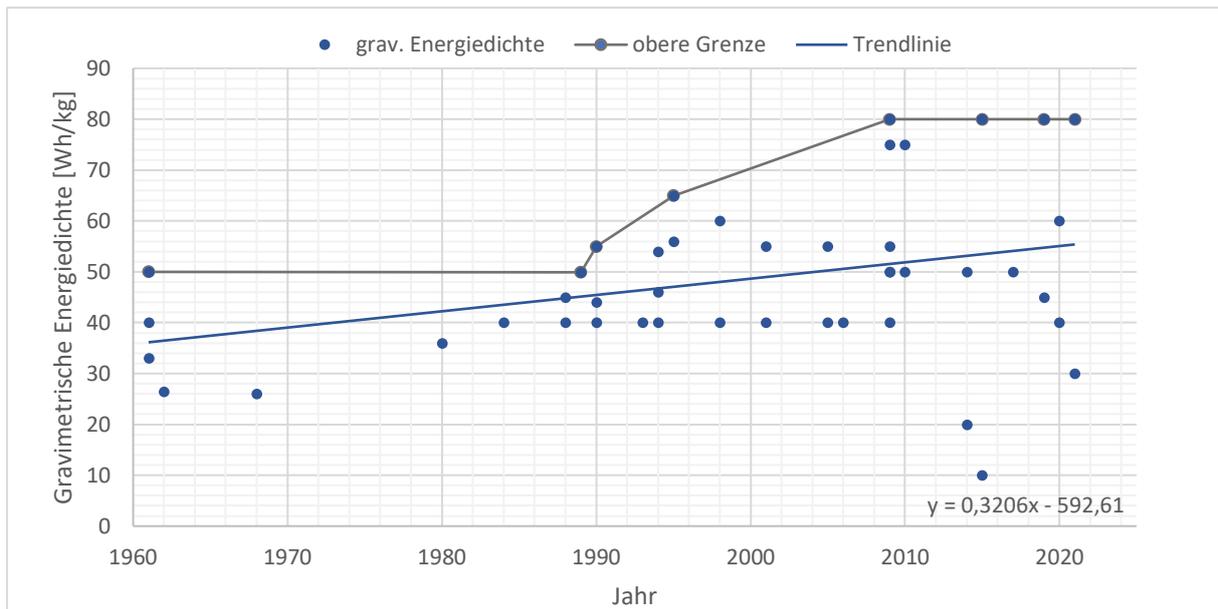


Abbildung 15: Entwicklung der grav. Energiedichte – Nickel-Cadmium-Akku

Nickel-Metallhydrid-Akku

Die **Abbildung 16** zeigt die Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte des NiMH-Akkus im Zeitraum von 1988 bis zum jetzigen Stand. Die lineare Steigung der Trendlinie beträgt 0,4906. Dies führt zu einer durchschnittlichen Zunahme der gravimetrischen Energiedichte um etwa 0,5 Wh/kg jährlich.

Der Verlauf der oberen Grenze zeigt ein deutlich erkennbares Muster. Beginnend mit einem ersten Datenpunkt von 55 Wh/kg steigt die gravimetrische Energiedichte zunächst an und erreicht im Jahr 1998 ein erstes Maximum von 95 Wh/kg. Anschließend flacht der Verlauf ab und erreicht im Jahr 2004 ein Tief von 60 Wh/kg. Dieses Tief liegt jedoch über dem Wert des ersten Datenpunktes, wodurch ein höheres Tief erzielt wurde. Im Jahr 2009 zeigt sich ein neues Maximum, welches über dem ersten Hoch liegt. Dieses Muster wiederholt sich in einer weiteren Periode. Im Jahr 2015 wird ein höheres Tief von 80 Wh/kg erreicht, während das nächste höhere Hoch im Jahr 2019 eine Energiedichte von 120 Wh/kg markiert. Im letzten Abschnitt der oberen Grenze ist schließlich ein Rückgang der gravimetrischen Energiedichte erkennbar.

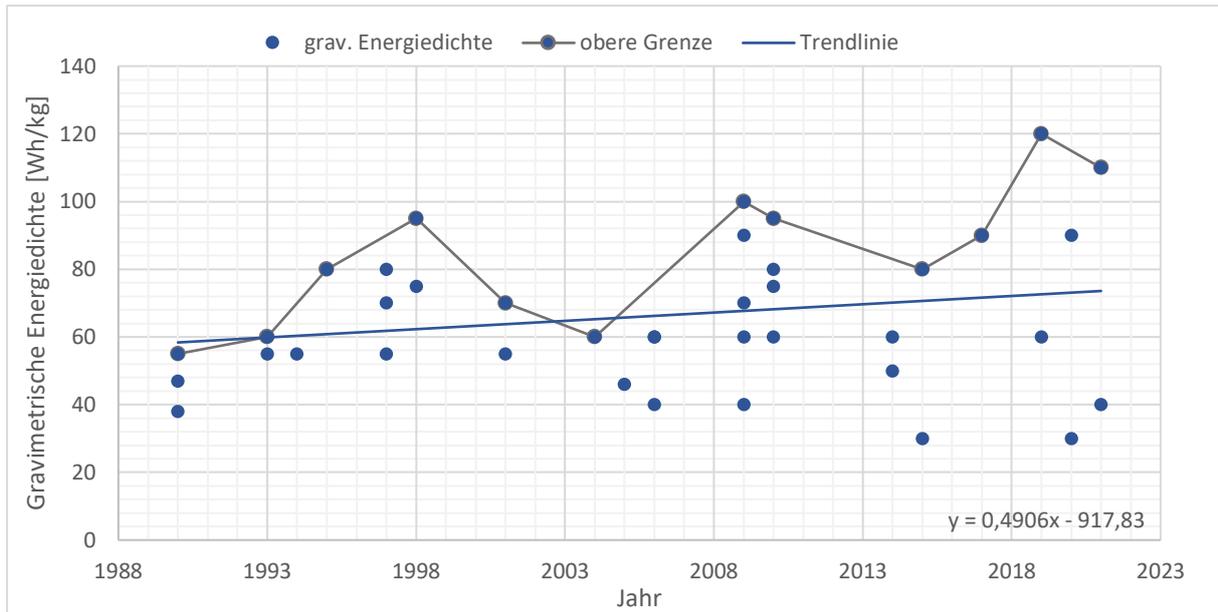


Abbildung 16: Entwicklung der grav. Energiedichte – Nickel-Metallhydrid-Akku

Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Die in **Abbildung 17** dargestellte Trendlinie des LCO-Akkus zeigt einen positiven Anstieg der gravimetrischen Energiedichte über den betrachteten Zeitraum. Die Steigung der linearen Regressionsgeraden gibt einen jährlichen Zuwachs von 2,42 Wh/kg an. Diese Fortschritte verdeutlichen eine kontinuierliche Optimierung der LCO-Technologie.

Die obere Grenze der Energiedichte zeigt hingegen eine dynamischere Entwicklung. Bis zum Jahr 2015 steigt diese steil an und erreicht etwa 300 Wh/kg, was auf eine Phase intensiver Innovationen und technischer Fortschritte hinweist, die das Potenzial der LCO-Technologie erheblich steigerten. Nach 2015 ist jedoch ein Rückgang der oberen Grenze erkennbar, der möglicherweise auf technologische Grenzen oder eine Verlagerung des Forschungs- und Entwicklungsfokus auf alternative Technologien, beziehungsweise auf einer Limitierung in den Entwicklungskosten hinweist.

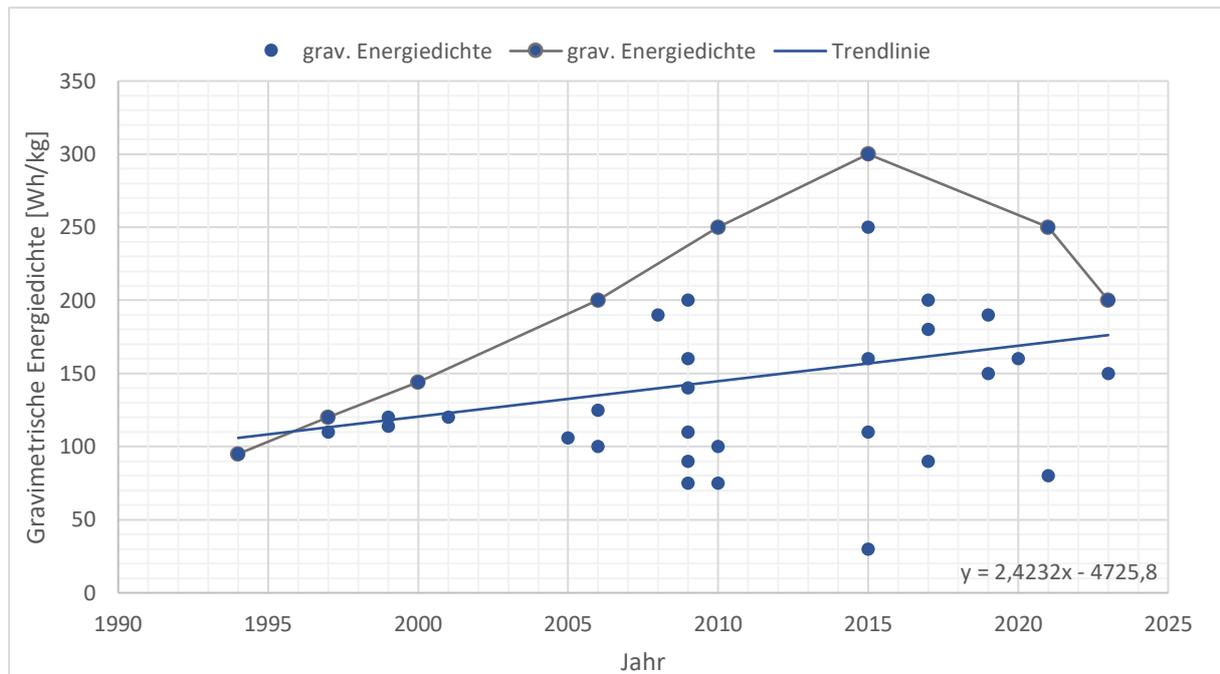


Abbildung 17: Entwicklung der grav. Energiedichte – Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Lithium-Eisenphosphat-Akku

Die **Abbildung 18** zeigt die zeitliche Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte des LFP-Akkus. Die Trendlinie der linearen Regressionsgeraden gibt mit dem Regressionskoeffizienten b eine Steigung von etwa 1,88 Wh/kg pro Jahr an. Diese Steigung verdeutlicht einen gleichmäßigen Fortschritt in der Optimierung der LFP-Technologie. Bereits zu Beginn zeigt sich ein hohes Niveau der gravimetrischen Energiedichte, das die technologische Reife dieser Akkutechnologie unterstreicht.

Die obere Grenze der gravimetrischen Energiedichte liegt zu Beginn des Zeitraums nah an den gemessenen Werten. Ab 2010 ist jedoch ein deutlicher Anstieg der oberen Grenze, durch einen Ausreißer, erkennbar, der bis 2017 anhält und mit einem Höchstwert von knapp 230 Wh/kg abschließt. Nach 2017 ist ein Rückgang der oberen Grenze zu beobachten, die bis 2023 auf etwa 200 Wh/kg sinkt.

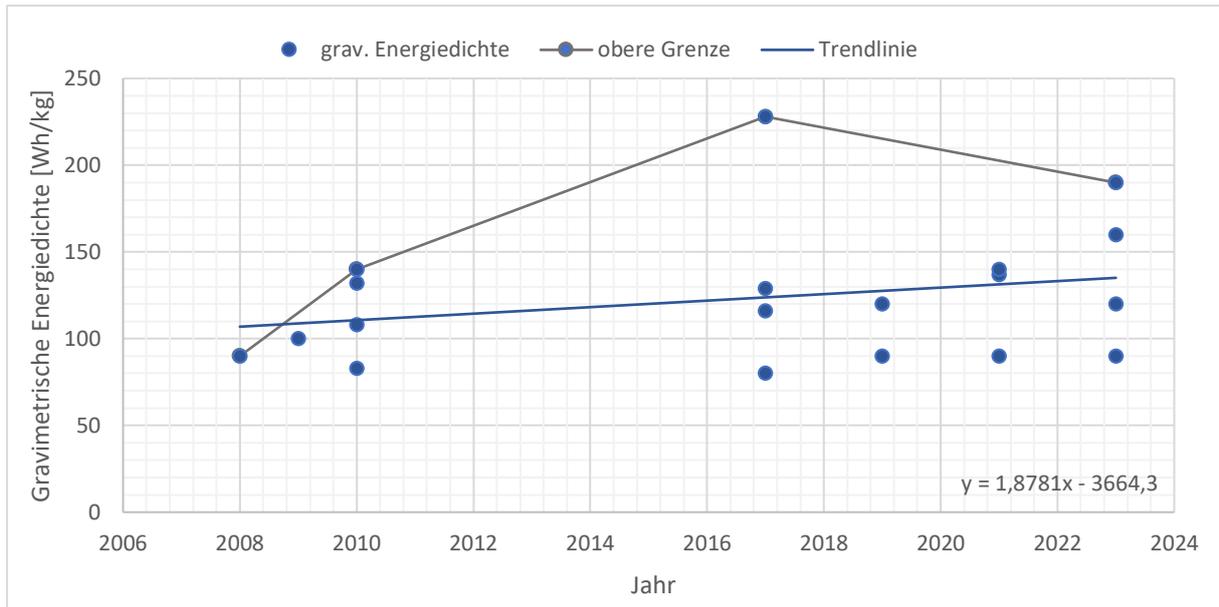


Abbildung 18: Entwicklung der grav. Energiedichte – Lithium-Eisenphosphat-Akku

Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Das vorliegende Diagramm in der **Abbildung 19** zeigt die Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte des Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkus von 2008 bis zum heutigen Stand. Dabei weist dieser einen deutlichen Aufwärtstrend auf, der durch die lineare Trendlinie quantifiziert wird. Innerhalb eines Jahres konnte die gravimetrische Energiedichte um etwa 4,66 Wh/kg gesteigert werden.

In den frühen Jahren nach der Kommerzialisierung des NMC-Akkus ist im Anbetracht der oberen Grenze ein deutlicher Anstieg zu erkennen. Diese Phase wird jedoch von einer leichten Stagnation abgelöst. Ab etwa 2020 zeigt die obere Grenze hingegen einen signifikanten Anstieg und erreicht bis zum heutigen Stand einen Wert von knapp 350 Wh/kg,

Ein bemerkenswerter Unterschied zu anderen Akkutechnologien besteht darin, dass die Werte der Trendlinie für die gravimetrische Energiedichte des NMC-Akkus nah an der oberen Grenze liegen.

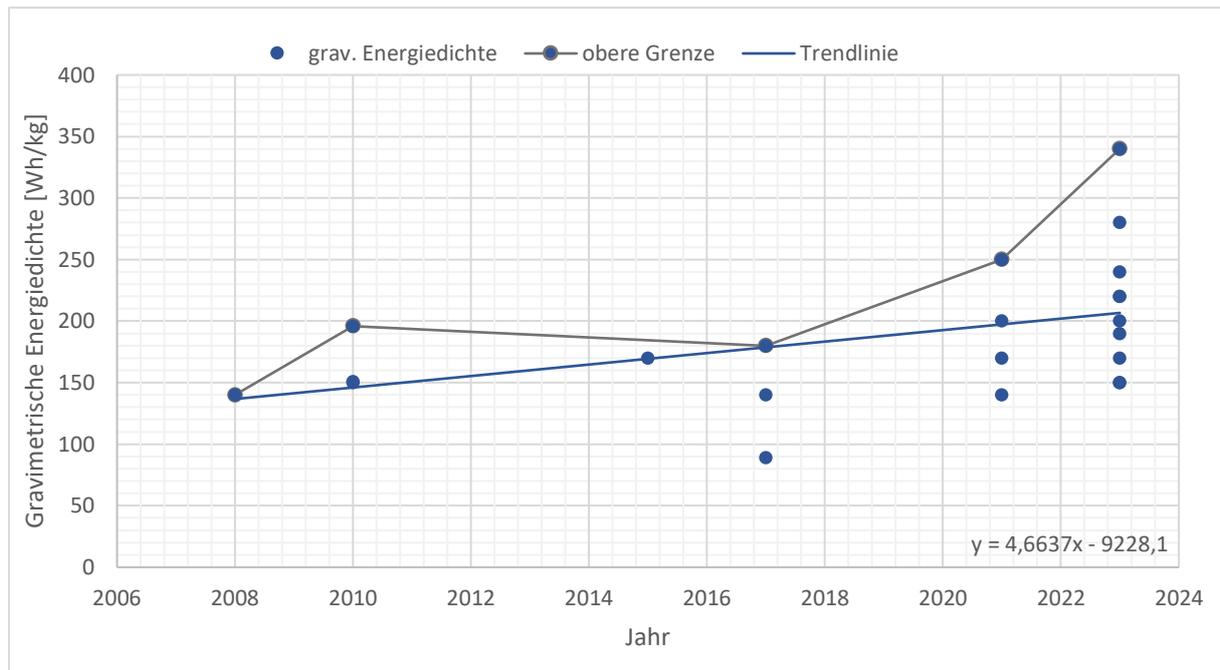


Abbildung 19: Entwicklung der grav. Energiedichte – Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Das Diagramm in der **Abbildung 20** veranschaulicht die zeitliche Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte des NCA-Akkus im Zeitraum von 2010 bis zum heutigen Stand. Dabei gibt die Trendlinie eine jährliche Zunahme der gravimetrischen Energiedichte von 8 Wh/kg an. Diese Steigerung zeigt, dass deutliche Fortschritte erzielt wurden, jedoch in einem kontrollierten und stetigen Tempo, ohne abrupte technologische Durchbrüche.

Der Graph der oberen technischen Grenze zeigt eine ähnliche Steigung wie die Trendlinie, allerdings mit einer etwas höheren Rate.

Nach 2017 zeigt die obere Grenze einen signifikanten Anstieg. Im Jahr 2023 erreicht die obere Grenze einen Höchstwert von knapp 350 Wh/kg, was einen neuen Spitzenwert für diese Technologie darstellt.

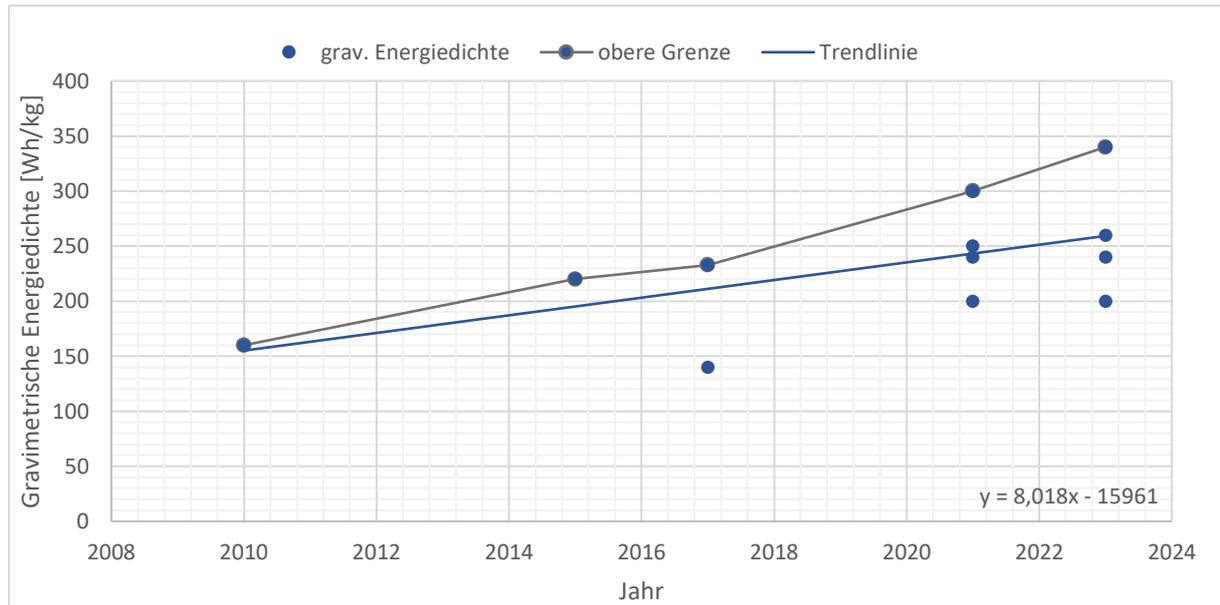


Abbildung 20: Entwicklung der grav. Energiedichte – Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Ganzheitliche Betrachtung der Akkutechnologien

Das Diagramm in der **Abbildung 21** zeigt die zeitliche Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte der behandelten Akkutechnologien seit den 1960er Jahren. Für jede Akkutechnologie wurde eine Trendlinie hinzugefügt, die den Verlauf der technologischen Entwicklung beschreibt. Es wird deutlich, dass alle betrachteten Akkutechnologien im Laufe der Zeit eine Steigerung der gravimetrischen Energiedichte aufweisen, wobei sich die Geschwindigkeit dieser Fortschritte je nach Technologie stark unterscheidet. Ältere Technologien wie der Bleiakku und der Nickel-Cadmium-Akku weisen nur eine geringe Steigerung der gravimetrischen Energiedichte auf. Die flachen Trendlinien zeigen, dass die technologischen Fortschritte in diesen Bereichen begrenzt blieben.

Der Nickel-Metallhydrid-Akku zeigt im Vergleich zu den älteren Technologien eine etwas stärkere Steigerung, bleibt jedoch ebenfalls deutlich hinter den moderneren Lithium-basierten Akkus zurück und erreicht Energiedichten, die meist unter 100 Wh/kg liegen. Im Gegensatz dazu zeigen Lithium-basierte Technologien, wie Lithium-Cobaltdioxid-Akkus, Lithium-Eisenphosphat-Akkus, Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkus und Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkus, eine signifikante Steigerung der gravimetrischen Energiedichte. Insbesondere NMC- und NCA-Akkus erreichen in einer kurzen Zeitspanne große Sprünge in der Energiedichte.

Das Diagramm verdeutlicht, dass die technologischen Fortschritte bei den Lithium-basierten Technologien die älteren Akkutypen weit übertreffen. Während die älteren Technologien nur eine langsame Steigerung erfuhren, spiegeln die Lithium-basierten Akkus den technologischen Wandel der letzten Jahrzehnte wider.

Zusätzlich zu den einzelnen Trendlinien der jeweiligen Akkutechnologien zeigt die **Abbildung 21** eine übergeordnete Gesamttrendlinie, welche die Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte über alle betrachteten Technologien hinweg beschreibt. Diese Gesamttrendlinie verdeutlicht, dass unabhängig von der spezifischen Akkutechnologie ein genereller positiver Trend hin zu höheren gravimetrischen Energiedichten besteht. Die gravimetrische Energiedichte, abgelöst von den jeweiligen Akkutechnologien, erfährt einen durchschnittlichen Anstieg von 2,5 Wh/kg. Sie stellt somit eine zusammenfassende Perspektive dar, die die Fortschritte und Innovationen im Bereich der Energiespeicherung seit den 1960er Jahren widerspiegelt.

Die obere Grenze, die die maximal erreichten gravimetrischen Energiedichten aller Akkutechnologien über die Zeit darstellt, zeigt, dass die gravimetrische Energiedichte seit 1961 mit 50 Wh/kg erst im Jahr 1990 auf 55 Wh/kg überschritten wurde. Ab diesem Zeitpunkt stieg sie nahezu linear und steil an, bis 2010 eine gravimetrische Energiedichte von 250 Wh/kg erreicht wurde. Danach verlangsamte sich der Fortschritt deutlich. In den folgenden fünf Jahren wurden lediglich weitere 50 Wh/kg hinzugewonnen, und in den darauffolgenden sieben Jahren kamen nur noch 40 Wh/kg hinzu.

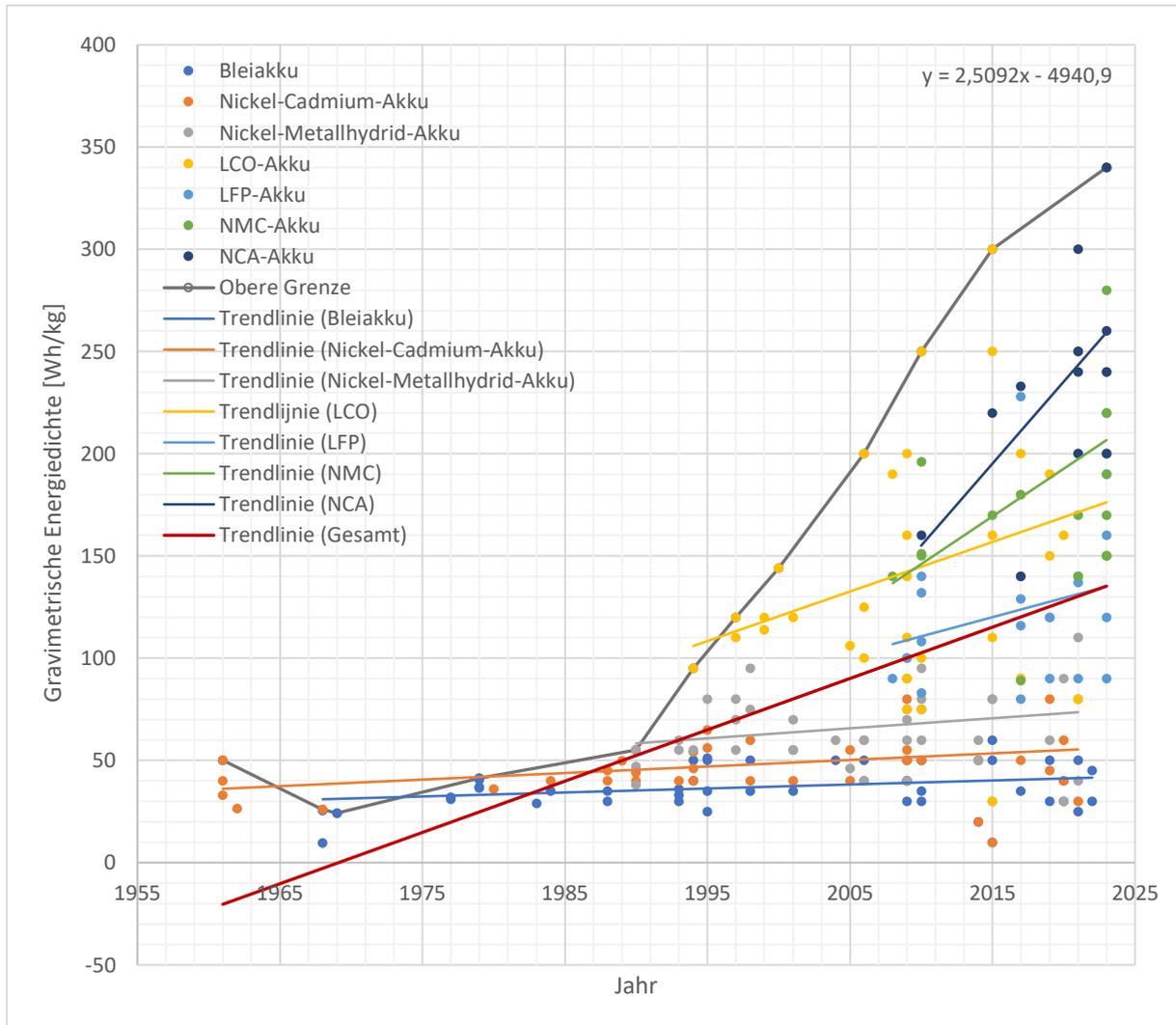


Abbildung 21: Entwicklung der grav. Energiedichte – Ganzheitliche Betrachtung

5.1.3 Trends der volumetrischen Energiedichten

In diesem Abschnitt wird die volumetrische Energiedichte der behandelten Energiespeichersysteme untersucht.

Bleiakku

Die in **Abbildung 22** dargestellte Trendlinie weist einen leichten Abwärtstrend auf. Die Trendlinie hat eine negative Steigung von $0,0977 \text{ kWh/m}^3$ jährlich.

Ein Spitzenwert von etwa 140 kWh/m^3 im Jahr 2010 verdeutlicht, dass technologische Fortschritte erzielt wurden. Dieser Wert erweist sich jedoch als Ausreißer, da die übrigen Daten einen Maximalwert von 100 kWh/m^3 nicht überschreiten. Die obere Grenze der volumetrischen Energiedichte zeigt einen deutlichen Anstieg bis etwa zum Jahr 2000. Nach dem Jahr 2000 flacht die obere Grenze ab.

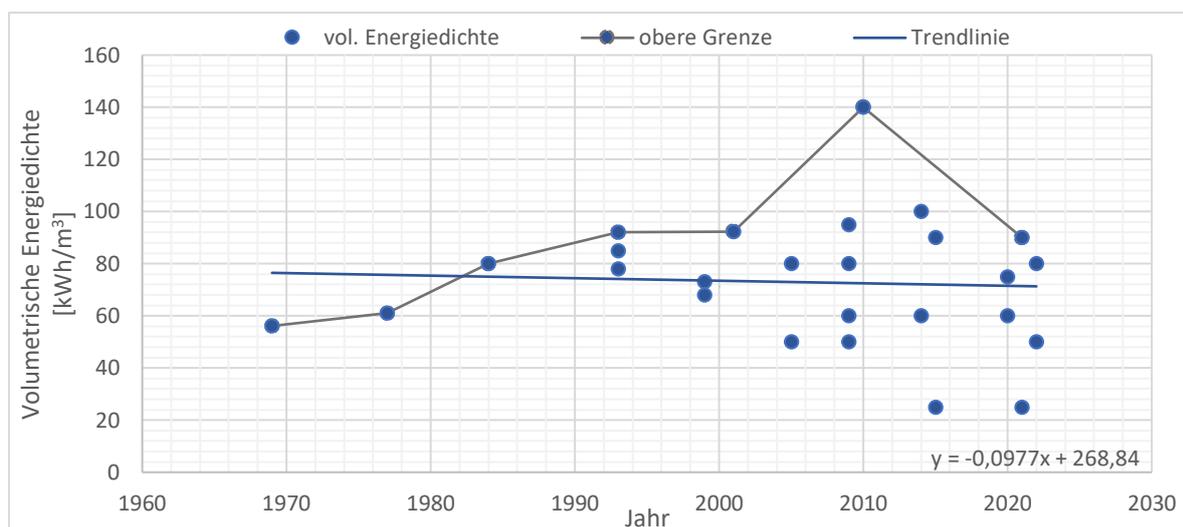


Abbildung 22: Entwicklung der vol. Energiedichte – Bleiakku

Nickel-Cadmium-Akku

Die Analyse des Trends der ermittelten Werte zeigt eine jährliche Abnahme von 0,269 kWh/m³, welche die Steigung der Regressionsgleichung in **Abbildung 23** darstellt. Eine kontinuierliche Steigerung der maximal erreichbaren volumetrischen Energiedichten ist bei der oberen Grenze von etwas über 140 kWh/m³, bis kurz vor 2010, zu beobachten. Ab 2010 stagniert der obere Grenzverlauf.

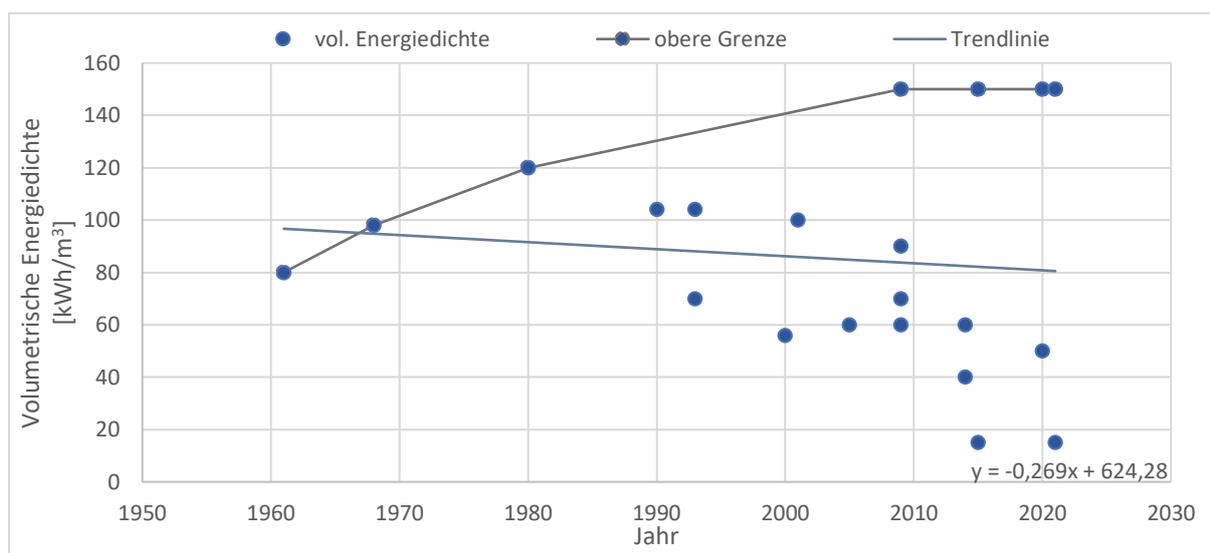


Abbildung 23: Entwicklung der vol. Energiedichte – Nickel-Cadmium-Akku

Nickel-Metallhydrid-Akku

Die zeitliche Entwicklung der volumetrischen Energiedichte des Nickel-Metallhydrid-Akkus wird durch das Diagramm in **Abbildung 24** dargestellt.

Die Datenrecherche ergab für die gemessenen Werte eine Trendlinie mit einem mäßigen negativen Verlauf. Dieser Trend weist darauf hin, dass die volumetrische Energiedichte des NiMH-Akkus einen durchschnittlich jährlichen Rückgang von 0,1 kWh/m³ aufweist.

Im Gegensatz dazu zeigt die obere Grenze der volumetrischen Energiedichte einen deutlich dynamischeren Verlauf. Zu Beginn der Analyse steigt die obere Grenze zunächst leicht an und verzeichnet dann einen rapiden Anstieg, der im Jahr 2000 mit einem Höchstwert von 350 kWh/m³ sein Maximum erreicht. Nach diesem Maximum sinkt die obere Grenze auf etwa 300 kWh/m³ ab und stabilisiert sich auf diesem Niveau.

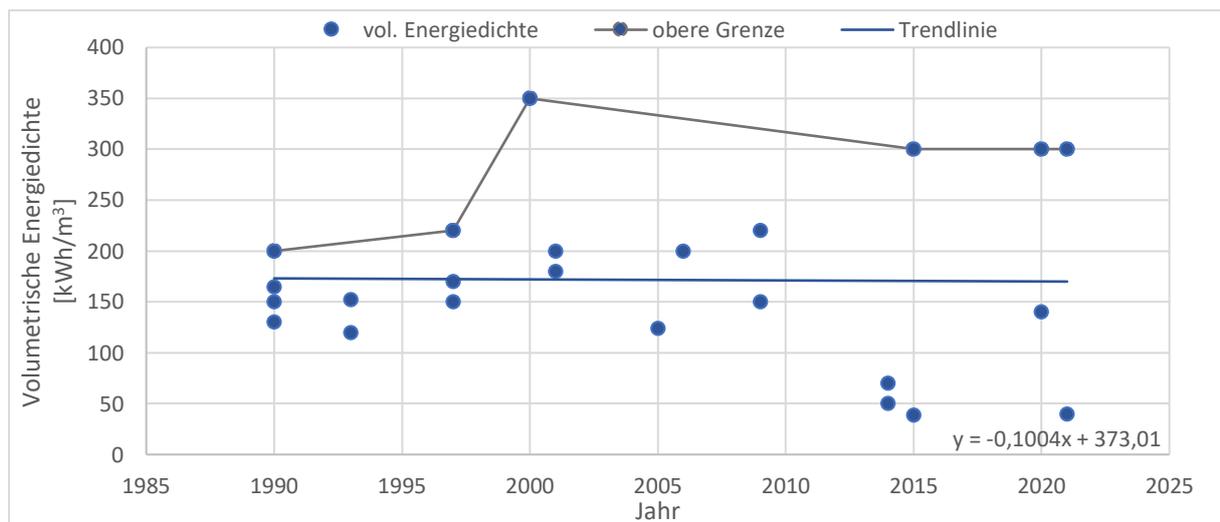


Abbildung 24: Entwicklung der vol. Energiedichte – Nickel-Metallhydrid-Akku

Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Die Entwicklung der volumetrischen Energiedichte des Lithium-Cobaltdioxid-Akkus wird in **Abbildung 25** dargestellt. Die Trendlinie zeigt eine kontinuierliche Zunahme im Verlauf der betrachteten Jahre mit einer Steigung von etwa 2,43 kWh/m³ pro Jahr.

Die obere Grenze der volumetrischen Energiedichte zeigt einen aufsteigenden Verlauf. Bis 1998 bleibt der Wert konstant bei 300 kWh/m³, dies weist auf eine kurze stabile Phase ohne wesentliche Fortschritte hin. Ab dem Jahr 1998 steigt sie jedoch bis zum Jahr 2008 deutlich auf 500 kWh/m³ an. Ab dem Jahr 2008 bleibt die obere Grenze auf diesem hohen Niveau stabil.

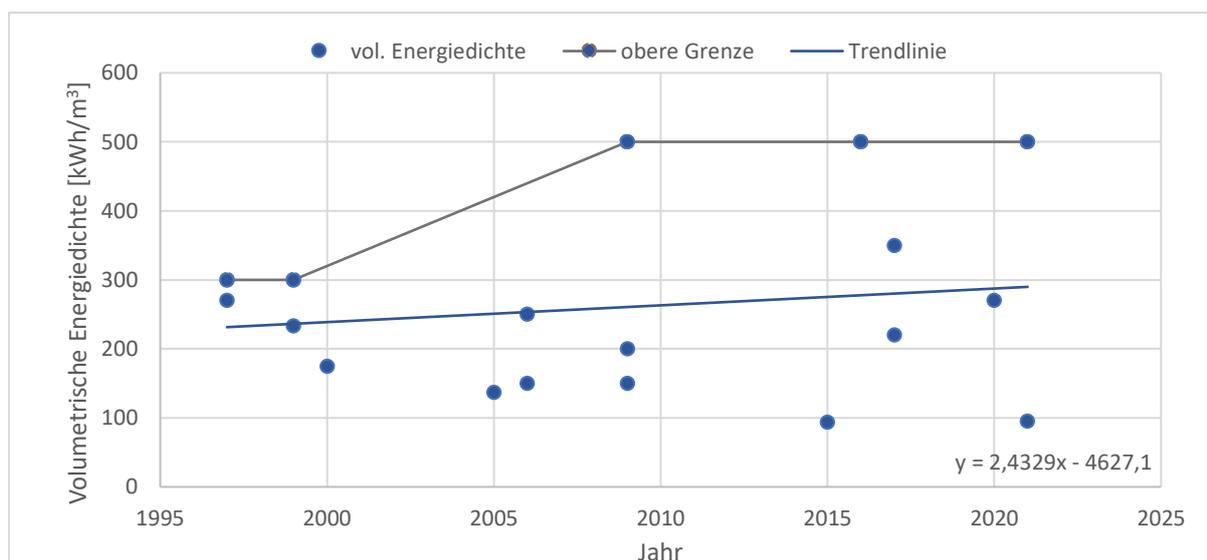


Abbildung 25: Entwicklung der vol. Energiedichte – Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Lithium-Eisenphosphat-Akku

Die Trendlinie des LFP-Akkus in **Abbildung 26** weist eine kontinuierliche Steigerung der volumetrischen Energiedichte auf. Diese Steigung beträgt circa $7,57 \text{ kWh/m}^3$ jährlich. Die maximale erreichbaren volumetrischen Energiedichten werden durch die obere Grenze dargestellt, die sich aus drei Datenpunkten zusammensetzt. Eine deutliche Steigerung dieser Werte ist im Zeitraum von 2007 bis 2017 erkennbar. In diesem Zeitraum wird eine Steigerung der die volumetrische Energiedichte von etwa 230 kWh/m^3 auf über 350 kWh/m^3 verzeichnet, welches einem Zuwachs von 120 kWh/m^3 innerhalb von zehn Jahren entspricht. Seit 2017 zeigt die obere Grenze jedoch eine weitgehende Stabilisierung.

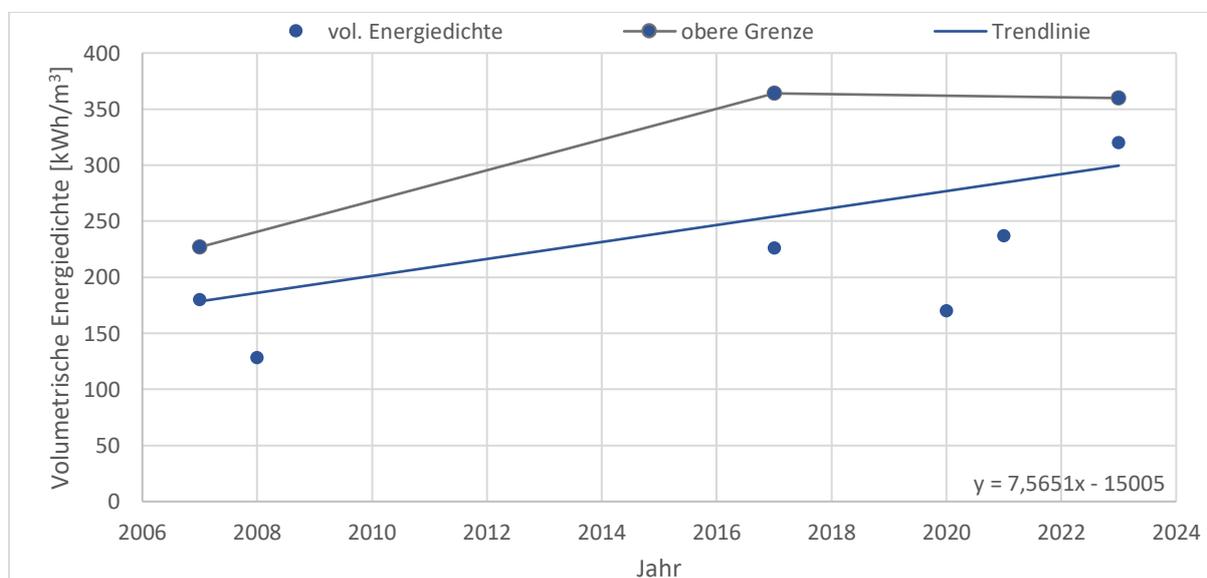


Abbildung 26: Entwicklung der vol. Energiedichte – Lithium-Eisenphosphat-Akku

Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Abbildung 27 zeigt die Entwicklung der volumetrischen Energiedichte des Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkus über der Zeit. Der kontinuierliche Anstieg wird durch die Trendlinie verdeutlicht. Mit einer Steigung von etwa $48,13 \text{ kWh/m}^3$ pro Jahr spiegelt dieser Verlauf den technologischen Fortschritt in der Weiterentwicklung des NMC-Akkus wider.

Die obere Grenze hat einen ähnlichen Verlauf wie die Trendlinie und hat ab dem Jahr 2021 eine deutlich stärkere Steigung. Dabei wird das Maximum von 2021 auf 2023 von 500 kWh/m^3 auf über 700 kWh/m^3 gesteigert.

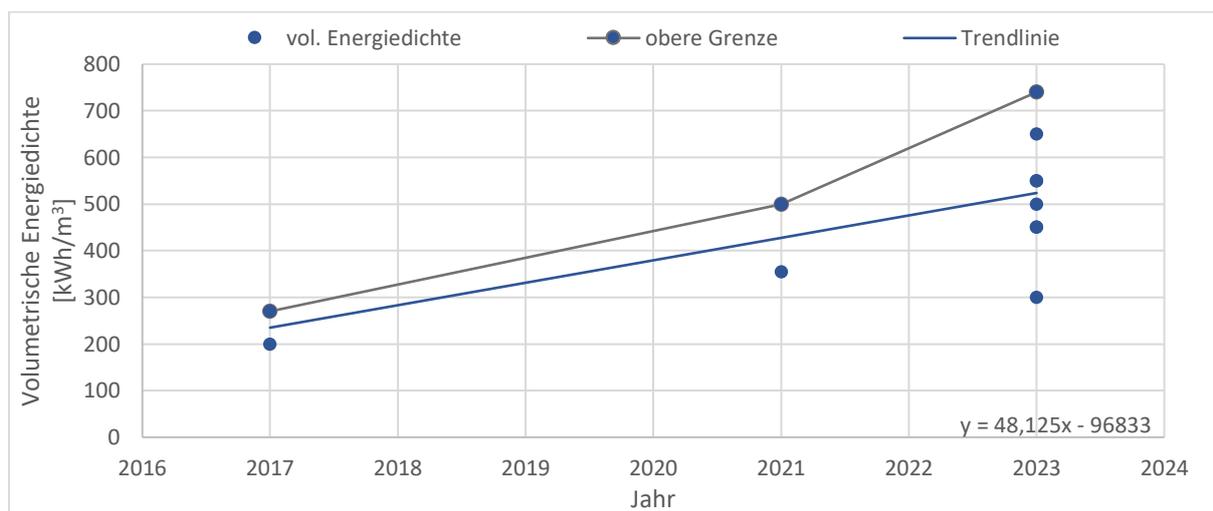


Abbildung 27: Entwicklung der vol. Energiedichte – Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Abbildung 28 veranschaulicht die Entwicklung der volumetrischen Energiedichte des Nickel-Cobalt-Aluminium-Akkus bis zum heutigen Stand. Der Trend zeigt eine kontinuierliche Steigerung der volumetrischen Energiedichte. Mit einer Steigung von $37,61 \text{ kWh/m}^3$ pro Jahr wird der stetige Fortschritt in der Entwicklung des NCA-Akkus deutlich. Ein ähnlicher Verlauf wird durch die obere Grenze der volumetrischen Energiedichte beschrieben. Diese spiegelt die maximal erreichbaren Werte wider und zeigt, dass die technologischen Möglichkeiten der NCA-Technologie konsequent ausgeschöpft werden. Obwohl die verfügbare Datenbasis für den NCA-Akku begrenzt ist, wurde versucht den Trend konsistentes und plausibles darzustellen. Die Übereinstimmung zwischen der Trendlinie und der oberen Grenze zeigt, dass sich die Entwicklung der Energiedichte realistisch und nachvollziehbar abbildet.

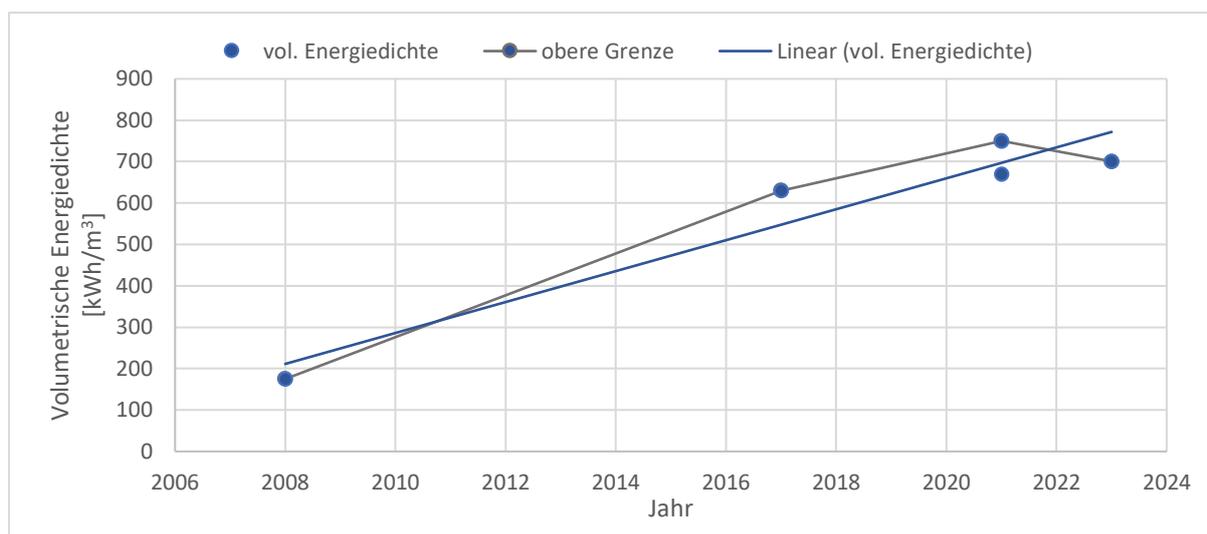


Abbildung 28: Entwicklung der vol. Energiedichte – Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Ganzheitliche Betrachtung der Akkutechnologien

Abbildung 29 veranschaulicht die zeitliche Entwicklung der volumetrischen Energiedichte aller zuvor behandelten Akkutechnologien und ermöglicht eine detaillierte Analyse der technologischen Fortschritte im Vergleich zwischen älteren und neueren Technologien. Die Darstellung umfasst sowohl Datenpunkte aus der Recherche als auch die dazugehörigen Trendlinien, die die langfristigen Entwicklungsmuster verdeutlichen. Der gesamtheitliche Trend der volumetrischen Energiedichte aller betrachteten Akkutechnologien zeigt einen positiven Verlauf mit einer durchschnittlichen Steigung von etwa $5,07 \text{ kWh/m}^3$ jährlich.

Die älteren Technologien, wie der Bleiakku und der Nickel-Cadmium-Akku, zeigen über den gesamten betrachteten Zeitraum eine nahezu stagnierende Entwicklung ihrer volumetrischen Energiedichte. Die nahezu horizontal verlaufenden Trendlinien verdeutlichen, dass bei diesen Technologien kaum technologische Fortschritte erzielt wurden. Im Gegensatz dazu weisen die Lithium-basierten Technologien, insbesondere der LFP-, NMC- und NCA-Akku, eine signifikante Zunahme der volumetrischen Energiedichte auf. Besonders auffällig ist der starke Anstieg der NMC- und NCA-Technologien ab etwa 2010. Der LFP-Akku zeigt ebenfalls eine stetige Steigerung, bleibt jedoch hinsichtlich der volumetrischen Energiedichte hinter den NMC- und NCA-Technologien zurück. Der LCO-Akku zeigt eine mäßige Steigerung der volumetrischen Energiedichte, insbesondere bis etwa 2010. Danach flacht der Anstieg ab.

Die obere Grenze zeigt einen gleichmäßigen Anstieg der volumetrischen Energiedichte bis zum Jahr 1980, in dem erstmals 120 kWh/m³ erreicht wurden. Ab 1980 beschleunigte sich die Entwicklung höherer volumetrischer Energiedichten zeitweise, sodass über die Zeit immer größere Sprünge erzielt wurden.

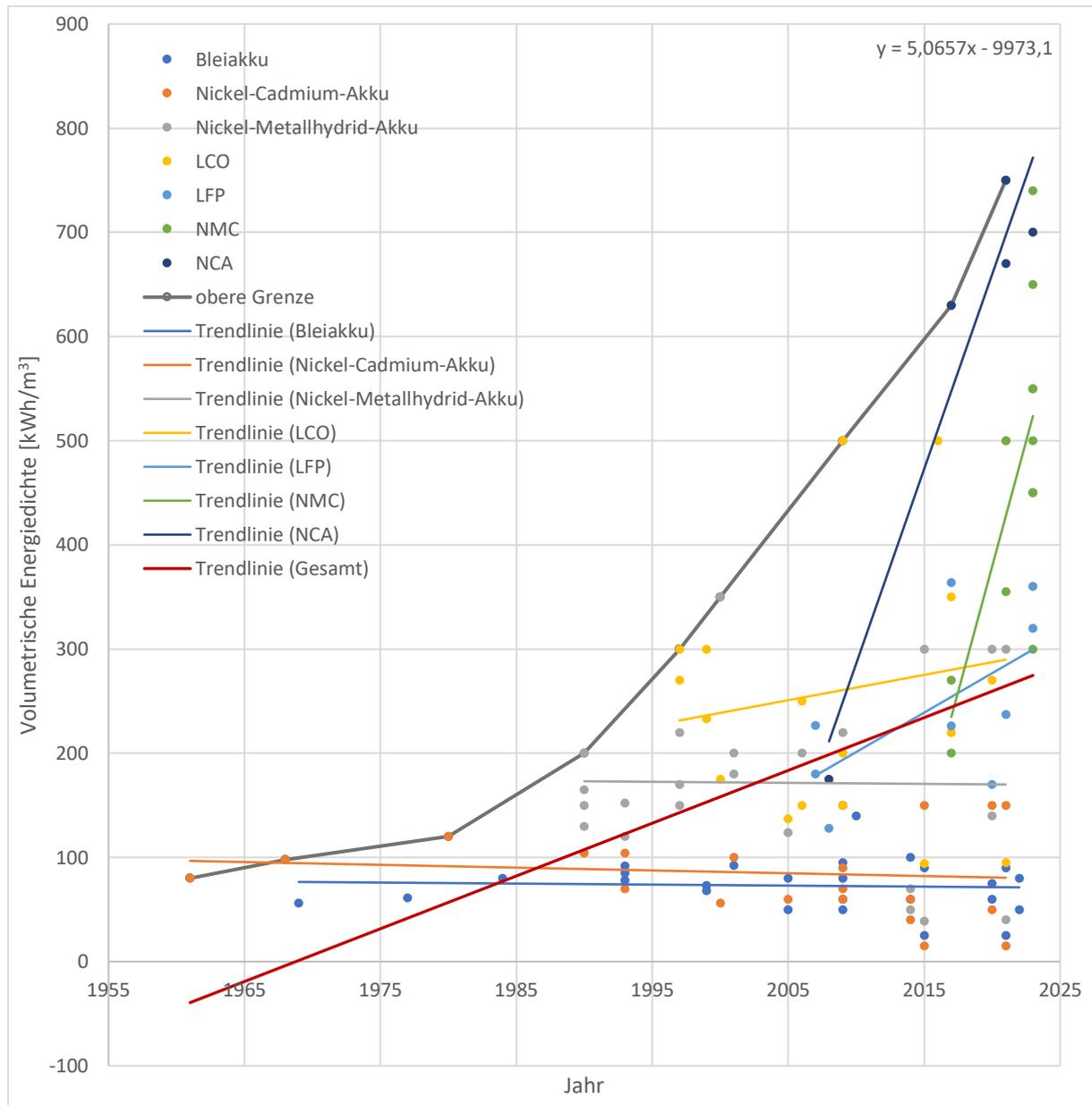


Abbildung 29: Entwicklung der vol. Energiedichte – Ganzheitliche Betrachtung

5.1.4 Trends der Batteriekosten

In diesem Abschnitt wird die Kostenentwicklung der Batterietechnologien analysiert. Im Gegensatz zu anderen Parametern, bei denen höhere Werte als vorteilhaft gelten, wird bei den Kosten ein Rückgang als positiv angesehen.

Bleiakku

Die Trendlinie in **Abbildung 30** weist einen jährlichen Rückgang der Kosten von 0,04 US-Dollar pro kWh auf. Die untere Grenze der Batteriekosten zeigt über den gesamten betrachteten Zeitraum eine stabile Entwicklung mit einem langsamen Rückgang. Hierbei sind die Kosten pro kWh von 1967 von 35 US-Dollar bis 1991 auf 63 US-Dollar erstmalig gestiegen und schließlich im Jahre 2013 mit 26 US-Dollar unterboten.

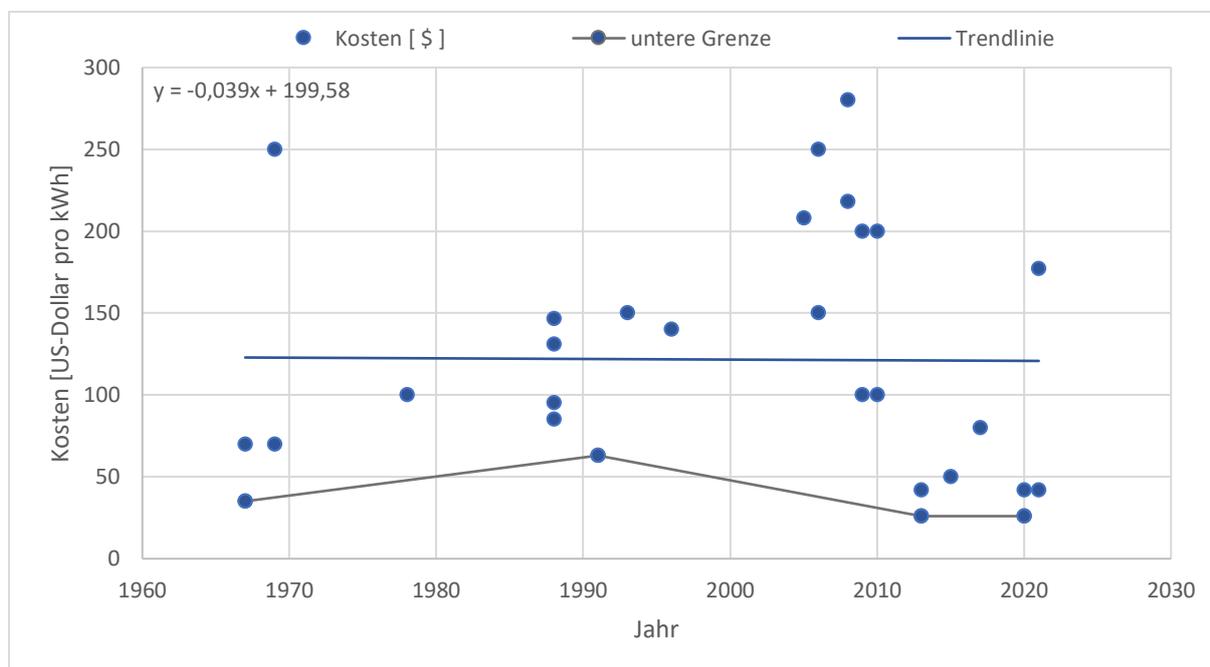


Abbildung 30: Entwicklung der Batteriekosten – Bleiakku

Nickel-Cadmium-Akku

Abbildung 31 beschreibt eine Trendlinie mit einer Steigung von 8,34 US-Dollar pro Jahr auf, was auf einen Anstieg der Batteriekosten bis zum heutigen Zeitpunkt hindeutet.

Die untere Grenze der Batteriekosten bietet ein differenzierteres Bild und zeigt einen negativen Verlauf. Bis etwa 1990 ist eine deutliche Kostensenkung erkennbar. Danach stabilisieren sich die Minimalkostenschwelle mit einer geringen Schwankung.

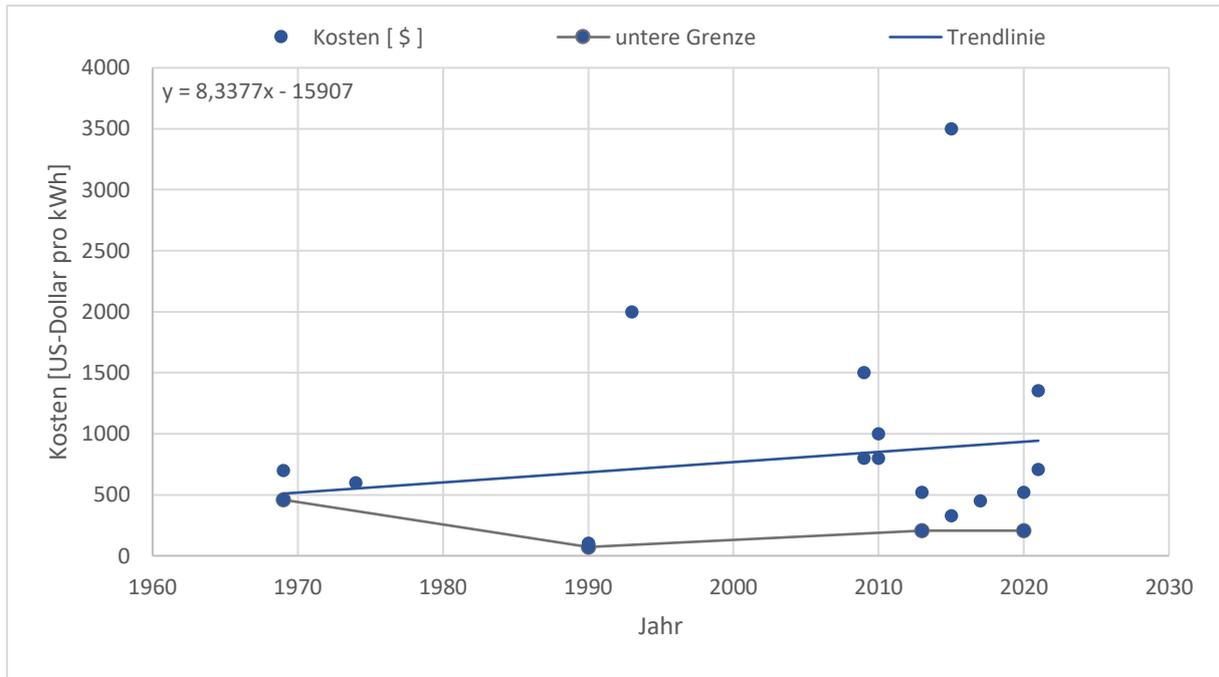


Abbildung 31: Entwicklung der Batteriekosten – Nickel-Cadmium-Akku

Nickel-Metallhydrid-Akku

Der Verlauf der in **Abbildung 32** dargestellten Trendlinie zeigt einen markanten Rückgang der Kosten mit einer Abnahme von 34,37 US-Dollar pro Jahr.

Zu Beginn des untersuchten Zeitraums verläuft die untere Grenze stabil, was auf eine nur geringe Dynamik der Kostensenkung hinweist. Zwischen 2010 und 2015 tritt jedoch eine spürbare Kostenreduktion auf. Ab 2015 bleibt die untere Grenze weitgehend konstant, mit nur leichten Schwankungen.

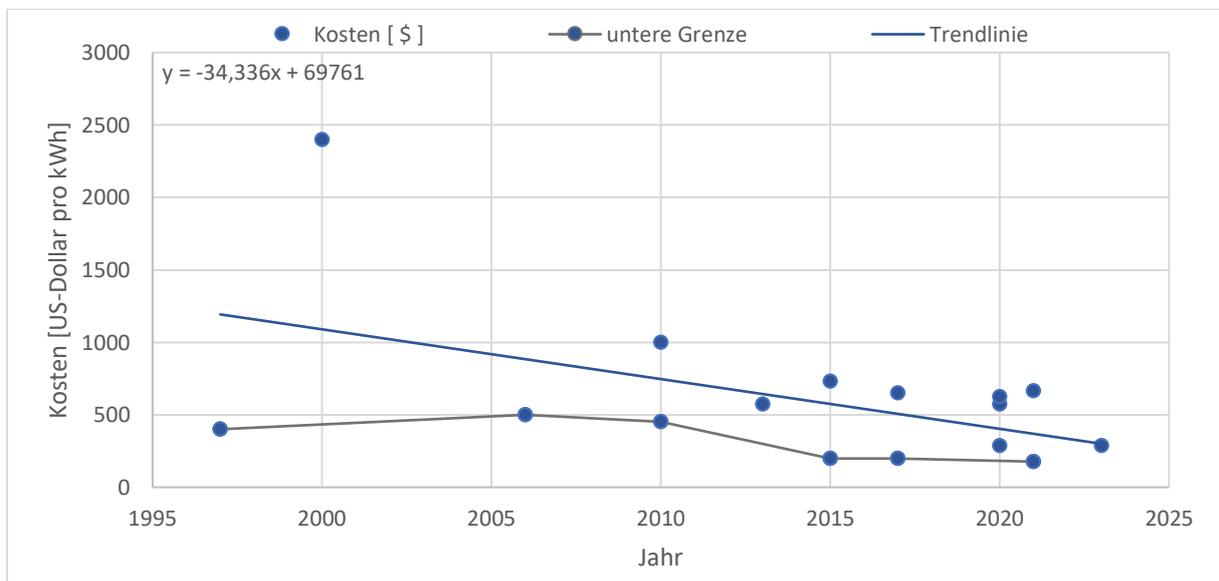


Abbildung 32: Entwicklung der Batteriekosten – Nickel-Metallhydrid-Akku

Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Die Trendlinie auf **Abbildung 33** weist eine durchschnittliche Reduktion von 205,84 US-Dollar pro Jahr auf, was innerhalb von fünf Jahren zu einer Kostensenkung von knapp 1.000 US-Dollar pro kWh führen würde.

Die Entwicklung der unteren Preisgrenze weist auf eine exponentielle Preissenkung hin, die sich im Zeitverlauf auf ein stabiles Niveau bei ca. 200 US-Dollar einzupendeln scheint. Nach der Markteinführung des Lithium-Cobaltdioxid-Akkus ist eine deutliche Reduktion der Kosten festzustellen.

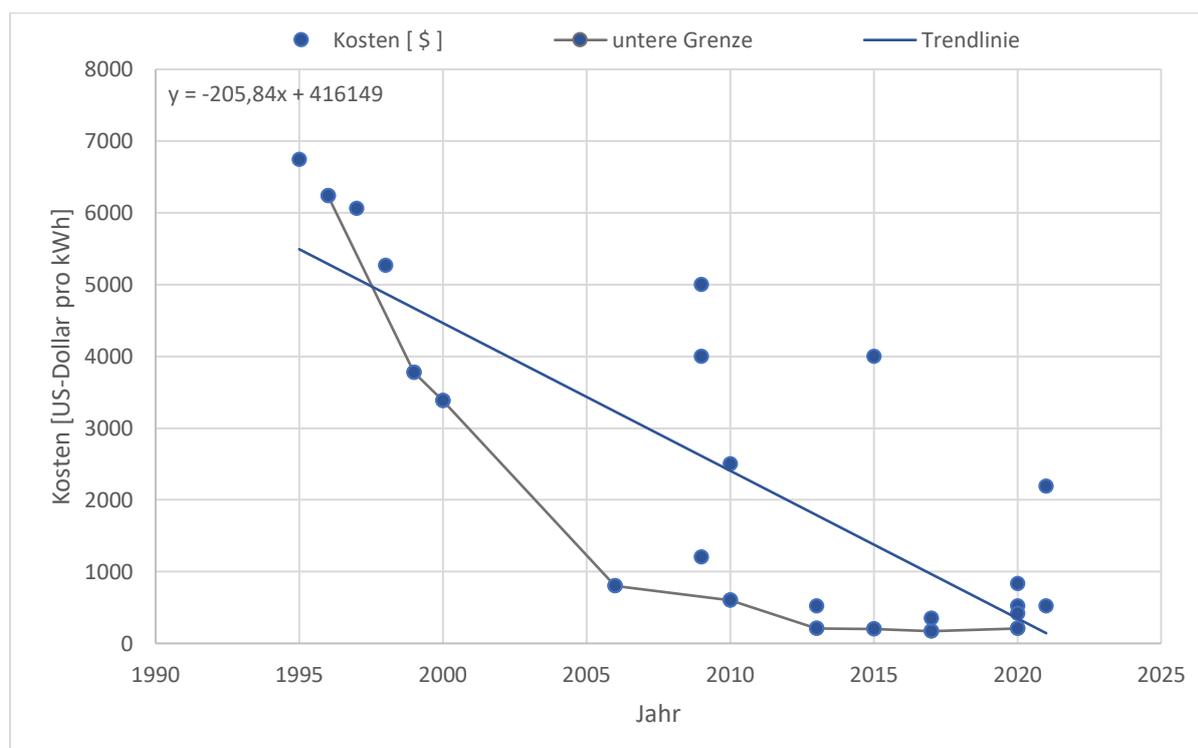


Abbildung 33: Entwicklung der Batteriekosten – Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Lithium-Eisenphosphat-Akku

Abbildung 34 stellt eine Trendlinie mit einer durchschnittlichen Abnahme der Batteriekosten von 8,28 US-Dollar pro Jahr dar. Innerhalb von etwa zwölf Jahren ist der Preis der LFP-Akkus von rund 300 US-Dollar pro kWh auf unter 100 US-Dollar pro kWh gesunken.

Die untere Preisgrenze lässt sich durch lineare Verläufe modellieren, wobei seit 2013 eine Abflachung des Kostenrückgangs zu identifizieren ist, der jedoch weiter fortbesteht.

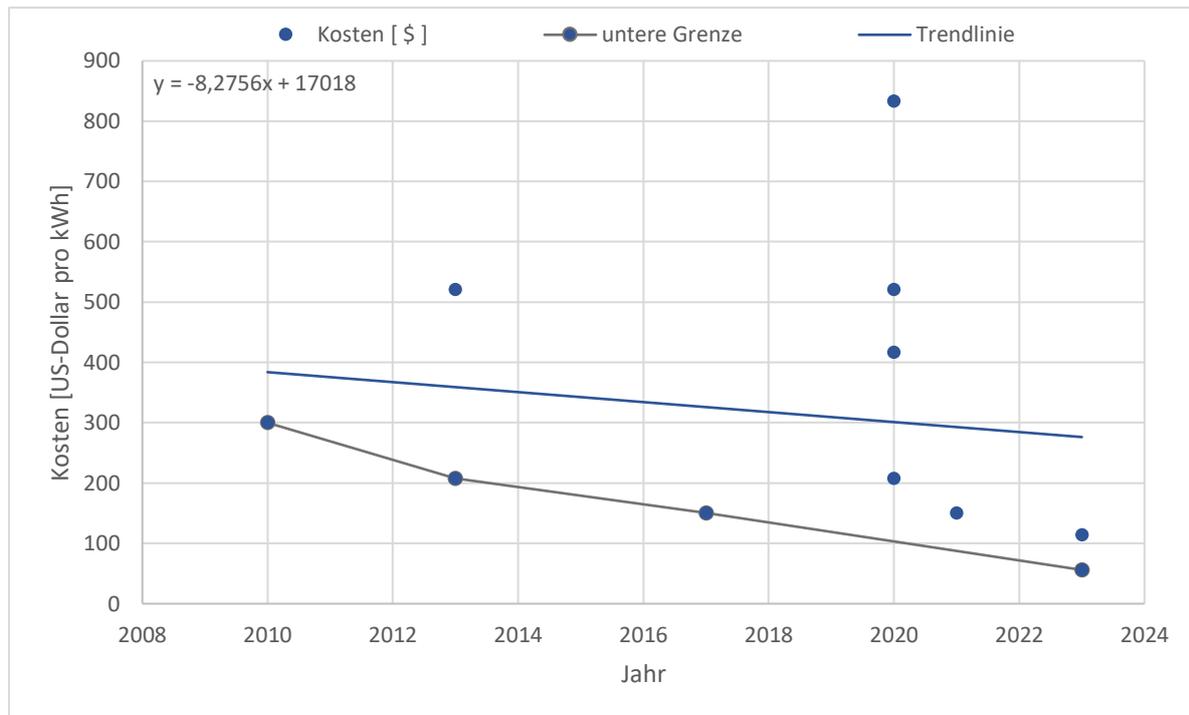


Abbildung 34: Entwicklung der Batteriekosten – Lithium-Eisenphosphat-Akku

Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Die Trendlinie in **Abbildung 35** weist eine durchschnittliche jährliche Reduktion der Kosten um 13,35 US-Dollar pro kWh auf. Die untere Grenze der Batteriekosten verläuft nahezu parallel zur Trendlinie und weist zwischen dem Jahr 2021 und 2023 eine deutlich stärkere Senkung im Gegensatz zur Trendlinie auf. Innerhalb von 13 Jahren fielen die Kosten des NMC-Akkus von 285 US-Dollar pro kWh auf unter 90 US-Dollar pro kWh.

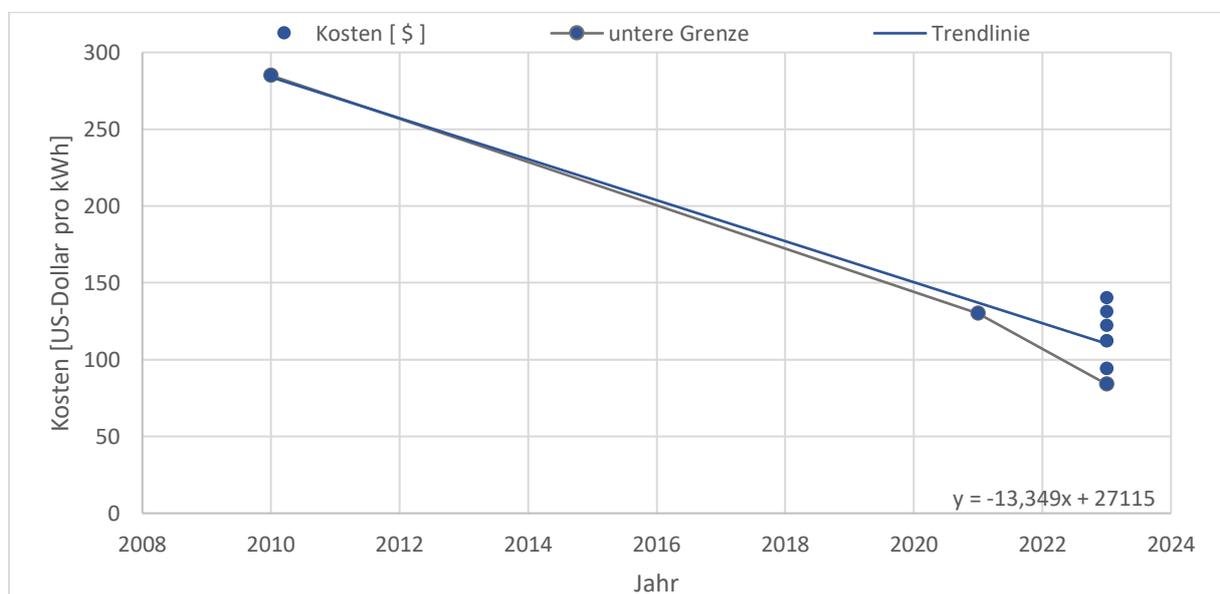


Abbildung 35: Entwicklung der Batteriekosten – Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Die **Abbildung 36** zeigt die Entwicklung der Batteriekosten des Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkus. Der Verlauf weist eine deutliche Ähnlichkeit zum NMC-Akku auf, insbesondere durch die kontinuierliche Abnahme der Kosten. Mit einer durchschnittlichen jährlichen Reduktion von 13,64 US-Dollar pro kWh zeigt die Trendlinie eine negative Steigung. Seit der Anfangsphase ist die Technologie durch eine kontinuierliche Preisreduktion gekennzeichnet, bei der die Kosten von 280 US-Dollar pro kWh im Jahr 2010 auf 75 US-Dollar pro kWh im Jahr 2023 gesunken sind.

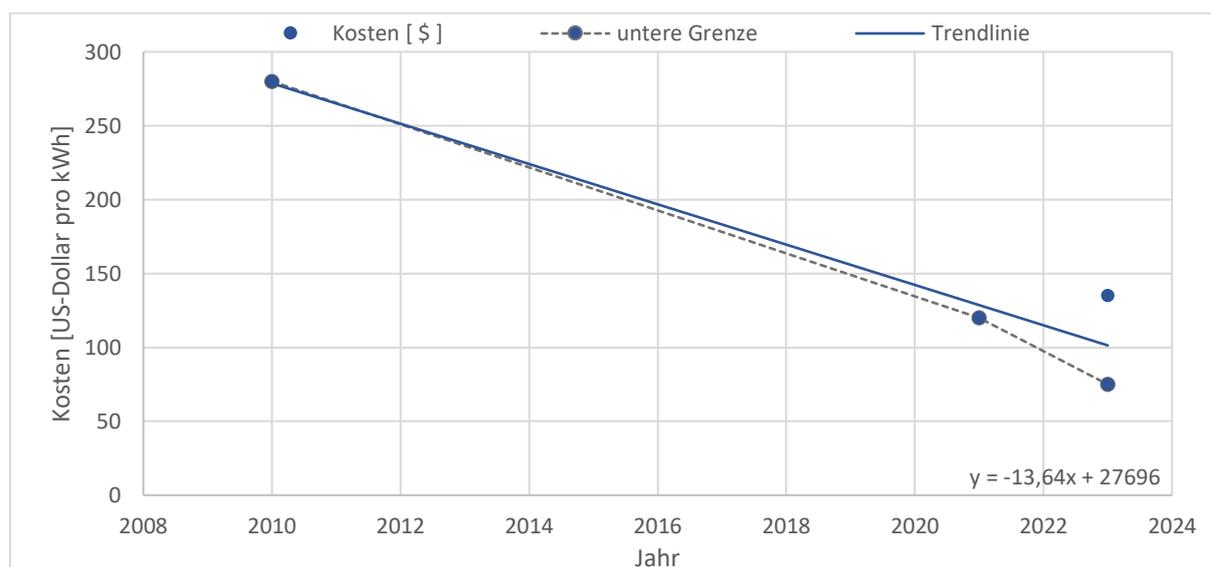


Abbildung 36: Entwicklung der Batteriekosten – Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Ganzheitliche Betrachtung der Akkutechnologien⁸³

Die **Abbildung 37** zeigt die zeitliche Entwicklung der Batteriekosten der in dieser Arbeit behandelten Akkutechnologien. Der übergeordnete Trend verdeutlicht eine jährliche Reduktion der Batteriekosten um 12,33 US-Dollar pro kWh. Auffällig ist, dass Lithium-basierte Akkutechnologien wie LCO, NMC und NCA anfangs mit höheren Preisen eingeführt wurden als ältere Technologien wie Blei- und Nickel-Cadmium-Akkus. Dennoch verzeichnen die Lithium-basierten Systeme die stärksten Kostenrückgänge.

⁸³ In Trenddarstellung wird die obere Grenze der Batteriekosten betrachtet, da die untere Grenze durch den konstant günstigen Bleiakku dominiert wird und somit keine signifikanten Erkenntnisse liefert. Die obere Grenze erlaubt hingegen eine gesamtheitliche Betrachtung des Kostenmaximums und dessen Entwicklung im Zeitverlauf.

Insbesondere der LCO-Akku fällt durch eine anfänglich drastische Reduktion der Kosten auf, bevor sich die Preise auf einem niedrigeren Niveau stabilisierten.

Im Gegensatz dazu zeigen die älteren Technologien wie Blei- und Nickel-Cadmium-Akkus deutlich langsamere Kostenrückgänge. Moderne Lithium-basierte Technologien wie NMC und NCA stechen durch eine kontinuierliche und signifikante Kostenreduktion hervor, während der LFP-Akku einem ähnlichen Trend folgt, jedoch über den Kosten von NMC und NCA quasi-parallel verläuft.

Die obere Grenze zeigt, dass die Batteriekosten der Akkutechnologien als Gesamtsystem erstmals zwischen 1969 und 1974 um 100 US-Dollar sanken. Durch erhöhten Forschungs- und Entwicklungsaufwand stiegen die Kosten jedoch bis 1993 auf 2000 US-Dollar an. Mit der Markteinführung neuer Batteriesysteme infolge technologischer Fortschritte kam es zunächst zu einem rasanten Kostenanstieg, der die Batteriekosten kurzfristig vervielfachte. Ab der Einführung moderner Technologien setzte jedoch ein exponentiell verlaufender Rückgang der Batteriekosten ein, der sich über die folgenden Jahre deutlich bemerkbar machte.

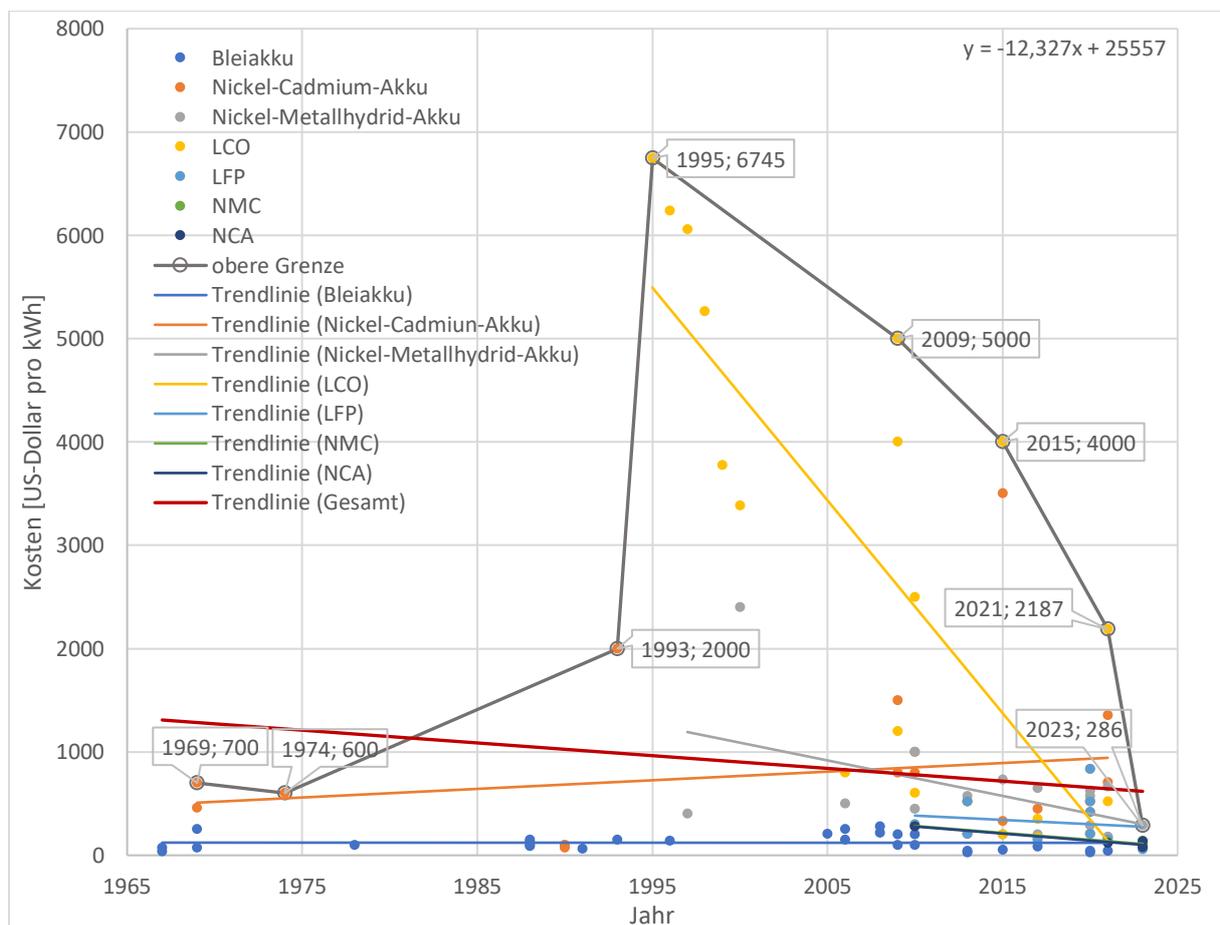


Abbildung 37: Entwicklung der Batteriekosten – Ganzheitliche Betrachtung

5.1.5 Trends der Anzahl der Ladezyklen

Dieser Abschnitt untersucht die zeitliche Entwicklung der Ladezyklen der betrachteten Batterietechnologien.

Bleiakku

Die **Abbildung 38** zeigt, dass die Anzahl der Ladezyklen in den 1960er- bis 1980er-Jahren zunächst einen Anstieg verzeichnete. Ab den 1990er-Jahren jedoch setzte ein rückläufiger Trend ein, der in der Trendlinie dargestellt wird. Diese Linie weist eine negative Steigung von etwa 11,65 Ladezyklen pro Jahr auf und verdeutlicht, dass die tatsächlichen Ladezyklen im Laufe der Zeit kontinuierlich abgenommen haben.

Im Gegensatz dazu zeigt die obere Grenze von 1977 bis 1988 eine Steigung, die sich schließlich 1995 bei 3.000 Ladezyklen einfädelt. Im weiteren Verlauf sinkt die volumetrische Energiedichte bis 2021 auf eine Anzahl von 2.000 Ladezyklen.

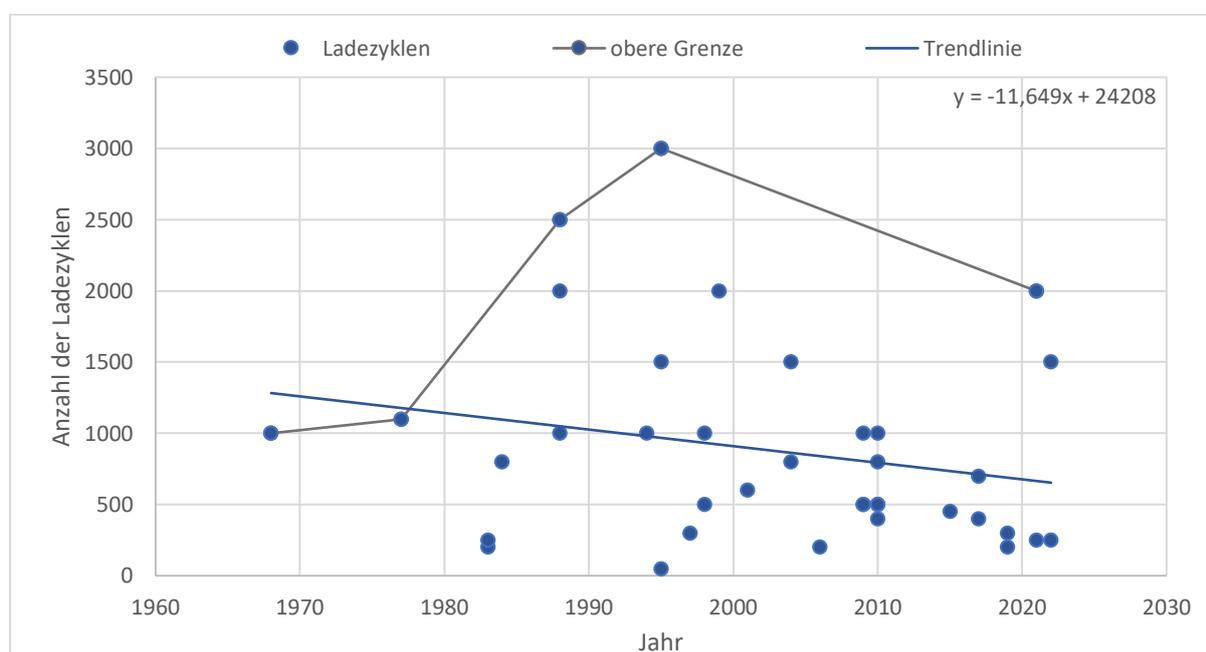


Abbildung 38: Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen – Bleiakku

Nickel-Cadmium-Akku

Die zeitliche Entwicklung der Ladezyklen von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren, wie in **Abbildung 39** dargestellt, zeigt sowohl Fortschritte im technologischen Potenzial als auch Einschränkungen in der praktischen Umsetzung. Die Trendlinie zeigt eine negative Steigung von ca. 6 Ladezyklen pro Jahr, was auf einen langsamen Rückgang der Anzahl an Ladezyklen im Laufe der Zeit hinweist.

Die obere Grenze zeigt hingegen eine alternierende Entwicklungsdynamik die jedoch gedeckt zur Trendlinie ebenfalls eine negative Entwicklung aufweist.

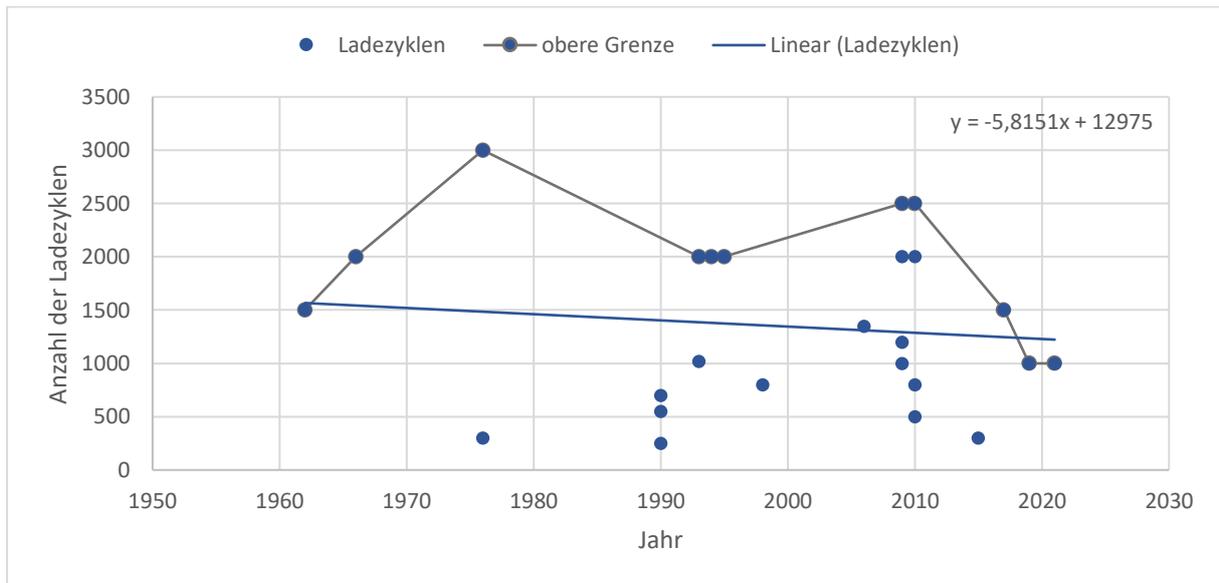


Abbildung 39: Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen – Nickel-Cadmium-Akku

Nickel-Metallhydrid-Akku

Die Darstellung der Entwicklung der Ladezyklen von Nickel-Metallhydrid-Akkus wird in **Abbildung 40** verdeutlicht.

Die Trendlinie zeigt eine moderate Steigerung mit einer Steigung von etwa 12,1 Zyklen pro Jahr. Dies weist darauf hin, dass die durchschnittliche Anzahl an Ladezyklen im Laufe der Jahre leicht zugenommen hat. Die Obergrenze zeigt einen deutlichen Anstieg bis etwa 2010, gefolgt von einem markanten Rückgang.

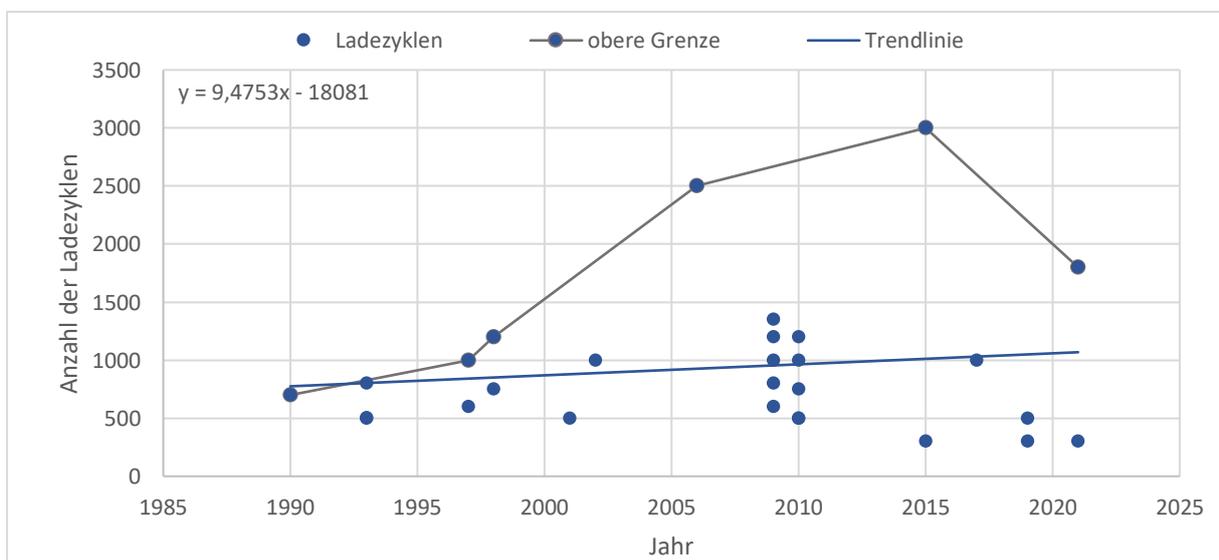


Abbildung 40: Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen – Nickel-Metallhydrid-Akku

Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Die Entwicklung der Ladezyklen des Lithium-Cobaltdioxid-Akkus ist in **Abbildung 41** dargestellt. Die Trendlinie beschreibt mit einer negativen Steigung von etwa 10,3 Ladezyklen pro Jahr einen moderaten Rückgang. Diese Tendenz deutet darauf hin, dass die in der Praxis angegebenen Ladezyklen über die Zeit leicht abgenommen haben. Die dargestellte obere Grenze zeigt zunächst einen deutlichen Anstieg bis etwa 2005 auf einen Wert von 2.500 möglichen Ladezyklen, gefolgt von einem starken Rückgang.

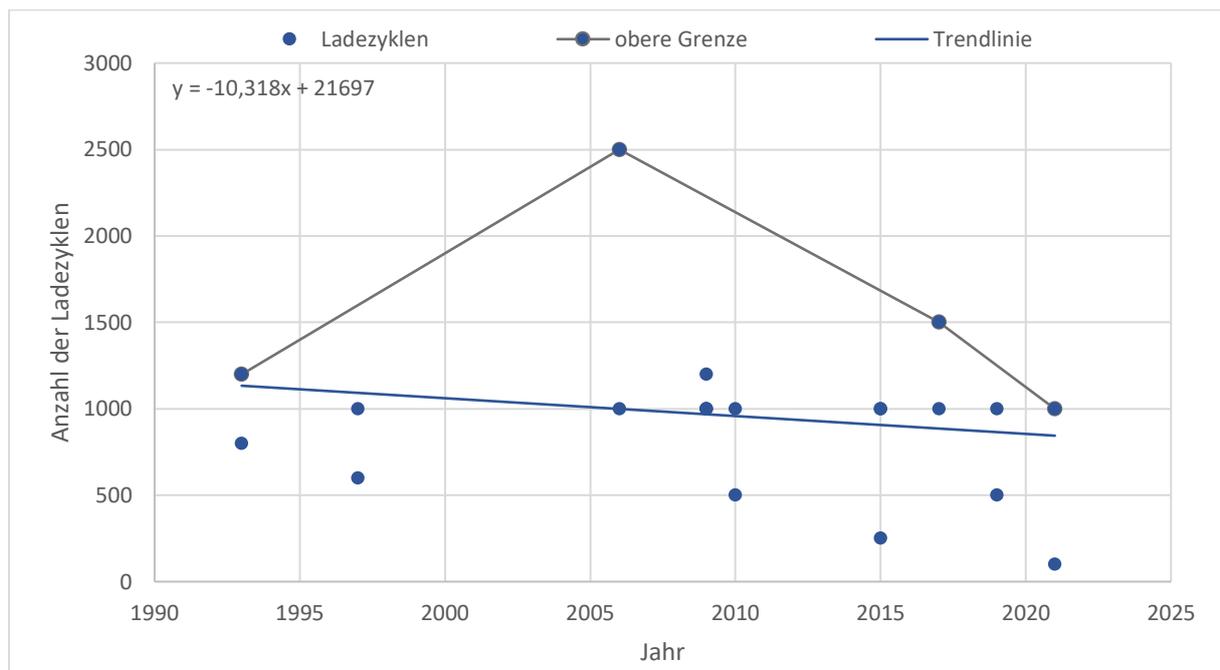


Abbildung 41: Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen – Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Lithium-Eisenphosphat-Akku

Die Trendlinie in **Abbildung 42** weist eine Steigung von etwa 63,74 Ladezyklen pro Jahr auf. Dies verdeutlicht, dass die Ladezyklen dieser Akkus über die Zeit deutlich zugenommen haben. Die obere Grenzlinie zeigt ebenfalls einen deutlichen Anstieg.

Dies bestätigt, dass die Leistungsfähigkeit von Lithium-Eisenphosphat-Akkus im Laufe der Zeit kontinuierlich gesteigert wurde.

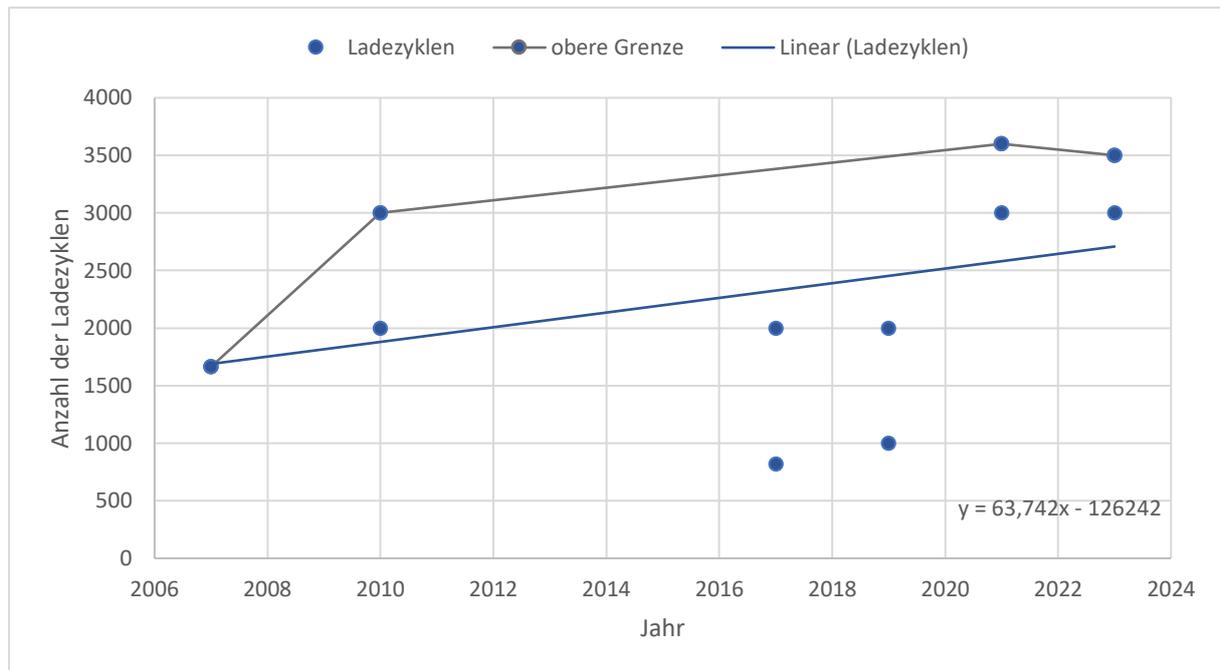


Abbildung 42: Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen – Lithium-Eisenphosphat-Akku

Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Abbildung 43 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen von Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkus. Sowohl die Trendlinie als auch die obere Grenze zeigen einen Rückgang der Ladezyklen. Beide Graphen haben einen nahezu parallelen Verlauf mit einem Höhenversatz.

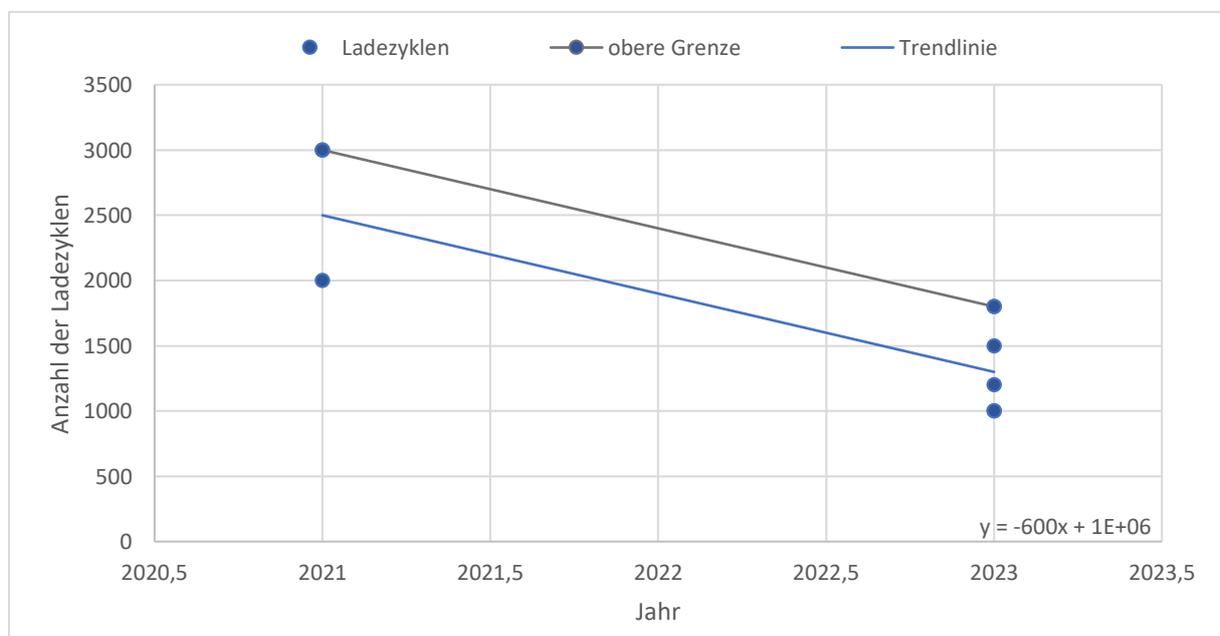


Abbildung 43: Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen – Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Abbildung 44 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen des Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkus. Die Trendlinie zeigt einen mäßigen Anstieg von etwa 25 Ladezyklen pro Jahr. Die obere Grenze basiert wie beim NMC-Akku ausschließlich auf den beiden maximalen Datenpunkten aus 2021 und 2023 und hat eine deutliche negative Steigung.

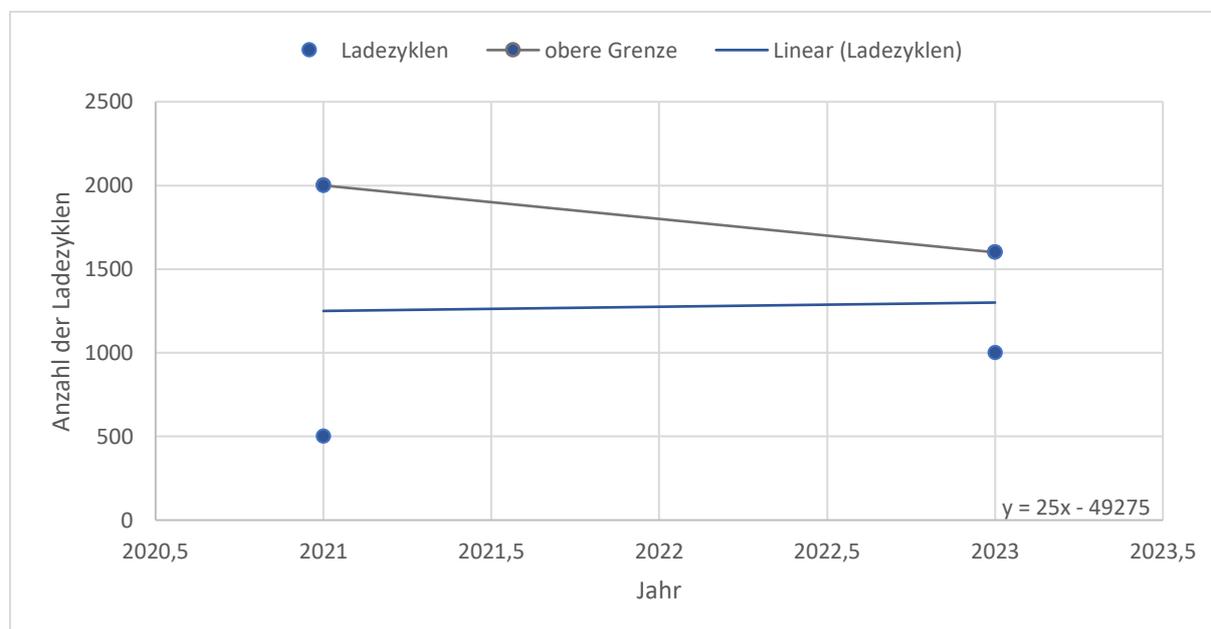


Abbildung 44: Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen – Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Ganzheitliche Betrachtung der Akkutechnologien

Abbildung 45 bietet eine ganzheitliche Betrachtung der Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen der behandelten Akkutechnologien über die Zeit. Die Trendlinie, die die Gesamtentwicklung der Ladezyklen aller Technologien beschreibt, erfährt eine jährliche Steigung von 4,12, welches bedeutet, dass die Anzahl an Ladezyklen im Schnitt jährlich um ca. 4 Ladezyklen gestiegen ist. Die obere Grenze der maximal möglichen Ladezyklen aller Akkutechnologien zeigt zwischen 1962 und 1976 ein nahezu linearer Anstieg der Ladezyklen. In den darauffolgenden 39 Jahren, bis 2015, blieb die Zyklenzahl auf einem konstanten Niveau. Erst ab 2015 zeichnet sich ein erneuter Aufwärtstrend ab, der bis 2021 erkennbare Fortschritte in der Ladezyklenzahl zeigt. Getrennt betrachtet zeigt die Trendlinie des Bleiakkus einen klaren negativen Verlauf. Ähnlich verhält es sich beim Nickel-Cadmium-Akku, dessen abnehmende Ladezyklen die Verdrängung durch umweltfreundlichere und effizientere Technologien widerspiegeln.

Der Nickel-Metallhydrid-Akku hingegen zeigt eine moderate Steigerung, da er in den 1990er- und 2000er-Jahren als umweltfreundliche Alternative zu Nickel-Cadmium-Akkus weiterentwickelt wurde. Im Bereich der Lithium-Technologien lassen sich unterschiedliche Entwicklungen beobachten. Der Lithium-Cobaltdioxid-Akku weist einen leicht abnehmenden Verlauf auf, da er zunehmend durch modernere Varianten verdrängt wird. Lithium-Eisenphosphat-Akkus hingegen zeigen einen deutlich positiven Trend, der ihre hohe Zuverlässigkeit und Langlebigkeit unterstreicht. Die Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid-Akkus und Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkus zeigen ebenfalls positive Trends. Insgesamt wird deutlich, dass moderne Lithium-Technologien die dominierende Rolle übernehmen, während ältere Akkutypen zunehmend an Relevanz verlieren. Die Akkutechnologien zeigen in ihrer Gesamtheit eine diversifizierte Entwicklung. Während ältere Technologien wie Bleiakkus und Nickel-Cadmium-Akkus tendenziell stagnieren oder zurückgehen, zeigen modernere Technologien, insbesondere Lithium-Eisenphosphat- und Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkus, eine klare Aufwärtstendenz.

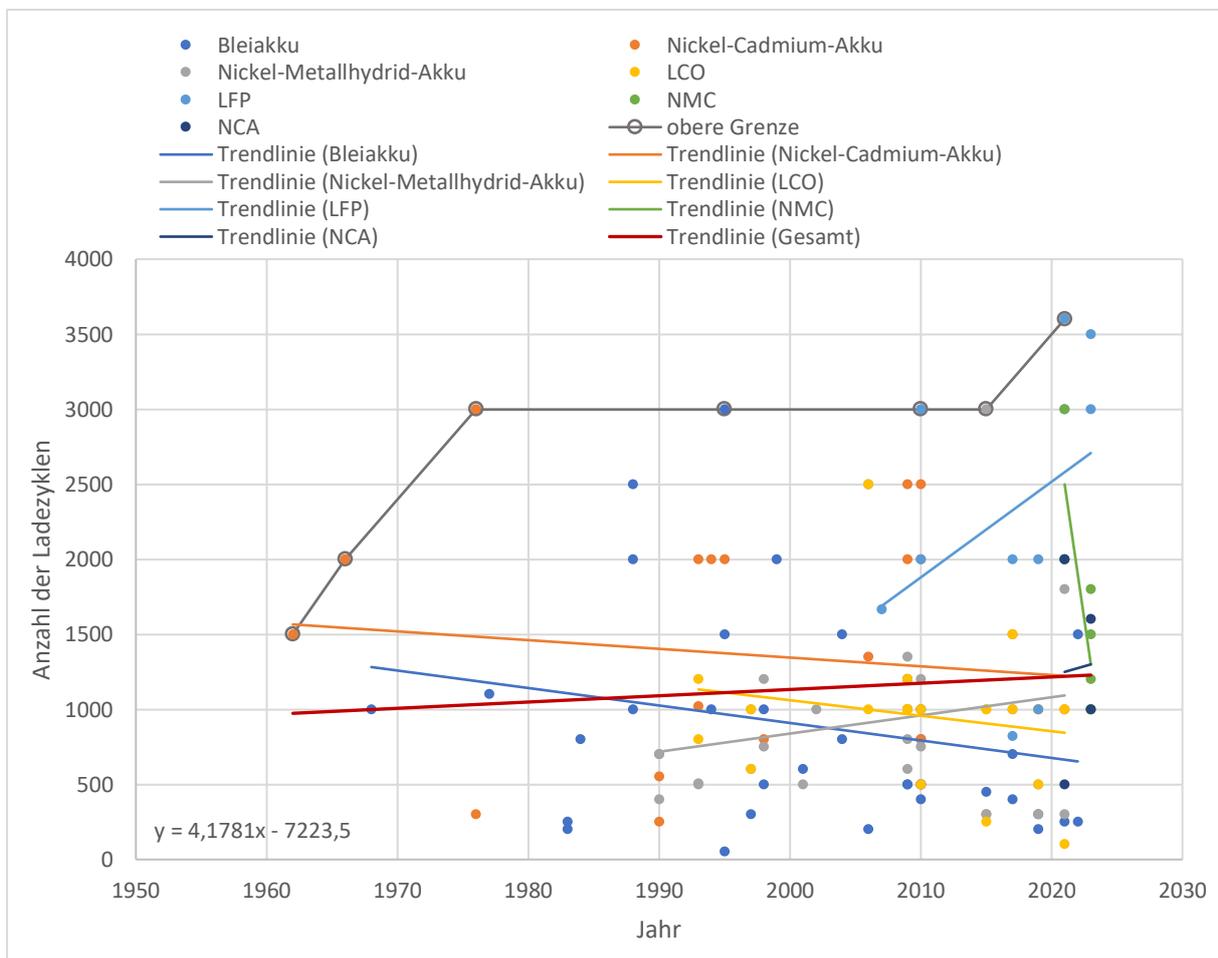


Abbildung 45: Entwicklung der Anzahl der Ladezyklen – Ganzheitliche Betrachtung

5.1.6 Trends der Ladegeschwindigkeit

In diesem Abschnitt geht es um die Entwicklung der Ladegeschwindigkeit der behandelten Akkutechnologien. Die **Abbildung 46** zeigt die zeitliche Entwicklung der Ladegeschwindigkeit verschiedener Akkutechnologien von 1960 bis zum aktuellen Stand der Technik. Die Ladegeschwindigkeit, gemessen in Stunden, nimmt bei nahezu allen dargestellten Technologien über die Zeit hinweg ab. Die Entwicklung, die durch die Trendlinien beschrieben werden, verdeutlichen die durchschnittlichen jährlichen Veränderungen der Ladezeiten.

Der Bleiakku zeigt über die Jahre eine Abnahme der Ladegeschwindigkeit. Die dazugehörige Trendlinie weist eine negative Steigung von 0,1193 auf, was einer jährlichen Verbesserung der Ladezeit um etwa 0,12 Stunden (etwa 7 Minuten) entspricht. Im Vergleich dazu zeigt der Nickel-Cadmium-Akku die steilste Abnahme der Ladegeschwindigkeit. Mit einer negativen Steigung von 0,5256 reduziert sich die Ladezeit hier jährlich um durchschnittlich 0,53 Stunden (etwa 32 Minuten), was eine deutlich schnellere Verbesserung darstellt.

Anders verhält es sich beim Nickel-Metallhydrid-Akku, der im Vergleich eine sehr geringe Reduktionsrate der Ladegeschwindigkeit aufweist. Die Trendlinie zeigt hier eine negative Steigung von 0,0132, was einer jährlichen Verkürzung der Ladezeit um lediglich 0,013 Stunden (etwa 1 Minute) entspricht. Der Lithium-Cobaltdioxid-Akku hingegen ähnelt mit einer mäßigen Abnahme der Ladegeschwindigkeit dem Bleiakku. Seine Trendlinie weist eine negative Steigung von 0,1196 auf, was einer Verbesserung um etwa 0,12 Stunden (circa 7 Minuten) pro Jahr entspricht. Im Gegensatz zu diesen Entwicklungen zeigt der NCA-Akku keine Veränderung der Ladegeschwindigkeit. Dies wird durch die Trendlinie mit einer Steigung von 0 deutlich, die eine konstante Ladegeschwindigkeit bestätigt. Für den NMC-Akku hingegen konnte aufgrund der Datenlage lediglich ein einzelner Wert erfasst werden, weshalb eine Trendanalyse nicht möglich war. Diese Datenlücke schränkt die Aussagekraft erheblich ein und verhindert eine fundierte Bewertung der Entwicklung der Ladegeschwindigkeit für diese Technologie.

Zusammenfassend verdeutlichen die Trends, dass ältere Technologien wie der Blei- und Nickel-Cadmium-Akku eine signifikante Abnahme der Ladezeiten erfuhren, während neuere Technologien wie der NCA-Akku eine konstante Ladegeschwindigkeit aufweisen. Das Diagramm in **Abbildung 46** spiegelt somit sowohl die Fortschritte in der Akkuforschung als auch die unterschiedlichen Entwicklungsdynamiken der betrachteten Technologien wider.

Bei Betrachtung der Ladegeschwindigkeit als Gesamtsystem über die Akkutechnologie hinweg wird ersichtlich, dass die gesamtheitlich betrachtete Trendlinie eine jährliche Verkürzung der Ladedauer von 0,37 Stunden (ca. 22 Minuten) aufweist. Die obere Grenze verdeutlicht auch eine deutliche Verkürzung der Ladezeiten im Gesamttrend. Innerhalb von 23 Jahren reduzierte sich die Ladezeit von 30 Stunden auf nur 2 Stunden, was einer Einsparung von 28 Stunden entspricht. In den darauffolgenden 29 Jahren wurde die Ladezeit weiter verkürzt, sodass eine Ladezeit von nur noch 0,33 Stunden (etwa 20 Minuten) erreicht wurde.

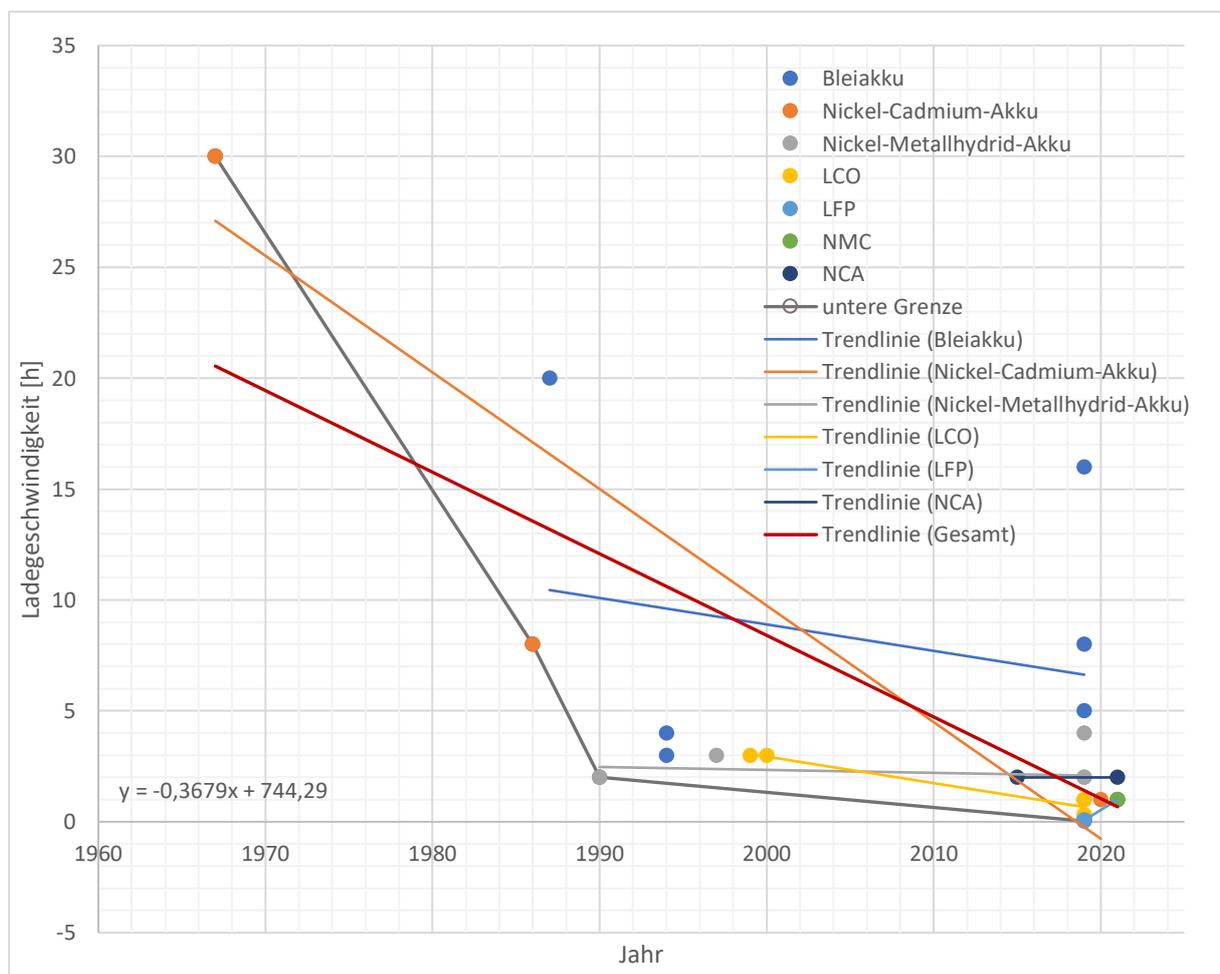


Abbildung 46: Entwicklung der Ladegeschwindigkeit – Ganzheitliche Betrachtung

5.1.7 Trends der Marktkapazität

Während der Datenrecherche konnte kaum relevante Informationen über die Marktkapazität der unterschiedlichen Akkutechnologien gefunden werden. Die verfügbaren Daten waren nicht ausreichend, um daraus einen umfassenden und aufschlussreichen Trend zu ermitteln. Um dennoch eine fundierte Grundlage für die Darstellung der Entwicklung der Marktkapazität zu schaffen, wurde die Information des Fraunhofer Institutes nach **Thielmann et al. 2017** herangezogen. Sie bietet eine verlässliche Datenbasis, die es ermöglicht, zumindest einen aussagekräftigen Trend der Kapazitätsentwicklung der behandelten Akkutechnologien abzuleiten. Trotz der Einschränkungen durch die begrenzte Datenverfügbarkeit liefert diese Herangehensweise wertvolle Einblicke in die Marktentwicklung und bildet eine solide Grundlage für weitere Untersuchungen.

Das in der **Abbildung 47** vorliegende Diagramm veranschaulicht die historische Entwicklung der globalen Batterienachfrage und gibt einen Ausblick auf prognostizierte zukünftige Trends bis zum Jahr 2025. Dabei werden unterschiedliche Batterietechnologien und ihre jeweiligen Einsatzmöglichkeiten berücksichtigt. Die Darstellung zeigt die Kapazitätsentwicklung der Technologien in Gigawattstunden (GWh), wobei ältere Technologien wie Nickel-Cadmium- und Nickel-Metallhydrid-Akkus auf der linken Achse abgebildet sind, während die moderne Nachfrage nach Lithium-basierten Akkus und Bleiakkus auf der rechten Achse dargestellt wird. Diese doppelte Achsenskalierung verdeutlicht, dass die Kapazität moderner Batterietechnologien die Kapazität älterer Systeme um ein Vielfaches übersteigt.

Bis zum Jahr 2017 zeigen die einzelnen Akkutechnologien unterschiedliche Entwicklungen. Der Bleiakku verläuft konstant auf einem niedrigen Niveau bis zum Jahr 1970, anschließend wird ein exponentieller Anstieg verzeichnet. Dieser flacht zwischen 1990 und 2010 ab und erfährt danach einen deutlichen Aufschwung. Der Nickel-Cadmium-Akku verzeichnet zunächst einen mäßigen Anstieg, der in den 1990er Jahren seinen Höhepunkt erreicht. Anschließend nimmt der Verlauf langsam ab. Der Nickel-Metallhydrid-Akku steigt ab den 1990er Jahren deutlich an, stabilisiert sich jedoch ab etwa 2005 und zeigt bis 2017 keine signifikanten Veränderungen mehr.

Die Lithium-Ionen-Akkus hingegen weisen ab den 1990er Jahren einen kontinuierlichen Anstieg auf, der ab 2010 stark beschleunigt wird und bis 2017 eine exponentielle Wachstumsphase erreicht. Andere Technologien verbleiben im Vergleich auf einem konstant niedrigen Niveau und zeigen bis 2017 keine wesentlichen Veränderungen.

Der Gesamttrend der Batterien verläuft ähnlich dynamisch wie beim Bleiakku. Dieser verläuft konstant auf einem Niveau bis 1970 steigt dann exponentiell an bis zum Jahr 1990 und flacht dann langsam ab. Ab 2010 wird ein signifikanter Anstieg verzeichnet.

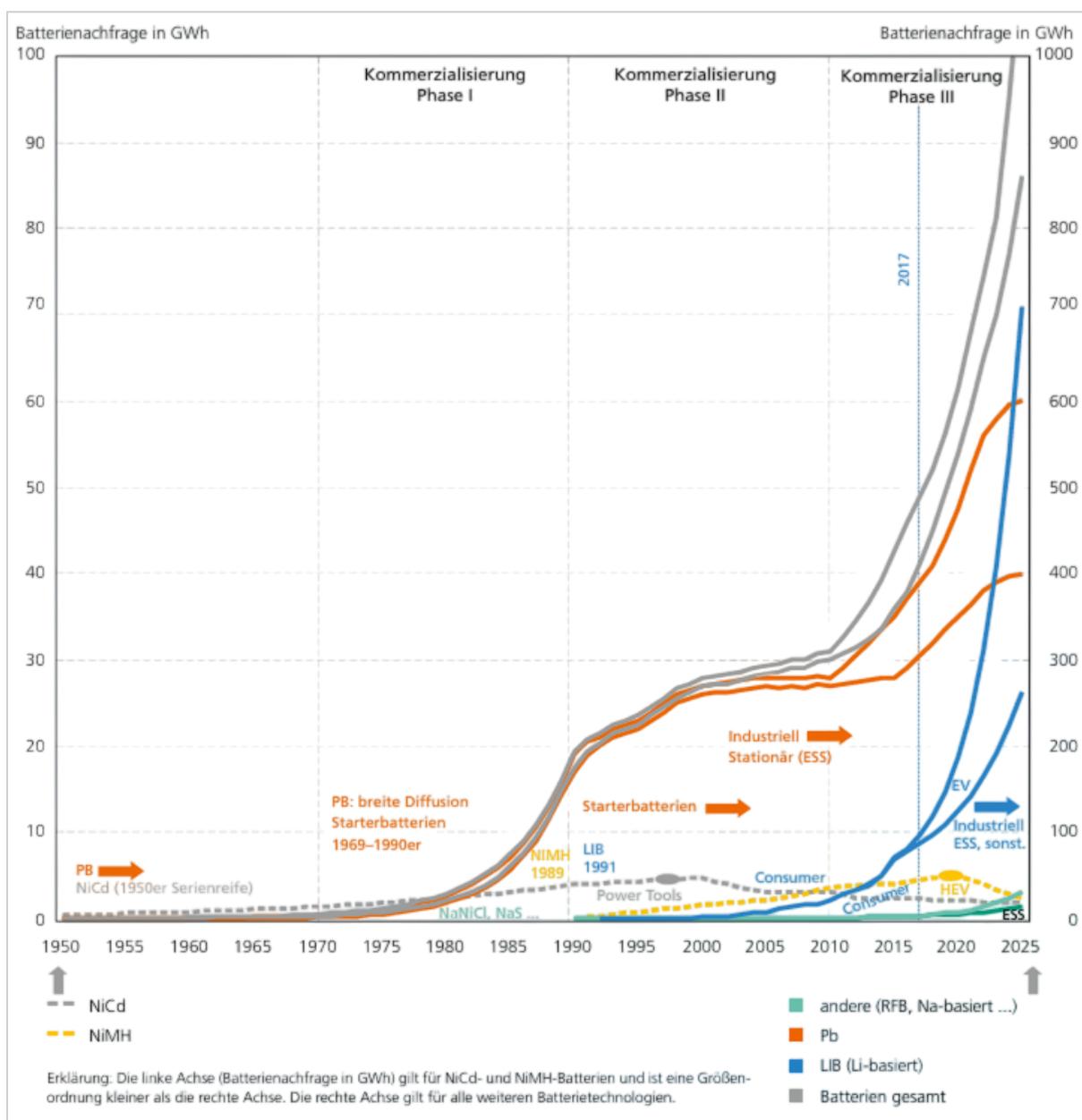


Abbildung 47: Entwicklung der Nachfrage – Ganzheitliche Betrachtung [Thielmann et al. 2017]

5.1.8 Trends der Lebensdauer

Die **Abbildung 48** verdeutlicht die zeitlichen Trends der Lebensdauer der behandelten Akkutechnologien im Zeitraum von 1990 bis zum jetzigen Stand der Technik. Dies soll dabei unterschiedliche Entwicklungen, die die technologische Relevanz und den Fortschritt im Bereich der Akkuforschung widerspiegeln, zeigen. Zu beachten ist, dass die Analyse erst ab 1990 einsetzt, da in zuvor veröffentlichten Literaturquellen keine belastbaren Daten zur Lebensdauer der betrachteten Technologien vorliegen.

Die Lebensdauer des Bleiakkus zeigt über den dargestellten Zeitraum einen leichten Abwärtstrend. Während sie in den 1990er-Jahren noch zwischen zehn und 15 Jahren lag, reduzierte sie sich bis 2020 auf etwa fünf bis zehn Jahre. Beim Nickel-Cadmium-Akku ist hingegen ein deutlich stärkerer Rückgang der Lebensdauer zu beobachten. Um das Jahr 2000 betrug diese noch über 20 Jahre, fiel jedoch bis 2020 auf unter zehn Jahre. Auch der Nickel-Metallhydrid-Akku verzeichnet eine abnehmende Lebensdauer. In den frühen 2000er-Jahren lag diese noch bei etwa zehn Jahren, reduzierte sich jedoch bis 2020 auf einen Bereich von fünf bis sieben Jahren.

Im Gegensatz dazu zeigt der Lithium-Eisenphosphat-Akku eine über den gesamten Zeitraum stabile Lebensdauer, die konstant zwischen fünf und zehn Jahren bleibt. Die Lebensdauer des NMC-Akkus weist einen leichten, jedoch nicht signifikanten Abwärtstrend auf und bewegt sich weiterhin stabil im Bereich von sieben bis zehn Jahren. Für den NCA-Akku konnte hingegen kein Trend ermittelt werden, da die vorliegenden Daten lediglich zwei Werte aus demselben Jahr umfassen, was eine fundierte Analyse verhindert. Dennoch wurde für diese Akkutechnologie eine Lebensdauer im Bereich von sieben bis zehn Jahren beschrieben. Im Gegensatz zu den stabilen Lithium-Eisenphosphat- und NMC-Akkus zeigt der Lithium-Cobaltdioxid-Akku eine abnehmende Lebensdauer. Während diese in den frühen 2000er-Jahren noch bei zehn bis 15 Jahren lag, reduzierte sie sich bis 2020 auf fünf bis zehn Jahre.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ältere Technologien wie der Bleiakku, Nickel-Cadmium-Akku und Nickel-Metallhydrid-Akku eine abnehmende Lebensdauer aufweisen. Im Gegensatz dazu zeichnen sich Lithium-basierte Technologien wie LFP und NMC durch stabile Lebensdauern aus, was auf einen Fortschritt in der Akkutechnologie hindeutet.

Bei einer gesamtheitlichen Betrachtung der Lebensdauer über alle Akkutechnologien hinweg zeigt der übergeordnete Trend einen kontinuierlichen Rückgang. Die Lebensdauer des Gesamtsystems reduziert sich dabei jährlich um durchschnittlich 0,2 Jahre, welches eine Reduktion der Lebensdauer um 2,4 Monate pro Jahr bedeutet.

Die Lebensdauer gemäß der oberen Grenze blieb über einen Zeitraum von 22 Jahren bis 2015 konstant. Anschließend wurde innerhalb von sechs Jahren ein Rückgang um fünf Jahre verzeichnet. Darauf folgte eine Stabilisierung, bei der die Lebensdauer der Akkutechnologien über drei Jahre hinweg konstant bei einer Lebensdauer von 15 Jahren blieb.

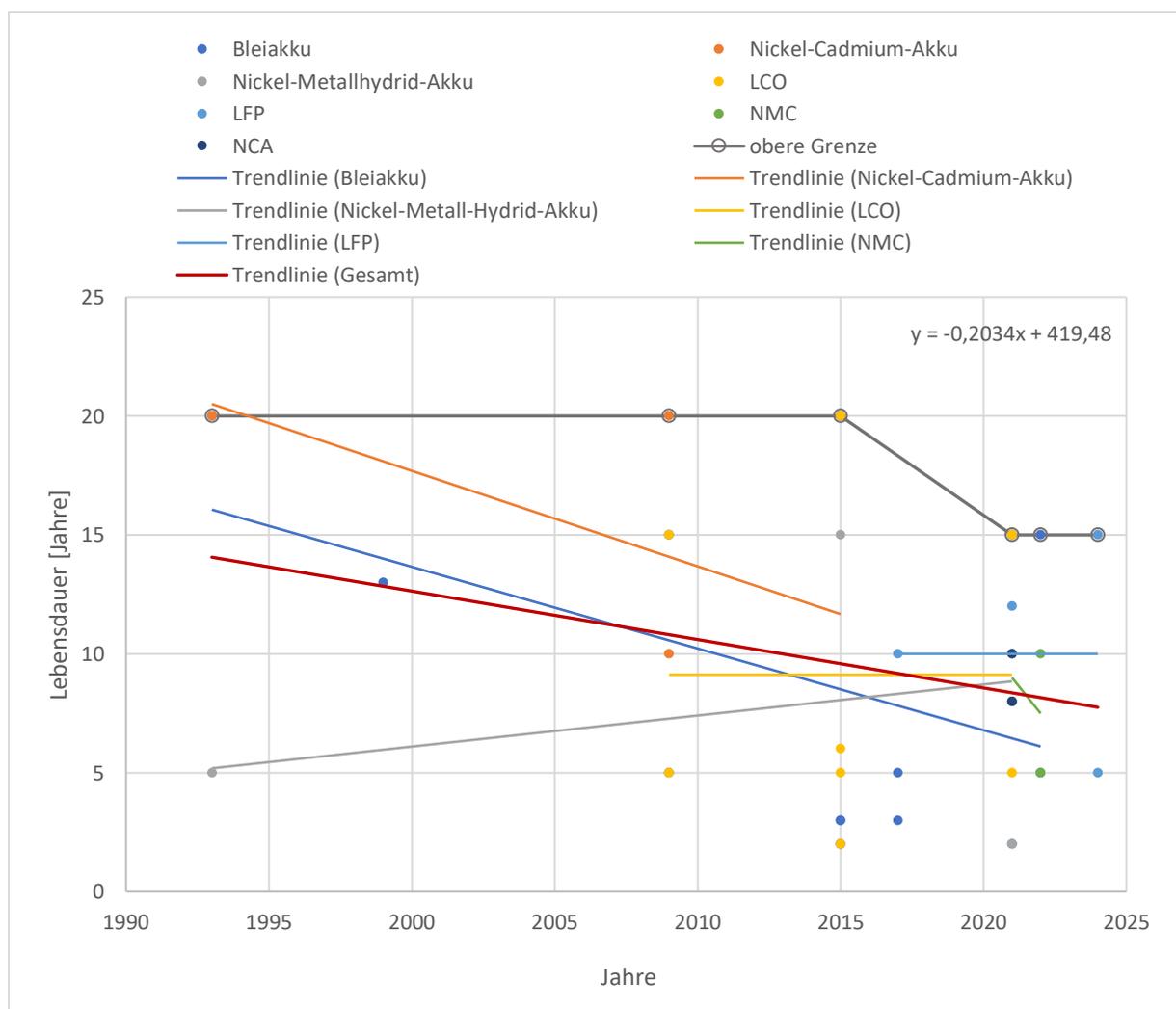


Abbildung 48: Entwicklung der Lebensdauer – Ganzheitliche Betrachtung

5.2 Analyse auf Eignung von Extrapolation

Im vorliegenden Kapitel wird die Eignung der Extrapolation langfristiger Trends in der Entwicklung elektrischer Energiespeicher systematisch analysiert. Die Bewertung der Modelle erfolgt auf Basis der in **Kapitel 3.3.4** erläuterten Methodik.

5.2.1 Eignung der Extrapolation der Markteintritte

Die Untersuchung der Übergangszeiten von der Entwicklung bis zur Marktreife der verschiedenen Akkutechnologien zeigt eine deutliche Verkürzung im Verlauf der technologischen Entwicklung. Während frühe Technologien wie der Bleiakku eine Übergangszeit von 22 Jahren aufwiesen, betrug diese beim Nickel-Cadmium-Akku 94 Jahre, was auf die begrenzte Nachfrage und die technologischen Herausforderungen der damaligen Zeit zurückzuführen ist. Mit der Einführung des Nickel-Metallhydrid-Akkus reduzierte sich die Übergangszeit auf 15 Jahre und bei modernen Lithium-Ionen-Technologien wie dem Lithium-Cobaltdioxid-Akku, dem Lithium-Eisenphosphat-Akku sowie den NMC- und NCA-Akkus verkürzte sie sich weiter auf Werte zwischen sieben und 17 Jahren. Diese fortschreitende Verkürzung der Übergangszeiten deutet darauf hin, dass die Einführung neuer Akkutechnologien zunehmend schneller erfolgt. Dieser Trend kann durch die Verbesserung von Forschungs- und Entwicklungsprozessen, die Optimierung von Produktionsmethoden und eine gestiegene Marktnachfrage nach leistungsfähigeren Energiespeichersystemen erklärt werden. Auf dieser Grundlage könnte eine Trendextrapolation darauf hinweisen, dass weiterhin zukünftige Akkutechnologien innerhalb eines Jahrzehnts oder weniger von der Entwicklung bis zur Marktreife gelangen könnten.

Bei der Extrapolation dieses Trends ist jedoch eine sorgfältige Bewertung erforderlich. Der Verlauf der Verkürzung ist nicht zwingend linear und wird durch externe Faktoren wie technologische Sättigung, Marktbedingungen und regulatorische Anforderungen beeinflusst. Zudem könnten bereits erreichte kurze Übergangszeiten moderner Technologien wie NMC und NCA darauf hindeuten, dass eine weitere signifikante Verkürzung zunehmend schwieriger zu realisieren ist. Eine Extrapolation der Übergangszeiten ist daher zwar grundsätzlich möglich, sollte jedoch unter Berücksichtigung potenzieller Limitierungen und externer Einflüsse kritisch bewertet werden.

5.2.2 Eignung der Extrapolation der gravimetrischen Energiedichte

Bleiakku

Die lineare Regression für die gravimetrische Energiedichte des Bleiakkus ergibt ein Bestimmtheitsmaß von 0,08, das gemäß der Bewertungsmatrix als „gering“ einzustufen ist. Dieser Wert verdeutlicht, dass das lineare Regressionsmodell keine signifikante Erklärungskraft für die Entwicklung dieses Parameters aufweist, wodurch eine Eignung für Extrapolation als ausgeschlossen betrachtet werden kann.

Ein Blick auf die obere Grenze der erhobenen Daten zeigt jedoch ein anderes Bild. Die Stabilität der gravimetrischen Energiedichte über einen Zeitraum von knapp 30 Jahren lässt darauf schließen, dass zukünftige Veränderungen in diesem Bereich äußerst unwahrscheinlich sind. Dieses konstante Niveau legt nahe, dass der technologische Fortschritt für Bleiakkus in Bezug auf die gravimetrische Energiedichte ausgeschöpft ist. Dieses bestätigt hierbei neben dem Bestimmtheitsmaß, dass die lineare Regressionsanalyse für die Extrapolation in die Zukunft nicht sinnbehaftet ist, weil die jährliche Steigung von 0,2 Wh/kg mit der gleichbleibenden Obergrenze widerlegt ist. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 30** ersichtlich.

Tabelle 30: Bewertungsmatrix der grav. Energiedichte - Bleiakku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzklinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Nickel-Cadmium-Akku

Die gravimetrische Energiedichte des Nickel-Cadmium-Akkus zeigt einen positiven, aber schwachen Trend mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,12. Dieses fällt laut der Bewertungsmatrix in die Güteklasse „gering“ und scheint demnach für die Eignung auf Extrapolation nicht brauchbar zu sein.

Mit Hilfe der oberen Grenzklinie der gravimetrischen Energiedichte des Nickel-Cadmium-Akkus wird eine deutliche Trendentwicklung sichtbar. Seit 2009 stagniert die maximal erreichte gravimetrische Energiedichte bei 80 Wh/kg.

Unter Berücksichtigung der **Richtlinie 2006/66/EG**, die den Cadmiumanteil in Batterien von mehr als 0,002 Gewichtsprozent stark begrenzt, lässt sich feststellen, dass auch in Zukunft keine weiteren Entwicklungen in dieser Technologie zu erwarten sind. Stattdessen wird verstärkt auf alternative Technologien ausgewichen, um die bestehenden Einschränkungen zu umgehen. Insgesamt verdeutlicht die obere Grenzlinie die Ungeeignetheit der Regressionsgeraden für eine realistische Abbildung des Trends und zeigt gleichzeitig eine Eignung auf Extrapolation in die Zukunft. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 31** ersichtlich.

Tabelle 31: Bewertungsmatrix der grav. Energiedichte – Nickel-Cadmium-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzlinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Nickel-Metallhydrid-Akku

Die Regressionsanalyse der gravimetrischen Energiedichte des Nickel-Metallhydrid-Akkus weist ein Bestimmtheitsmaß von etwa 0,0475 auf. Nach der Bewertungsmatrix fällt dieser Wert in die Güteklasse „gering“ und deutet darauf hin, dass die Analyse für eine zuverlässige Extrapolation in die Zukunft ungeeignet ist.

In Betrachtung der oberen Grenzlinie ergibt sich ein periodisch wiederholendes Muster. Dabei werden, wie in **Kapitel 5.1.2** erwähnt, im Abstand von 10 Jahren die gravimetrischen Energiedichten überboten. Es ergibt sich ein periodisches Muster, welches sich über 2 Perioden wiederholt und in der dritten Periode denselben Verlauf annimmt. In Kombination mit der ansteigenden Trendlinie lässt sich feststellen, dass trotz des niedrigen Bestimmtheitsmaßes und der Einstufung in die Güteklasse „gering“ die Steigungen der oberen Grenzlinie und der Trendlinie übereinstimmen. Diese Übereinstimmung wird als Indiz für die Richtigkeit des Trends gewertet, wodurch eine Extrapolation möglich erscheint. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 32** ersichtlich.

Tabelle 32: Bewertungsmatrix der grav. Energiedichte – Nickel-Metallhydrid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	3	1,2
Grenzlinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	2,6

Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Die Bewertung der Lithium-Cobaltdioxid-Akkus ergibt mit einem Bestimmtheitsmaß von etwa 0,11 in der Bewertungsmatrix eine Einstufung in die Güteklasse „gering“. Die Analyse des Verlaufs der oberen Grenze deutet zudem auf eine Zurückhaltung in der Weiterentwicklung dieser Technologie hin. Während zunächst ein Höchstwert erreicht wurde, zeigt sich in den folgenden Jahren ein Abflachen des Fortschritts, was darauf hindeutet, dass die Forschung im Bereich der Lithium-Cobaltdioxid-Technologie nicht weiter intensiviert wurde.

Die obere Grenzlinie weist kein konsistentes Muster auf, das als Grundlage für die Ableitung eines Trends herangezogen werden könnte. Diese Beobachtung, kombiniert mit dem geringen Bestimmtheitsmaß der linearen Trendlinie, spricht gegen die Eignung dieser Technologie für eine verlässliche Trendextrapolation der gravimetrischen Energiedichte. Eine qualitative Betrachtung der Trendlinie ergibt, dass der abgebildete aufsteigende Trend unrealistisch erscheint. Ein möglicher Grund für diesen Entwicklungsstillstand könnte in der Verfügbarkeit alternativer Akkutechnologien liegen, die aus techno-ökonomischer Perspektive vorteilhafter erscheinen. Infolgedessen fand die Lithium-Cobaltdioxid-Technologie keine Anwendung im Bereich der Elektrofahrzeuge. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 33** ersichtlich.

Tabelle 33: Bewertungsmatrix der grav. Energiedichte – Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1

Lithium-Eisenphosphat-Akku

Der Lithium-Eisenphosphat-Akku wird mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,07 ebenfalls in die Güteklasse „gering“ eingestuft. Eine qualitative Betrachtung des Trends der oberen Grenzlinie zeigt ein äußerst ähnliches Verhalten wie bei der Lithium-Cobaltdioxid-Technologie und liefert somit keine hinreichende Grundlage für die Eignung einer Extrapolation. Qualitativ betrachtet gibt die Trendlinie hingegen ein realistischeres Verhalten an. Der leichte Anstieg scheint in Betracht auf die Lithium-Technologie in die Zukunft extrapolierbar zu sein, sollte jedoch mit Vorsicht betrachtet werden. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 34** ersichtlich.

Tabelle 34: Bewertungsmatrix der grav. Energiedichte – Lithium-Eisenphosphat-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	2	0,8
Grenzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,4

Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Das für den NMC-Akku ermittelte Bestimmtheitsmaß beträgt etwa 0,19. Somit fällt die Einordnung mit diesem Wert weiterhin in die Güteklasse „gering“. Die Betrachtung des Verlaufs der oberen Grenze zeigt jedoch einen anhaltenden Anstieg, der deutlich steiler verläuft als die berechnete Trendlinie. Dies deutet darauf hin, dass die Werte von NMC-Akkus auch in Zukunft weiter zunehmen könnten, wobei der Anstieg der Trendlinie realistischer erscheint. Dieser Verlauf stärkt die Aussage des Trends trotz des niedrigen Bestimmtheitsmaßes, insbesondere da die Technologie noch in der Weiterentwicklung steckt und weiteres Optimierungspotenzial aufweist. Daraus ergibt sich dennoch eine Eignung auf Extrapolation. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 35** ersichtlich.

Tabelle 35: Bewertungsmatrix der grav. Energiedichte - Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	3	1,2
Grenzlinie	0,4	2	0,8
Gesamtbewertung	-	-	2,2

Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Das für die Trendlinie des NCA-Akkus ermittelte Bestimmtheitsmaß beträgt etwa 0,35 und wird in die Güteklasse „gering“ eingeordnet. Obwohl die Trendlinie einen kleinen Teil der Variabilität der Daten widerspiegelt, reicht die Güte des Modells nicht aus, um präzise Vorhersagen zu treffen. Eine visuelle Analyse der oberen Grenze zeigt jedoch ebenfalls einen Aufwärtstrend, der den positiven Verlauf der Trendlinie bestätigt. Angesichts der fortschreitenden Weiterentwicklung der NCA-Technologie und der zusätzlichen Unterstützung durch den beobachtbaren Aufwärtstrend erscheint die Eignung der Trendlinie für Extrapolation trotz der begrenzten Aussagekraft des Bestimmtheitsmaßes plausibel. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 36** ersichtlich.

Tabelle 36: Bewertungsmatrix der grav. Energiedichte - Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	3	1,2
Grenzlinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	2,6

Ganzheitliche Betrachtung

Das Bestimmtheitsmaß der gesamtheitlichen Betrachtung der Akkutechnologien in Bezug auf die gravimetrische Energiedichte beträgt etwa 0,26. Dieser Wert führt zu einer Einordnung in die Güteklasse „gering“ und zeigt, dass der Trend keine konsistente Grundlage für eine verlässliche Extrapolation bietet.

Die Analyse des Verlaufs der oberen Grenze zeigt zunächst einen leichten Rückgang der gravimetrischen Energiedichte, gefolgt von einer deutlichen Steigerung. Die Steigung nimmt jedoch von Stützpunkt zu Stützpunkt ab und flacht in den letzten Jahren kontinuierlich aus. Dieser Verlauf bietet eine solide Grundlage für eine Trendextrapolation, da er auf eine mögliche technologische Entwicklung hinweist, die sich sukzessiv verlangsamt.

Bei einer Betrachtung sowohl der Trendlinie als auch der oberen Grenze wird deutlich, dass die Steigung der Trendlinie geringer ausfällt als die der oberen Grenze.

Der Verlauf der oberen Grenze unterstützt jedoch die Aussagekraft der Trendlinie, da beide Verläufe eine erkennbare Steigerung aufweisen. Zudem ist bei der oberen Grenze kein Rückgang zu erwarten. Vielmehr deutet der flacher werdende Verlauf darauf hin, dass die Steigung in Zukunft weiter abnehmen könnte, bis eine technologische Sättigung erreicht wird. Dieser konsistente Verlauf macht sowohl die obere Grenze als auch die Trendlinie geeignet für eine Extrapolation, da sie eine plausible Basis für Vorhersagen bieten. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 37** ersichtlich.

Tabelle 37: Bewertungsmatrix der grav. Energiedichte – Ganzheitliche Betrachtung

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	3	1,2
Grenzzlinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	2,6

5.2.3 Eignung der Extrapolation der volumetrischen Energiedichte

Bleiakku

Die Trendlinie zur volumetrischen Energiedichte des Bleiakkus erweist sich als ungeeignet für eine Extrapolation, da diese eine negative Steigung aufweist und dieses im Hinblick auf den technologischen Fortschritt, der mit der Zeit voranschreitet, als widersprüchlich erweist. Das Bestimmtheitsmaß beträgt lediglich 0,0033 und fällt damit in die Güteklasse „gering“, was darauf hindeutet, dass der Trend keine realistische Darstellung der tatsächlichen Entwicklung bietet.

Diese Einschätzung wird durch die Betrachtung der oberen Grenze untermauert, die einen kontinuierlichen Anstieg bis etwa 1990 zeigt, gefolgt von einer Sättigung. Dieses bildet somit eine solide Grundlage für die Eignung der Extrapolation in die Zukunft. Diese Entwicklung könnte auf ähnliche Faktoren zurückzuführen sein wie die beobachtete Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte, einschließlich physikalischer und technologischer Begrenzungen. Der sichtbare Verlauf der oberen Grenze steht im Widerspruch zum Abwärtstrend der Trendlinie und betont die mangelnde Eignung dieser für verlässliche Prognosen. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 38** ersichtlich.

Tabelle 38: Bewertungsmatrix der vol. Energiedichte – Bleiakku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzzlinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Nickel-Cadmium-Akku

Das Bestimmtheitsmaß der Trendlinie des Nickel-Cadmium-Akkus beträgt etwa 0,012 und fällt damit ebenfalls in die Güteklasse „gering“. Ähnlich wie beim Bleiakku zeigt die Trendlinie einen Abwärtstrend, der in diesem Kontext unplausibel ist und die Eignung der Trendlinie für eine verlässliche Extrapolation weiterhin infrage stellt.

Der Verlauf der oberen Grenze verläuft hingegen analog zu dem der gravimetrischen Energiedichte. Sie zeigt zunächst einen kontinuierlichen Anstieg, gefolgt von einer Stagnation. Diese Entwicklung könnte auf ähnliche Ursachen wie bei der gravimetrischen Energiedichte zurückzuführen sein. Der beobachtbare Gegensatz zwischen der oberen Grenze und dem Abwärtstrend der Trendlinie unterstreicht die fehlende Aussagekraft der Trendlinie. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 39** ersichtlich.

Tabelle 39: Bewertungsmatrix der vol. Energiedichte – Nickel-Cadmium-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzzlinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Nickel-Metallhydrid-Akku

Das Bestimmtheitsmaß des Nickel-Metallhydrid-Akkus beträgt lediglich 0,0002 und fällt damit in die Güteklasse „gering“. Die Trendlinie zeigt einen minimalen Abwärtstrend und bleibt insgesamt nahezu gleich.

Im Gegensatz dazu offenbart der Verlauf der oberen Grenze einen realistischen Trend, bei dem nach einem deutlichen Anstieg eine Stagnation folgt. Dies könnte auf den veränderten Forschungsfokus hin zu anderen Akkutechnologien zurückzuführen sein.

Diese Diskrepanz zwischen der Trendlinie und der oberen Grenze unterstreicht die geringe Aussagekraft der berechneten Trendlinie. Der Verlauf der oberen Grenze eignet sich hingegen besser als Grundlage für die Extrapolation, da er den technologischen Fortschritt und dessen Sättigung widerspiegelt. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 40** ersichtlich.

Tabelle 40: Bewertungsmatrix der vol. Energiedichte – Nickel-Metallhydrid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzlinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Das Bestimmtheitsmaß für die volumetrische Energiedichte des Lithium-Cobaltdioxid-Akkus beträgt etwa 0,025 und fällt damit in die Güteklasse „gering“. Dies deutet darauf hin, dass die Trendlinie quantitativ keine verlässliche Grundlage für eine Extrapolation bietet. Bei qualitativer Betrachtung wird ersichtlich, dass der Aufwärtstrend dieser Technologie, wie bei der grav. Energiedichte beschrieben, unrealistisch erscheint.

Im Gegensatz dazu zeigt der Verlauf der oberen Grenze einen konsistenten und nachvollziehbaren Trend, welcher sich für eine Extrapolation eignet. Nach der Markteinführung des LCO-Akkus lässt sich zunächst ein Anstieg der volumetrischen Energiedichte beobachten, der jedoch im weiteren Verlauf in eine Stagnation übergeht. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 41** ersichtlich.

Tabelle 41: Bewertungsmatrix der vol. Energiedichte – Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzlinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Lithium-Eisenphosphat-Akku

In die Güteklasse „gering“ fällt der Lithium-Eisenphosphat-Akku mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,37. Dieser Wert weist darauf hin, dass die Trendlinie analytisch nur einen begrenzten Teil der Variabilität der Daten abbildet, wodurch präzise Prognosen auf Basis des Modells nicht zuverlässig abgeleitet werden können. Qualitativ betrachtet folgt die Trendlinie einer realistischen Steigung der volumetrischen Energiedichte. Jedoch fordert eine fundierte Extrapolation eine höhere Datenbasis.

Die Analyse der oberen Grenze zeigt einen klaren Verlauf, bei dem die volumetrische Energiedichte von 2007 bis 2017 ansteigt und anschließend über einen Zeitraum von sechs Jahren auf dem Maximalwert stagniert, obwohl ein Anstieg zu erwarten wäre. Dieser Trend sollte mit Vorsicht betrachtet werden, da die Datenlage für den Lithium-Eisenphosphat-Akku begrenzt ist und die obere Grenze lediglich auf drei Datenpunkten basiert. Diese geringe Datenmenge schränkt die Aussagekraft des Trends erheblich ein, weshalb sich aus diesen Gründen eine Eignung für Extrapolation als schwierig erweist. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 42** ersichtlich.

Tabelle 42: Bewertungsmatrix der vol. Energiedichte – Lithium-Eisenphosphat-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	2	0,8
Grenzlinaie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,4

Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Für den Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku wurde ein Bestimmtheitsmaß von etwa 0,5 ermittelt, womit der Trend in der Bewertungsmatrix in die Kategorie „mittel“ eingeordnet wird. Diese Einstufung verdeutlicht, dass der Trend einen relevanten Teil der Streuung der Daten abbildet. Insbesondere bei Betrachtung der oberen Grenze ist eine gewisse Plausibilität gegeben.

Sowohl die Trendlinie als auch die obere Grenze zeigen einen deutlichen Anstieg, wobei die obere Grenze einen noch steileren Verlauf aufweist.

Dies deutet darauf hin, dass die volumetrische Energiedichte dieser Technologie auch in Zukunft weiter steigen könnte. Da Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkus überwiegend in Elektrofahrzeugen eingesetzt werden und das Interesse an Elektrofahrzeugen aufgrund des Wandels hin zur Elektromobilität weiterhin hoch ist, wird erwartet, dass die Forschung an dieser Technologie vorangetrieben wird. Insbesondere die Bemühungen, Elektrofahrzeuge konkurrenzfähig zu verbrennungsmotorisierten Fahrzeugen zu machen, dürften die Weiterentwicklung dieser Akkutechnologie weiterhin fördern.

Trotz der begrenzten Datenlage wird der Trend aufgrund der augenscheinlichen Übereinstimmung zwischen der Trendlinie und der oberen Grenze als potenziell geeignet für eine Extrapolation bewertet. Die Ergebnisse sollten jedoch unter Berücksichtigung der eingeschränkten Datengrundlage interpretiert werden. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 43** ersichtlich

Tabelle 43: Bewertungsmatrix der vol. Energiedichte – Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	2	0,4
Trendlinie	0,4	2	0,8
Grenzzlinie	0,4	2	0,8
Gesamtbewertung	-	-	2

Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Für den Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku wurde ein Bestimmtheitsmaß von etwa 0,92 ermittelt, wodurch der zugehörige Trend in die Güteklasse „hoch“ eingeordnet wird. Dieser Wert deutet darauf hin, dass das Modell nahezu die gesamte Variabilität der Daten erklärt und somit eine hohe Zuverlässigkeit aufweist.

Bei einer detaillierten Betrachtung der Daten wird jedoch deutlich, dass zwischen 2008 und 2017 eine erhebliche Datenlücke besteht. Diese Lücke wird in der Berechnung des Bestimmtheitsmaßes nicht berücksichtigt, könnte jedoch den Verlauf des Trends erheblich beeinflussen. Die Daten zwischen 2017 und 2023 zeigen Variationen im Bereich von 600 kWh/m³ bis 750 kWh/m³, was auf eine mögliche Stagnation hindeuten könnte. Diese Stagnation wird durch die obere Grenze angedeutet, dennoch erscheint diese unrealistisch, da eine Weiterentwicklung zu erwarten ist.

Trotz der hohen Einstufung des Bestimmtheitsmaßes in die Güteklasse „hoch“ schränkt die unvollständige Datenlage die Aussagekraft des Trends erheblich ein. Daher kann die Eignung der Trendlinie für eine belastbare Extrapolation nicht als ausreichend betrachtet werden. Sie zeigt jedoch eine vielversprechende Richtung auf, insbesondere im Kontext aktueller Forschung, die sich zunehmend auf die Effizienz von Lithium-Ionen-Technologien konzentriert. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 44** ersichtlich.

Tabelle 44: Bewertungsmatrix der vol. Energiedichte – Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	3	0,6
Trendlinie	0,4	2	0,8
Grenzzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Ganzheitliche Betrachtung

Das Bestimmtheitsmaß der ganzheitlichen Betrachtung der volumetrischen Energiedichte beträgt 0,15 und wird der Güteklasse „gering“ zugeordnet. Aufgrund dieser Einstufung ist die Trendlinie für eine Extrapolation nicht geeignet.

Die Betrachtung der oberen Grenze zeigt einen deutlich erkennbaren Anstieg, der exponentiell zu verlaufen scheint. Allerdings erscheint die steile Steigung im Kontext einer Extrapolation unrealistisch und bietet daher keine verlässliche Grundlage für eine langfristige Trendextrapolation.

Angesichts des steigenden Interesses an Elektrofahrzeugen und den damit verbundenen Anforderungen an einen begrenzten Bauraum erscheint der dargestellte Verlauf der Trendlinie plausibel. Dies deutet darauf hin, dass die kontinuierliche Steigung der Trendlinie eine geeignete Basis für eine konsistente Extrapolation darstellt, da sie realistische Erwartungen für die zukünftige Entwicklung widerspiegelt. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation kann der **Tabelle 45** entnommen werden.

Tabelle 45: Bewertungsmatrix der vol. Energiedichte – Ganzheitliche Betrachtung

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	3	1,2
Grenzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,8

5.2.4 Eignung der Extrapolation der Batteriekosten

Bleiakku

Das Bestimmtheitsmaß des Trends der Batteriekosten des Bleiakkus liegt bei lediglich 0,00008 und fällt damit in die Güteklasse „gering“. Dieser nahezu nullwertige Wert verdeutlicht, dass die Trendlinie analytisch keinen verwertbaren Ansatz für eine fundierte Analyse bietet.

Betrachtet man jedoch die untere Grenze, so zeichnet sich ein stagnierender Verlauf ab. Während die Kosten zu Beginn der Datenaufzeichnungen anstiegen, sanken sie ab etwa 1990 deutlich und stabilisierten sich nach 2010 auf einem Niveau von rund 25 US-Dollar pro kWh. Die erhöhte Punktedichte im Bereich zwischen 25 und 50 US-Dollar pro kWh ab dem Jahr 2010 verdeutlicht, dass sich die Preise in diesem Bereich konsolidieren und der Trend in dieser Preisklasse weiter verläuft.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Trend mit einer Steigung von nahezu 0 fehlerhaft dargestellt werden könnte. Bleiakкумуляtoren waren bereits viele Jahre vor den erfassten Datenpunkten auf dem Markt. Da jedoch nur spätere Werte in der Datenrecherche gefunden werden konnten, beeinflusst dies die Darstellung und den Verlauf des Trends. Dennoch könnte der Trend der unteren Grenze aufgrund seines konsistenten Verlaufs als Grundlage für eine Extrapolation geeignet sein, auch wenn die insgesamt schwache Datenbasis die Aussagekraft der Analyse einschränkt. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 46** ersichtlich.

Tabelle 46: Bewertungsmatrix der Batteriekosten – Bleiakku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzlinie	0,4	2	0,8
Gesamtbewertung	-	-	1,4

Nickel-Cadmium-Akku

Der Nickel-Cadmium-Akku wird mit einem Bestimmtheitsmaß von etwa 0,03 in die Güteklasse „gering“ eingeordnet. Qualitativ betrachtet weist der Trend eine erkennbare Steigung auf, obwohl es plausibel erscheint, dass die Kosten über die Zeit aufgrund von Skaleneffekten in der Produktion sinken sollten. Dies deutet darauf hin, dass die Trendlinie die tatsächliche Kostenentwicklung unzureichend abbildet.

Im Gegensatz dazu erscheint der Verlauf der unteren Grenze bei einer qualitativen Betrachtung deutlich plausibler. Die Kosten beginnen auf einem hohen Niveau, sinken innerhalb von etwa 20 Jahren erheblich und stabilisieren sich anschließend in einem niedrigeren Wertebereich. Aus diesem Verlauf lässt sich ableiten, dass die Kosten zukünftig in diesem Bereich verbleiben könnten. Daher könnte der Trend der unteren Grenze für eine Extrapolation als geeignet angesehen werden, während die Trendlinie aufgrund ihrer geringen Güteklasse und der unplausiblen Steigung keine verlässliche Grundlage bietet. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 47** ersichtlich.

Tabelle 47: Bewertungsmatrix der Batteriekosten – Nickel-Cadmium-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzzlinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Nickel-Metallhydrid-Akku

Der Trend der Batteriekosten des Nickel-Metallhydrid-Akkus wird mit einem Bestimmtheitsmaß von etwa 0,25 in die Güteklasse „gering“ eingeordnet, was ihn für eine verlässliche Extrapolation ungeeignet macht. Die qualitative Betrachtung zeigt einen Rückgang der Kosten an, wobei sie im Jahr 2031 die Null-Euro-Grenze durchdringen würde. Dieser Verlauf ist unplausibel und gibt keinen Mehrwert über eine Extrapolation.

Eine Analyse der unteren Grenze zeigt hingegen einen plausiblen Verlauf, der sich durch einen anfänglichen Anstieg der Kosten, eine darauffolgende deutliche Preissenkung und eine anschließende Stabilisierung über einen Zeitraum von über 5 Jahren auszeichnet.

Es kann daher angenommen werden, dass die Batteriekosten in diesem Preisniveau verbleiben. Diese Stagnation könnte auf das Erreichen der Grenzen von Skaleneffekten in der Produktion oder auf die zunehmende Verfügbarkeit alternativer Batteriesysteme mit einem besseren Preis-Leistungs-Verhältnis zurückzuführen sein. Der konsistente Verlauf der unteren Grenze bietet somit eine fundierte Grundlage für die Extrapolation, während die Trendlinie sowohl quantitativ als auch qualitativ nicht als aussagekräftig eingestuft werden kann. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 48** ersichtlich.

Tabelle 48: Bewertungsmatrix der Batteriekosten – Nickel-Metallhydrid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzlinaie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Mit einem Bestimmtheitsmaß von etwa 0,64 wird der Trend des Lithium-Cobaltdioxid-Akkus in die Güteklasse „mittel“ eingeordnet. Dieser Wert erklärt einen relevanten Teil der Variabilität der Daten, weist jedoch auch eine erhebliche Streuung auf. Es ist zu beachten, dass der Trend einen ausgeprägten Abwärtstrend zeigt, der zwar grundsätzlich plausibel erscheint, sich jedoch langfristig verlangsamen und auf ein stabiles Niveau zubewegen müsste. Da der lineare Trend dieses Verhalten nicht abbildet, ist eine Extrapolation auf Basis dieses Modells nicht geeignet. Ein linearer Trend würde mathematisch zu Preisen unter 0 US-Dollar führen, was realistisch ausgeschlossen ist. Daher überschätzt die lineare Darstellung die Geschwindigkeit und das Ausmaß der möglichen zukünftigen Kostenreduktionen.

Die Betrachtung der unteren Grenze hingegen zeigt ein plausibleres Muster. Zunächst ist ein steiler Abwärtstrend zu beobachten, gefolgt von einer Stabilisierung in einer niedrigeren Preisspanne. Dieses Verhalten spiegelt eine realistische Entwicklung wider und macht die untere Grenze zu einer geeigneten Grundlage für eine Extrapolation.

Aufgrund ihrer besseren Nachvollziehbarkeit und Übereinstimmung mit möglichen Marktentwicklungen sollte die untere Grenze für Extrapolationen bevorzugt herangezogen werden. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 49** ersichtlich.

Tabelle 49: Bewertungsmatrix der Batteriekosten – Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	2	0,4
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzzlinie	0,4	3	1,2
Gesamtbewertung	-	-	2

Lithium-Eisenphosphat-Akku

Der Lithium-Eisenphosphat-Akku wird mit einem Bestimmtheitsmaß von etwa 0,02 in die Güteklasse „gering“ eingestuft, woraus resultiert, dass der Trend für eine Extrapolation nicht plausibel erscheint. Die Analyse der unteren Grenze zeigt ein vergleichbarer Verlauf, dessen Steigung nach 2013 abflacht und linear weiterverläuft. Obwohl die negative Ausrichtung der Grenzzlinie grundsätzlich realistisch erscheint, würde eine lineare Extrapolation in einigen Jahren die Null-Dollar-Grenze erreichen. Dies wäre jedoch irreführend. Die qualitative Betrachtung der Trendlinie gibt eine plausible Kostenreduktion über die Jahre an. Diese sollte jedoch mit Vorsicht betrachtet werden, da die jährliche Kostenreduktion von 8,26 US-Dollar durch eine unzureichende Datenbasis erklärt wird.

Diese Entwicklung legt nahe, dass die untere Grenze als eine ungeeignete Basis für eine Extrapolation angesehen werden kann. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 50** ersichtlich.

Tabelle 50: Bewertungsmatrix der Batteriekosten – Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	2	0,8
Grenzzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,4

Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Das Bestimmtheitsmaß des Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkus beträgt etwa 0,9, wodurch der Trend in die Güteklasse „hoch“ eingeordnet wird. Das Modell wird als weitgehend zuverlässig betrachtet.

Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass die Datenbasis durch eine signifikante Lücke von über zehn Jahren eingeschränkt ist, was die Aussagekraft des Trends beeinflussen und zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen kann. Hinzu kommt, dass sich die Mehrheit der Werte auf das Jahr 2023 bezieht.

Der beobachtete Abwärtstrend erscheint grundsätzlich plausibel, sollte jedoch mit der Zeit abflachen, da eine konstante Steigung über einen längeren Zeitraum nicht realistisch ist. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei der unteren Grenze, die ebenfalls einen steilen Abwärtstrend aufweist. Aufgrund der begrenzten Datenlage und der erheblichen Lücke im Datensatz ist jedoch kein konsistenter Trend erkennbar, der eine belastbare Grundlage für eine Extrapolation in die Zukunft darstellt. Diese Einschränkung gilt gleichermaßen sowohl für die qualitativ betrachtete Trendlinie wie auch für die untere Grenze, wodurch die Eignung für eine Extrapolation kritisch zu hinterfragen ist. **Tabelle 51** zeigt die Bewertung der Eignung auf Extrapolation.

Tabelle 51: Bewertungsmatrix der Batteriekosten – Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	3	0,6
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,4

Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Das Bestimmtheitsmaß des Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkus beträgt etwa 0,92 und wird in die Güteklasse „hoch“ eingeordnet. Trotz dieser hohen Einstufung ist, ähnlich wie beim NMC-Akku, die Datenlage äußerst begrenzt, was die Ableitung eines plausiblen Trends erheblich einschränkt. Weder die Trendlinie noch der Verlauf der unteren Grenze bieten aufgrund der unzureichenden Datenbasis eine zuverlässige Grundlage für eine Extrapolation. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 52** ersichtlich.

Tabelle 52: Bewertungsmatrix der Batteriekosten – Lithium-Mangan-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	3	0,6
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzklinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,4

Ganzheitliche Betrachtung

Die Ermittlung des Bestimmtheitsmaßes der ganzheitlichen Betrachtung ergibt einen Wert von 0,017, womit die zugehörige Trendlinie in die Güteklasse „gering“ eingeordnet wird. Diese Einstufung zeigt, dass die Trendlinie keine ausreichende Grundlage für eine verlässliche Extrapolation bietet.

Die Analyse der oberen Grenze zeigt zunächst einen deutlichen Anstieg der maximal möglichen Batteriekosten, der im Zusammenhang mit der Einführung der Lithium-Ionen-Technologie steht. Nach diesem Anstieg folgt ein signifikanter und langfristiger Rückgang der Kosten, der auf Skaleneffekte und die daraus resultierenden sinkenden Produktionskosten zurückzuführen ist. Dennoch ist dieser Verlauf aufgrund der unrealistisch steilen negativen Steigung nicht für eine fundierte Trendextrapolation geeignet.

Die beobachtete Abnahme der Batteriekosten in den letzten Jahren stützt jedoch die Aussagekraft der Trendlinie und unterstreicht deren Konsistenz. Durch diese Unterstützung der oberen Grenze kann die Trendlinie trotz des geringen Bestimmtheitsmaßes als Grundlage für eine Extrapolation herangezogen werden, da sie plausible Rückschlüsse auf künftige Entwicklungen zulässt. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 53** ersichtlich.

Tabelle 53: Bewertungsmatrix der Batteriekosten – Ganzheitliche Betrachtung

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	3	1,2
Grenzklinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,8

5.2.5 Eignung der Extrapolation der Anzahl an Ladezyklen

Bleiakku

Der Trend der Ladezyklen des Bleiakkus weist ein Bestimmtheitsmaß von etwa 0,05 auf und wird somit in die Güteklasse „gering“ eingeordnet. Aufgrund dieser Einstufung bietet die Trendlinie aus quantitativer Betrachtung keine geeignete Grundlage für eine verlässliche Extrapolation. Die Analyse der oberen Grenze zeigt keinen klar erkennbaren Verlauf, der einen plausiblen Trend widerspiegelt. Die anfängliche positive Steigung deutet darauf hin, dass zu diesem Zeitpunkt weiterhin Entwicklungsfortschritte erzielt wurden. Die anschließende negative Steigung könnte auf spezifische Anwendungsanforderungen zurückzuführen sein. Die qualitative Analyse der Trendlinie zeigt einen abfallenden Verlauf, der potenziell für eine Extrapolation geeignet erscheint. Ein exemplarisches Anwendungsbeispiel für einen solchen abnehmenden Trend ist die Verwendung von Bleiakkumulatoren als Starterbatterien in Fahrzeugen, insbesondere in Kombination mit Start-Stopp-Systemen. Diese Systeme führen zu einer kontinuierlichen thermischen Belastung der Akkumulatoren, was eine signifikante Reduktion der möglichen Ladezyklen zur Folge hat. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 54** ersichtlich.

Tabelle 54: Bewertungsmatrix der Anzahl der Ladezyklen – Bleiakku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	2	0,8
Grenzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,4

Nickel-Cadmium-Akku

Das berechnete Bestimmtheitsmaß des Trends beträgt etwa 0,01 und wird entsprechend in die Güteklasse „gering“ eingeordnet. Dieser Wert verdeutlicht, dass die quantitative Betrachtung der Trendlinie keine hinreichende Grundlage für eine verlässliche Extrapolation bietet.

Die Analyse der oberen Grenze zeigt eine alternierende Entwicklungsdynamik mit einem leichten Rückgang, ohne ein konsistentes Muster zu erkennen, das für eine belastbare Trendextrapolation geeignet wäre. Zudem lässt sich kein klar eingegrenzter Wertebereich identifizieren, in dem diese alternierende Dynamik stattfindet.

Obwohl der Verlauf den Abwärtstrend der berechneten Trendlinie bestätigt, welcher verschiedene Gründe haben könnte, fehlen sowohl klare Muster als auch ein definierter Wertebereich, wodurch die Eignung für eine Extrapolation als nicht fundiert einzustufen ist. **Tabelle 55** zeigt die Bewertung der Eignung auf Extrapolation.

Tabelle 55: Bewertungsmatrix der Anzahl der Ladezyklen – Nickel-Cadmium-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1

Nickel-Metallhydrid-Akku

Die Ermittlung des Bestimmtheitsmaßes des Nickel-Metallhydrid-Akkus ergab einen Wert von etwa 0,03, wodurch der zugehörige Trend in der Bewertungsmatrix der Güteklasse „gering“ zugeordnet wird. Dieser Wert verdeutlicht, dass bei quantitativer Betrachtung der Trendlinie keine konsistente Grundlage für eine verlässliche Extrapolation in die Zukunft dargestellt wird. Eine qualitative Betrachtung hingegen gibt über die Jahre einen leichten Anstieg der Ladezyklenzahl, welche bezogen auf den technologischen Fortschritt als belastbare Grundlage für die Trendextrapolation genutzt werden kann.

Eine abweichende Einschätzung betrifft die obere Grenze, die zunächst einen steilen Anstieg aufweist, gefolgt von einer deutlichen Abnahme. Dieser ungleichmäßige Verlauf lässt keine belastbare Trendextrapolation erkennen. Aus diesen Gründen bietet die obere Grenze keine geeignete Grundlage für eine fundierte Extrapolation. Dennoch könnte die Abnahme der Anzahl der Ladezyklen, wie beim Bleiakku auf spezifische Anwendungsanforderungen, wie thermische Belastungen zurückzuführen sein. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 56** ersichtlich.

Tabelle 56: Bewertungsmatrix der Anzahl der Ladezyklen – Nickel-Metallhydrid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	3	1,2
Grenzzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Der Trend des Lithium-Cobaltdioxid-Akkus wird mit einem Bestimmtheitsmaß von etwa 0,07 in die Güteklasse „gering“ eingeordnet. Die obere Grenze zeigt wie die Trendlinie ebenfalls einen Abwärtstrend, der jedoch durch seine steile Ausprägung keine verlässliche Grundlage für eine Trendextrapolation darstellt.

Beide Modelle weisen einen Abwärtstrend auf, der möglicherweise mit den Anforderungen an Lade- oder Entladedynamiken zusammenhängen könnte. Dennoch bieten weder die Trendlinie noch die obere Grenze eine fundierte Basis für eine belastbare Extrapolation. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 57** einsehbar.

Tabelle 57: Bewertungsmatrix der Anzahl der Ladezyklen – Lithium-Cobaltdioxid-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	2	0,8
Grenzzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,4

Lithium-Eisenphosphat-Akku

Für den Lithium-Eisenphosphat-Akku wurde ein Bestimmtheitsmaß von etwa 0,14 ermittelt, wodurch der zugehörige Trend in die Güteklasse „gering“ eingeordnet wird. Aufgrund dieser Einstufung besitzt der Trend analytisch betrachtet keine hinreichende Aussagekraft für eine belastbare Extrapolation. Die Betrachtung der oberen Grenze deutet hingegen auf eine mögliche Stagnation mit einem leichten Abwärtstrend hin. Diese Entwicklung könnte, wie bereits zuvor erwähnt, auf die steigenden spezifischen Anforderungen zurückzuführen sein.

Die Trendlinie zeigt eine leichte Steigung und verläuft in etwa in den gleichen Wertebereich wie die Grenzzlinie, was potenzielle Vorhersagen ermöglichen könnte. Dennoch erschwert die begrenzte Datenlage die Identifikation eines klaren Trends sowie die Ableitung fundierter Prognosen. Daher sollte der beobachtete Bereich der Stagnation zwischen 3.000 und 4.000 Ladezyklen mit Vorsicht interpretiert werden. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 58** ersichtlich.

Tabelle 58: Bewertungsmatrix der Anzahl der Ladezyklen – Lithium-Eisenphosphat-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R ²)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	2	0,8
Grenzzlinie	0,4	2	0,8
Gesamtbewertung	-	-	1,8

Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Das Bestimmtheitsmaß des Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkus beträgt etwa 0,68 und führt zu einer Einstufung des Trends in die Güteklasse „mittel“ innerhalb der Bewertungsmatrix. Bei näherer Betrachtung der Steigung des Trends zeigt sich jedoch, dass diese unrealistisch ist. Die übermäßige Abnahme würde rechnerisch dazu führen, dass innerhalb von etwa zwei Jahren keine Ladezyklen mehr möglich wären. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei der oberen Grenzzlinie zu beobachten, die ebenfalls einen steilen Abwärtstrend aufweist.

Es ist hierbei zu berücksichtigen, dass die Datenbasis auf die Jahre 2021 und 2023 beschränkt ist, wodurch der ermittelte Trend lediglich auf Werten aus zwei Jahren basiert. Diese begrenzte Datenlage bietet keine repräsentative Grundlage für eine verlässliche Trendextrapolation. Dennoch könnte ein negativer Trend grundsätzlich plausibel erscheinen, da er mit den Anforderungen an Lade- und Entladezyklen im Zusammenhang stehen könnte. Aufgrund der eingeschränkten Datenlage bleibt die Aussagekraft jedoch begrenzt. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 59** ersichtlich.

Tabelle 59: Bewertungsmatrix der Anzahl der Ladezyklen – Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R ²)	0,2	2	0,4
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzzlinie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1,2

Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akku

Das Bestimmtheitsmaß des Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkus beträgt etwa 0,002 und wird somit in die Güteklasse „gering“ eingeordnet. Ähnlich wie bei der Analyse der Ladezyklen des NCA-Akkus bietet auch hier die begrenzte Datenlage keine repräsentative Grundlage. Weder die obere Grenze noch der berechnete Trend liefern eine verlässliche Basis für eine fundierte und geeignete Extrapolation. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 60** ersichtlich.

Tabelle 60: Bewertungsmatrix der Anzahl der Ladezyklen – NCA-Akku

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzlínie	0,4	1	0,4
Gesamtbewertung	-	-	1

Ganzheitliche Betrachtung

Die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes der Trendlinie ergibt einen Wert von etwa 0,005. Aufgrund dieses sehr niedrigen Wertes wird die Trendlinie in die Güteklasse „gering“ eingeordnet, was darauf hindeutet, dass sie keine konsistente Grundlage für eine verlässliche Trendextrapolation bietet.

Die Betrachtung der oberen Grenzlínie zeigt zu Beginn einen deutlichen Anstieg, der ab 1976 in eine langanhaltende Stagnation übergeht. Diese Stagnation erstreckt sich über einen Zeitraum von knapp 40 Jahren und wird lediglich durch zwei Ausreißer übertroffen, die jedoch erst nach 2020 ermittelt wurden.

Trotz des insgesamt mäßigen Anstiegs der Trendlinie und der Tatsache, dass die obere Grenze in den letzten vier Jahren zweimal übertroffen wurde, deutet dies möglicherweise auf einen zukünftigen Anstieg der Anzahl der Ladezyklen hin. Diese Entwicklung könnte den mäßigen Verlauf der Trendlinie bestätigen und als Grundlage für eine aussagekräftige Trendextrapolation dienen. Unter Berücksichtigung dieser Beobachtungen kann erwartet werden, dass in zukünftigen Veröffentlichungen Werte über 3.000 Ladezyklen erreicht werden, was den moderaten Anstieg der Trendlinie weiter untermauern würde. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 61** ersichtlich.

Tabelle 61: Bewertungsmatrix der Anzahl der Ladezyklen – Ganzheitliche Betrachtung

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	3	1,2
Grenzzlinie	0,4	2	0,8
Gesamtbewertung	-	-	2,2

5.2.6 Eignung der Extrapolation der Ladegeschwindigkeit

Das ermittelte Bestimmtheitsmaß des Trends für den Bleiakku beträgt 0,06 und wird in die Güteklasse „gering“ eingeordnet. Eine ähnliche Einstufung erhält der Nickel-Metallhydrid-Akku, was bedeutet, dass diese Trends allein keine konsistente Grundlage für eine verlässliche Trendextrapolation bieten. Im Gegensatz dazu werden der Nickel-Cadmium-Akku mit einem Bestimmtheitsmaß von etwa 0,9, der Lithium-Cobaltdioxid-Akku mit circa 0,96 und der Lithium-Eisenphosphat-Akku mit 0,996 in die Güteklasse „hoch“ eingeordnet. Dies deutet darauf hin, dass die Trends dieser Technologien prinzipiell für eine Extrapolation geeignet sind. Jedoch kann der Trend des Lithium-Eisenphosphat-Akkus aufgrund seiner positiven Steigung nicht als realistisch angesehen werden, da eine Steigerung entgegen technologischen Entwicklungen steht. Daher kann auch dieser Trend nicht als Basis für eine fundierte Extrapolation herangezogen werden. Für die NCA- und NMC-Akkus konnten hingegen keine Bestimmtheitsmaße berechnet werden, da die vorhandenen Daten keine ausreichende Grundlage für die Kalkulation eines Wertes bieten.

Der Gesamttrend wird mit einem Bestimmtheitsmaß von etwa 0,56 in die Güteklasse „mittel“ eingeordnet. Dies deutet darauf hin, dass ein relevanter Teil der Variabilität und eine potenziell geeignete Basis für eine Trendextrapolation dargestellt wird. Diese Einschätzung wird durch die visuell unrealistisch wirkende, stark negative Steigung des Gesamttrends in Frage gestellt.

Die Hinzunahme der unteren Grenze zeigt einen anfänglich deutlichen Rückgang, der anschließend in einen flacheren Abwärtstrend übergeht. Dieser Verlauf unterstützt die Aussagekraft der Trends für den Bleiakku, den Lithium-Cobaltdioxid-Akku und den Nickel-Metallhydrid-Akku.

Unter diesen Technologien wird der Lithium-Cobaltdioxid-Akku als einziger in die Güteklasse „hoch“ eingeordnet. Dennoch bieten alle drei Verläufe in Kombination mit der unteren Grenze und unter Berücksichtigung des negativen Gesamttrends eine hinreichende Grundlage für eine Trendextrapolation.

Für den NCA-Akku, obwohl zwei Datenpunkte aus unterschiedlichen Jahren vorliegen, die jedoch denselben Wert zeigen, ist keine belastbare Aussage über einen Trend möglich. Gleiches gilt für den NMC-Akku, da hier lediglich ein einzelner Wert vorliegt, wodurch eine Trendanalyse nicht durchgeführt werden kann. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 62** ersichtlich.

Tabelle 62: Bewertungsmatrix der Ladegeschwindigkeit – Ganzheitliche Betrachtung

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	2	0,4
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzlinie	0,4	2	0,8
Gesamtbewertung	-	-	1,6

5.2.7 Eignung der Extrapolation der Marktkapazität

Der Bleiakku zeigt einen exponentiellen Verlauf, der seit 2010 anhält, dieser ist potenziell geeignet für eine Extrapolation, dennoch sollte in Betracht gezogen werden, dass dieser exponentielle Anstieg in der Zukunft in einer Sättigung verbleiben wird. Es ist nicht absehbar, wann dieser Fall eintritt.

Der Nickel-Cadmium-Akku verzeichnet bis ins Jahr 2000 einen mäßigen Anstieg, gefolgt von einem deutlichen Rückgang. Die Extrapolation dieses Verlaufs würde nahelegen, dass der Nickel-Cadmium-Akku künftig ausschließlich in spezialisierten Nischenanwendungen verbleibt und keine signifikanten Marktanteile mehr erreicht. Eine Eignung zur Extrapolation des Trends ergibt sich, denn es lässt sich erwarten, dass die Marktanteile in einer leichten negativen Steigung verbleiben. Diese Aussage wird mit einem technologischen Ersatz durch leistungsfähigere Akkutypen begründet.

Im Gegensatz dazu zeigt der Nickel-Metallhydrid-Akku einen markanten Anstieg ab 1990, gefolgt von einer Stabilisierung auf konstantem Niveau ab 2010.

Diese Stabilität deutet auf eine Marktsättigung hin und bietet eine solide Grundlage für die Extrapolation, da keine größeren Veränderungen in der zukünftigen Marktentwicklung zu erwarten sind.

Die Lithium-Ionen-Technologie verzeichnet seit den 2000 einen exponentiellen Anstieg, der sich bis in die Gegenwart fortsetzt. Diese Dynamik ist charakteristisch für eine Technologie, die sich in einer Phase des raschen Wachstums befindet und noch keinen Sättigungspunkt erreicht hat. Der Verlauf ist konsistent mit den gegenwärtigen Marktentwicklungen und bietet eine Grundlage für die Extrapolation. Dennoch sollte der exponentielle Charakter des Wachstums kritisch hinterfragt werden, da langfristig eine Marktsättigung zu erwarten ist, die das Wachstum verlangsamen könnte.

Der Gesamttrend zeigt seit 2010 einen signifikanten Anstieg mit einer klar erkennbaren exponentiellen Steigung. Dieser Verlauf wird als geeignet für eine Extrapolation bewertet, da zu erwarten ist, dass die Nachfrage nach Batterien aufgrund ihrer vielseitigen Einsatzmöglichkeiten, aber vor allem durch die Elektromobilität, auch in Zukunft weiter zunehmen wird.

5.2.8 Eignung der Extrapolation der Lebensdauer

Die Untersuchung der Eignung zur Extrapolation der Lebensdauer der verschiedenen Akkutechnologien zeigt durchgehend Bestimmtheitsmaße, die in die Güteklasse „niedrig“ eingeordnet werden. Der Bleiakku weist ein Bestimmtheitsmaß von etwa 0,19 auf, während der Nickel-Cadmium-Akku mit einem Wert von circa 0,2 ebenfalls der Güteklasse „niedrig“ zugeordnet wird. Der NMC-Akku erreicht ein Bestimmtheitsmaß von rund 0,13 und fällt ebenfalls in diese Einstufung. Der niedrigste Wert wird beim Nickel-Metallhydrid-Akku mit einem Bestimmtheitsmaß von etwa 0,05 verzeichnet, was ebenfalls auf eine niedrige Güteklasse des Trends hinweist. Die Trendlinie der gesamten Akkutechnologien zeigt einen Wert von etwa 0,07 und wird ebenfalls in die Güteklasse „niedrig“ eingestuft. Für den Lithium-Eisenphosphat-Akku sowie den Lithium-Cobaltdioxid-Akku konnte kein Bestimmtheitsmaß berechnet werden, da die jeweiligen Trendlinien eine Steigung von 0 aufweisen, wodurch eine Berechnung nicht möglich ist. Aufgrund dieser Ergebnisse bieten die Trendlinien der genannten Technologien keine konsistente Grundlage für eine verlässliche Extrapolation.

Die Analyse der oberen Grenze zeigt über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren zunächst einen konstanten Verlauf, gefolgt von einem Rückgang und einer anschließenden Stagnation.

Betrachtet man den gemeinsamen Trend der Lebensdauer aller Akkutechnologien, wird deutlich, dass die Mehrheit einen Abwärtstrend oder eine gleichbleibende Lebensdauer aufweisen. Eine Ausnahme bildet der NMC-Akku, dessen Lebensdauer jedoch bei einem niedrigen Ausgangswert startete.

Angesichts der steigenden Anforderungen an Akkutechnologien und der wachsenden Bedeutung kurzer Ladezeiten scheint der Abwärtstrend für eine zukünftige Trendextrapolation geeignet. Dennoch sollte durch den technologischen Fortschritt und die intensive Forschung kein Rückgang der Akkulebensdauer für die Zukunft erwartet werden. Die kontinuierliche Entwicklung neuer Materialien und verbesserter Ladetechnologien zielt darauf ab, diesen Effekt zu minimieren und gleichzeitig die Effizienz zu maximieren. Angesichts der wachsenden Verbreitung von Elektroautos wäre es nicht zielführend, eine Technologie zu fördern, deren Lebensdauer mit der Zeit abnimmt. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die Akkus durch Innovationen robuster und langlebiger werden, um den steigenden Anforderungen der Nutzer gerecht zu werden.

Die Grenzlinie könnte jedoch eine potenzielle Eignung darstellen, da sich zwei gegenläufige Effekte ausgleichen könnten. Einerseits führt die zunehmende Verbreitung von Schnellladetechnologien zu einer Reduktion der Lebensdauer, andererseits tragen Innovationen und technologische Fortschritte dazu bei, die Lebensdauer der Akkus zu verlängern. Diese beiden Entwicklungen könnten in ihrer Wirkung zu einer Balance führen, die langfristig eine Stabilisierung der Akkulebensdauer bewirken könnte. Die Bewertung der Eignung auf Extrapolation ist in **Tabelle 63** ersichtlich.

Tabelle 63: Bewertungsmatrix der Lebensdauer – Ganzheitliche Betrachtung

Kriterium	Gewichtung	Punkte (1–3)	Gewichteter Beitrag
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,2	1	0,2
Trendlinie	0,4	1	0,4
Grenzlinie	0,4	2	0,8
Gesamtbewertung	-	-	1,4

5.3 Auswertung der Trendanalyse

In **Tabelle 64** sind die Ergebnisse der Bewertungsmatrizen zusammengefasst. Diese werden in einer Tabelle visualisiert, das einen klaren Überblick über die Resultate der Trendanalyse bietet. Die Darstellung ermöglicht es, die Erkenntnisse zur Eignung der Leistungsparameter für die Trendextrapolation prägnant und übersichtlich zu präsentieren.

Tabelle 64: Ganzheitliche Betrachtung der Ergebnisse der Bewertungsmatrizen

Akkutechnologie	Bleiakku	NiCd	NiMH	LCO	LFP	NMC	NCA	Gesamt
				Lithium-Ionen				
Markteintritte								potenziell geeignet
Grav. Energiedichte	potenziell geeignet	potenziell geeignet	geeignet	ungeeignet	ungeeignet	geeignet	geeignet	geeignet
Vol. Energiedichte	potenziell geeignet	potenziell geeignet	potenziell geeignet	potenziell geeignet	ungeeignet	potenziell geeignet	potenziell geeignet	potenziell geeignet
Kosten	ungeeignet	potenziell geeignet	potenziell geeignet	potenziell geeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet
Ladezyklen	potenziell geeignet	ungeeignet	potenziell geeignet	ungeeignet	potenziell geeignet	ungeeignet	ungeeignet	geeignet
Ladegeschwindigkeit								potenziell geeignet
Marktkapazität	potenziell geeignet	geeignet	geeignet	potenziell geeignet				geeignet
Lebensdauer								ungeeignet

Im Folgenden wird die prozentuale Verteilung der Bewertungskategorien berechnet und erläutert. Dadurch wird eine klare Übersicht über das Gesamtbild der Analyse geschaffen. Ziel ist es, die Ergebnisse der Trendanalyse in ihrer Gesamtheit zu betrachten und zu verstehen, wie sich die untersuchten Speichertechnologien in Bezug auf ihre langfristige Extrapolationsfähigkeit positionieren lassen. Die gewonnenen Einblicke bieten einen abschließenden Überblick über die Trends und deren Eignung für zukünftige Anwendungen.

Aus der Auswertung der **Tabelle 64** ergibt sich, dass **20 Prozent** der untersuchten Trends als **geeignet** eingestuft wurden. Diese Trends erfüllen die definierten Anforderungen für eine zuverlässige Extrapolation und bieten somit eine solide Grundlage für die strategische Ausrichtung in Forschung und Entwicklung. So ist es beispielsweise möglich, bei Technologien, die ihre Entwicklungsschwelle erreicht haben, den Forschungsschwerpunkt neu zu setzen.

In solchen Fällen können Ressourcen auf andere Technologien oder Parameter gelenkt werden, die vielversprechender erscheinen und ein höheres Innovationspotenzial bieten. Diese flexible Anpassung der Forschungs- und Entwicklungsstrategie trägt dazu bei, langfristig die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern und neue Chancen in Bereichen zu nutzen, die sich noch nicht vollständig entfaltet haben.

47,5 Prozent der untersuchten Trends werden als **potenziell geeignet** eingestuft. Diese Trends zeigen zwar aktuell noch keine vollständige Eignung für eine zuverlässige Extrapolation, besitzen jedoch das Potenzial, diese zu erreichen.

32,5 Prozent der untersuchten Trends werden als **ungeeignet** klassifiziert. Diese Ergebnisse zeigen, dass diese Trends keine brauchbare Grundlage für eine Extrapolation bieten, da sie keine klaren Muster oder konsistenten Entwicklungen erkennen lassen.

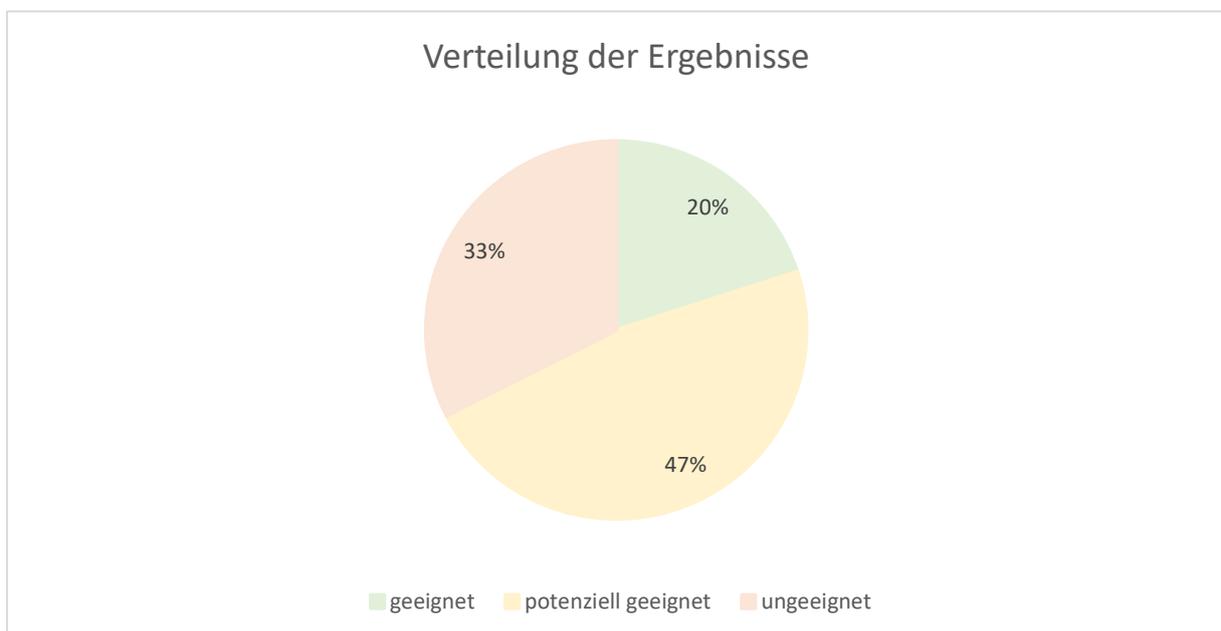


Abbildung 49: Verteilung der Ergebnisse

Diese prozentuale Aufschlüsselung, die in **Abbildung 49** dargestellt ist, verdeutlicht die Brauchbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit. Sie gibt Aufschluss darüber, in welchem Maße die analysierten Trends als Grundlage für zukünftige Prognosen dienen können und wo Einschränkungen vorliegen. Somit liefert die Verteilung einen direkten Hinweis auf die Qualität und Aussagekraft der durchgeführten Analyse.

6 Schlussfolgerung aus der Trendanalyse

Die durchgeführte Trendanalyse hat die vielfältigen und teilweise nicht-linearen Entwicklungen der Leistungsparameter elektrischer Energiespeicher offengelegt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen widmet sich die Schlussfolgerung der tiefergehenden Interpretation der Ergebnisse. Im Fokus steht die kritische Analyse methodischer und datenbezogener Einschränkungen. Die Untersuchung der Eignung der identifizierten Trends für eine Extrapolation zeigt differenzierte Ergebnisse, die je nach Leistungsparameter und Akkutechnologie variieren. Diese Variabilität ist auf die erhobenen Daten zurückzuführen. Die Herausforderungen der Trendanalyse lassen sich auf eine Vielzahl von Einflussfaktoren zurückführen, die im Folgenden detailliert analysiert werden. Darüber hinaus werden mögliche Lösungsansätze beschrieben, die darauf abzielen, die identifizierten Probleme zu beheben und die Grundlage für zukünftige Extrapolationen zu verbessern.

6.1 Identifikation und Lösungsansätze der potenziellen Herausforderungen aus der Trendanalyse

6.1.1 Datenbezogene Herausforderungen

Geringe Datenbasis

Ein wesentliches Problem der Datenerhebung liegt in der unzureichenden Verfügbarkeit von Werten für bestimmte Leistungsparameter, sowohl für die übergreifende Betrachtung als auch für spezifische Akkutechnologien. Diese Datenlücken erschweren die Erstellung belastbarer Trends oder führen zu verzerrten Darstellungen, die die tatsächliche Entwicklung nur ungenau abbilden. Besonders deutlich wird diese Problematik bei neueren Akkutechnologien sowie bei Leistungsparametern wie Ladegeschwindigkeit und Lebensdauer. Selbst in Fällen, in denen eine größere Menge an Daten vorhanden ist, können Datenlücken über mehrere Jahre hinweg entstehen, was ebenfalls eine verzerrte Darstellung der Entwicklung zur Folge haben kann. Obwohl diese Parameter von zentraler Bedeutung für die Weiterentwicklung der Energiespeichertechnologien sind, scheint es an einer umfassenden und breit angelegten Forschungsbasis zu mangeln, was auf einen bislang unzureichend adressierten Forschungsbedarf hindeutet.

Ein prägnantes Beispiel hierfür ist die Analyse der Anzahl der Ladezyklen von Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Akkus. Für diesen Parameter konnten lediglich vier Datenpunkte identifiziert werden, die sich auf zwei unterschiedliche Jahre verteilen. Die obere Grenze des untersuchten Trends basiert somit lediglich auf zwei Werten, sodass die Eignung der resultierenden Trendlinie, durch diese stark limitierten Daten, eingeschränkt wird. Eine derart begrenzte Datenbasis erweist sich als unzureichend, um fundierte Trends zu identifizieren und diese für verlässliche Extrapolationen heranzuziehen. Dieses Beispiel verdeutlicht die Notwendigkeit einer erweiterten und systematischen Datenerhebung, um valide Aussagen über technologische Entwicklungen und deren Dynamik treffen zu können.

Zur Behebung dieses Problems könnten zusätzliche wissenschaftliche Datenbanken herangezogen werden, um den Suchradius zu erweitern und Datenlücken gezielt zu schließen. Eine weitere vielversprechende Maßnahme wäre die Zusammenarbeit mit Unternehmen, die im Bereich der relevanten Technologien tätig sind. Solche Partnerschaften könnten nicht nur den Zugang zu internen, detaillierten Datensätzen ermöglichen, sondern auch auf gegenseitigem Interesse basieren, da die Ergebnisse der Trendanalyse potenziell auch für die strategische Planung und Weiterentwicklung der Unternehmen von Nutzen sein könnten.

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass eine hohe Datenmenge nicht zwangsläufig zu besseren Ergebnissen führt, insbesondere dann, wenn die im Folgenden beschriebene Streuung der Daten erheblich ist und die Konsistenz der Analyse beeinträchtigt wird.

Signifikante Streuung

Ein weiteres bedeutendes Problem ist die Streuung der erhobenen Daten. Dieses Phänomen erschwert die Identifikation konsistenter Trends und beeinträchtigt die Genauigkeit der Analysen. Die Ursachen für diese Datenstreuung sind vielfältig und werden im Folgenden näher erläutert.

Die Testprozedur spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewertung und Analyse von Akkutechnologien. Selbst wenn ein identischer Akku unter unterschiedlichen Testbedingungen geprüft wird, können die daraus resultierenden Werte erheblich voneinander abweichen. Ein anschauliches Beispiel hierfür wird in **Kato et al. 1993** aufgezeigt.

In der Untersuchung gibt **Kato et al. 1993** unterschiedliche Werte für die Anzahl der Ladezyklen an, die sich direkt aus der Variation der Entladungstiefe während der Testprozeduren ergeben. Konkret zeigt sich, dass bei einer Entladungstiefe von 80% eine Zyklenzahl von 800 erreicht wird. Reduziert sich die Entladungstiefe hingegen auf 70%, erhöht sich die Zyklenzahl signifikant auf 1.200. Diese Differenz verdeutlicht, wie stark die Testbedingungen die Ergebnisse beeinflussen können und wie wichtig es ist, diese Parameter bei der Bewertung von Akkutechnologien zu berücksichtigen.

Dieses Beispiel verdeutlicht die dringende Notwendigkeit, Testprozeduren klar zu definieren und zu standardisieren, um konsistente und vergleichbare Daten zu generieren. Solche Daten sind essenziell, um eine fundierte Grundlage für Trendanalysen und technologische Bewertungen zu schaffen. Ein Vorzeigemodell, in diesem Kontext, ist das Worldwide Harmonized Light-Duty Test Procedure (WLTP). Dieses Testverfahren, das für Fahrzeuge entwickelt wurde, dient dazu, Verbrauchsangaben durch objektive und reproduzierbare Testmethoden unter genau definierten Laborbedingungen zu vereinheitlichen. **Jess o.J.** beschreibt, dass das WLTP-Verfahren eine standardisierte Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Fahrzeugmodellen ermöglicht. Im Bereich der Akkutechnologien bieten Organisationen wie das United States Advanced Battery Consortium (USABC), der European Council for Automotive R&D (EUCAR) und die Battery Association of Japan (SBA) bereits Ansätze zur Standardisierung an. Diese Prozeduren, wie **Hyung et al. 1999** anmerkt, ermöglichen eine einheitliche Erhebung von Leistungsparametern. Allerdings sind diese Ansätze bislang noch nicht weit verbreitet, was ihre Wirkung und Akzeptanz in der breiten Anwendung einschränkt.

Die Datenerhebung basiert auf Werten aus zahlreichen Quellen, die in verschiedenen Ländern veröffentlicht wurden. Dies kann zu Abweichungen in den Werten führen, da beispielsweise die **Richtlinie 2006/66/EG** ausschließlich in der Europäischen Union gilt und andere Länder nicht einschließt. In diesen Ländern können daher Akkus mit einem höheren Cadmiumgehalt produziert und vertrieben werden. Dadurch unterscheiden sich die Eigenschaften von Nickel-Cadmium-Akkus je nach Markt erheblich.

Die unterschiedlichen Werte für Leistungsparameter wie die gravimetrische Energiedichte lassen sich auf die Zellchemie der jeweiligen Batterie zurückführen. Variationen in der Zellchemie, wie im Fall von Cadmium oder anderen chemischen Zusammensetzungen, führen zu signifikanten Abweichungen in den resultierenden Eigenschaften. Ein anschauliches Beispiel hierfür liefert **Hasselwander et al. 2023**, der die Zellchemie von Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkus detailliert untersucht. In seiner Analyse wird zwischen verschiedenen Zellchemien des NMC-Akkus differenziert und es werden für die gravimetrische Energiedichte deutlich unterschiedliche Werte angegeben. Beispielsweise wird die Energiedichte des NMC-111 mit einem Bereich von 150 bis 190 Wh/kg angegeben, während für das NMC-532 eine Energiedichte im Bereich von 170 bis 220 Wh/kg festgehalten wird. Für die Zellchemie NMC-811 zeigt sich, mit Werten im Bereich von 240 bis 340 Wh/kg, eine noch höhere Energiedichte. Diese Unterschiede verdeutlichen, wie stark die Zellchemie die Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von Akkus beeinflusst.

Die Einbeziehung von Daten aus Akkutechnologien mit unterschiedlichen Einsatzzwecken führt ebenfalls zu einer signifikanten Streuung in den Ergebnissen. Diese Unterschiede lassen sich auf die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Anwendungen zurückführen, die sich sowohl in der variierenden Zellchemie als auch in der Verwendung unterschiedlicher Materialien für das Akkusystem widerspiegeln. Zusätzlich wurden Daten aus Jahren berücksichtigt, in denen Akkus nicht primär in Elektrofahrzeugen, sondern in anderen Anwendungsbereichen eingesetzt wurden. Dies führte zu einer weiteren Streuung der Werte, da die Leistungsparameter solcher Akkus spezifisch auf die jeweiligen Anwendungen ausgelegt waren und daher von den für Elektrofahrzeuge typischen Werten abweichen können.

Ein anschauliches Beispiel liefert **Koehler et al. 1997**, der die Nickel-Metallhydrid-Akkus in zwei Kategorien unterteilt. High-Energy-Zellen erreichen eine Energiedichte von 220 kWh/m³, während High-Power-Zellen lediglich eine Energiedichte von 150 kWh/m³ aufweisen. Ebenso beschreibt **Kurzweil 2017** deutliche Unterschiede in der gravimetrischen Energiedichte verschiedener Akkusysteme.

Der Akku des Bluecar von Bolloré erreicht 228 Wh/kg, während der im Coda EV eingesetzte Akku lediglich 116 Wh/kg aufweist. Diese Werte zeigen eine Differenz von nahezu 100%, was die starke Abhängigkeit der Leistungsparameter von den spezifischen Einsatzzwecken und Designs der Akkus verdeutlicht.

Auch das Herstellungsverfahren hat einen erheblichen Einfluss auf die gravimetrische Energiedichte, wie aus **Duddy 1961** hervorgeht. In der Untersuchung wird deutlich, dass verschiedene Produktionsmethoden zu erheblichen Abweichungen führen können. Die Werte der gravimetrischen Energiedichte variieren in seinem Beispiel zwischen 33 Wh/kg bis 50 Wh/kg. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 34%.

Für die Datenrecherche wurden sowohl Daten zu einzelnen Zellen als auch zu vollständigen Batteriesystemen in die Analyse einbezogen, ohne diese explizit zu unterscheiden. Diese Entscheidung wurde getroffen, da, wie **Hülsebusch et al. 2010** zeigt, die Unterschiede zwischen der gravimetrischen Energiedichte von Zellen (83 Wh/kg) und Batteriesystemen (108 Wh/kg) relativ gering sind. Die Analyse wurde daher unter Berücksichtigung dieser Abweichung durchgeführt, die im Rahmen der festgelegten Toleranz als akzeptabel angesehen wurde.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, sollte der Untersuchungsrahmen klar eingegrenzt werden. Dies könnte durch eine Fokussierung auf spezifische Jahre, Einsatzbereiche, Zellchemien und weitere relevante Aspekte erfolgen. Eine solche Einschränkung würde sicherstellen, dass die betrachteten Werte auf ähnliche technologische und anwendungsspezifische Bedingungen zurückzuführen sind. Dies reduziert die Streuung der Daten und ermöglicht es, konsistentere und belastbarere Aussagen über die identifizierten Trends zu treffen. Ein gezielter Untersuchungsrahmen würde somit nicht nur die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erhöhen, sondern auch die Aussagekraft der Trendanalyse verbessern.

Die in den Daten vorhandene Streuung hat zudem einen erheblichen Einfluss auf die in der Methode verwendete Regressionsanalyse und das daraus abgeleitete Bestimmtheitsmaß. Die Streuung der Daten kann die Genauigkeit der Modellanpassung beeinträchtigen und somit die Aussagekraft der Regressionsanalyse deutlich reduzieren.

6.1.2 Methodenbezogene Herausforderungen

Für die Trendanalyse wurde die lineare Regression als Methode eingesetzt, um das Bestimmtheitsmaß R^2 zu ermitteln.

Aufgrund der signifikanten Streuung der zugrunde liegenden Daten liefert das Bestimmtheitsmaß jedoch Werte, die die Qualität der Trendlinie nur unzureichend widerspiegeln. Daher erscheint die Anwendung der linearen Regression bei einer derart starken Streuung der Daten möglicherweise ungeeignet, um verlässliche Aussagen über den Trend zu treffen.

Neben der linearen Regressionsanalyse stehen auch exponentielle, logarithmische und polynomiale Regressionsansätze als Alternativen zur Verfügung. Aufgrund der erheblichen Streuung der zugrunde liegenden Daten bieten jedoch auch diese Methoden keine ausreichende Grundlage für eine belastbare Trendextrapolation. Die Streuung der Daten beeinträchtigt die Anpassungsqualität der Modelle und reduziert somit deren Aussagekraft und Verlässlichkeit für langfristige Vorhersagen. Die polynomiale Regressionsanalyse kann ausgeschlossen werden, da sie bei qualitativ betrachteten, stagnierenden Trends dazu neigt, durch Extrapolation unplausible positive oder negative Entwicklungen zu prognostizieren. Dadurch ist sie für die Bewertung der untersuchten Daten ungeeignet. Die **Abbildung 50** zeigt eine beispielhafte Darstellung der Ergebnisse aus der Datenrecherche und verdeutlicht die Verläufe der verschiedenen Trendlinien und deren Extrapolationen. Der lineare und der logarithmische Trend verlaufen identisch, während der exponentielle Trend nahezu parallel dazu liegt und nur einen minimalen Abstand aufweist. Der Verlauf des polynomialen Trends führt zu einem höheren Bestimmtheitsmaß R^2 , jedoch wird dieser Trend aufgrund der unplausiblen negativen Steigung nach dem Höhepunkt als nicht realistisch eingestuft.

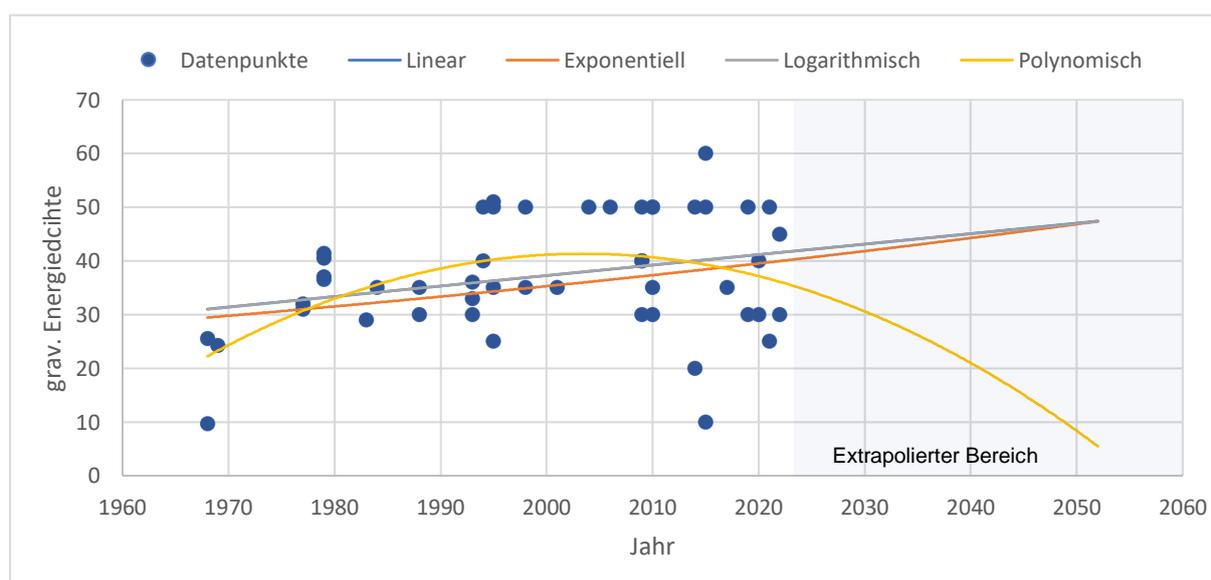


Abbildung 50: Vergleich der unterschiedlichen Funktionstypen der Regressionsanalyse

Zur quantitativen Bewertung wird in der Trendanalyse, dass in **Kapitel 3.3.2** beschriebene Bestimmtheitsmaß R^2 herangezogen. Aus **Tabelle 65** wird ersichtlich, dass die R^2 -Werte der linearen, exponentiellen und logarithmischen Funktionen für die verschiedenen Akkutechnologien nur geringe Differenzen aufweisen.

Tabelle 65: Auflistung der Bestimmtheitsmaße R^2 der unterschiedlichen Funktionstypen

Technologie	linear	exponentielle	logarithmisch
Bleiakku	0,0829	0,075	0,0837
NiCd	0,1191	0,1166	0,1193
NiMH	0,0475	0,047	0,0475
LCO	0,105	0,1042	0,105
LFP	0,0721	0,0713	0,0721
NMC	0,1931	0,2035	0,1929
NCA	0,3486	0,353	0,3485

Aus diesem Grund stellen alternative Regressionsanalysen keine geeignete Option zur Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes R^2 dar. Ein möglicher Lösungsansatz könnte jedoch die Verwendung einer geglätteten Trendlinie sein. Diese würde insbesondere bei Datenquellen, die entweder zwei unterschiedliche Werte oder Wertebereiche angeben, einen Mittelwert berechnen. Durch die Glättung würden die beobachteten (geglätteten) Werte näher an den durch die Regressionsanalyse vorhergesagten Werten liegen, welches zu einer verbesserten Anpassungsqualität und einer höheren Aussagekraft des Bestimmtheitsmaßes führen könnte.

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass das Bestimmtheitsmaß R^2 ein mathematisch berechneter Wert ist, der eine rein quantitative Bewertung der Daten vornimmt. Aufgrund seiner methodischen Eigenschaften können jedoch Ungenauigkeiten auftreten, die in die Gesamtbewertung qualitativ einbezogen werden sollten. Diese Problematik wird in **Abbildung 51** veranschaulicht. Obwohl visuell ein konstanter Trend mit einer Steigung von 0 deutlich erkennbar ist, wird das Bestimmtheitsmaß mit einem Wert von 0 berechnet. Dieses Beispiel verdeutlicht die methodischen Limitationen des Bestimmtheitsmaßes in spezifischen Anwendungsszenarien und unterstreicht die Notwendigkeit einer ergänzenden qualitativen Betrachtung.

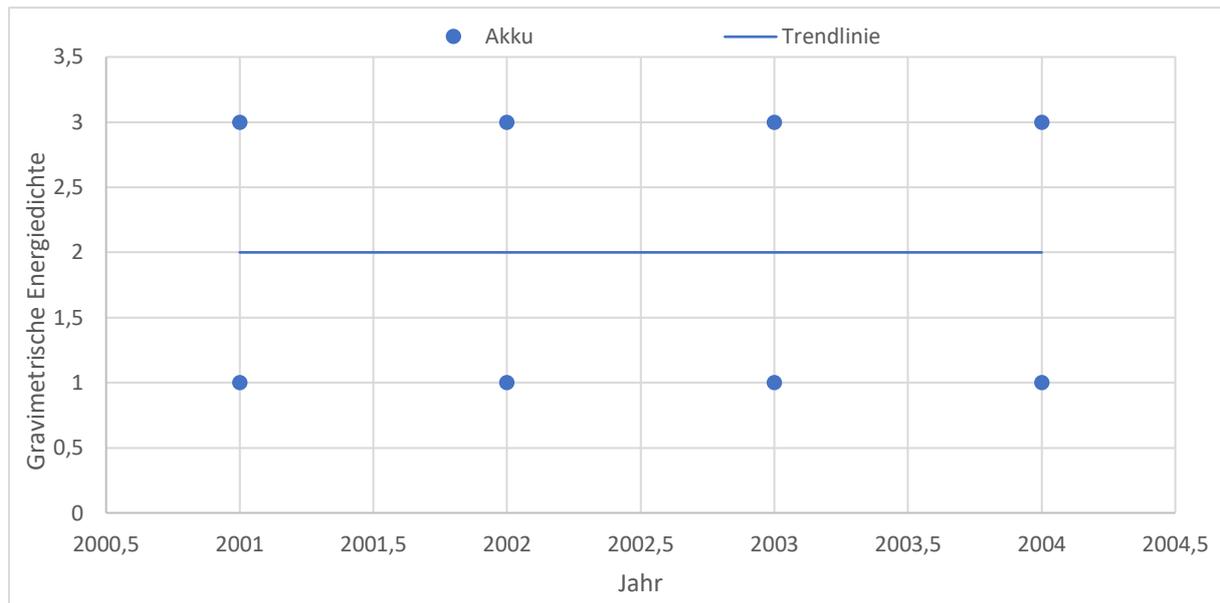


Abbildung 51: Lineare Regressionsanalyse einer Geraden zur Ermittlung des Bestimmtheitsmaß

6.2 Parallelen zu bestehenden Trendgesetzen

Aus der Trendanalyse wurden Parallelen zu bestehenden Trendgesetzen, wie Wright's Law, abgeleitet. Dabei zeigte sich eine klare Übereinstimmung mit Wright's Law, das den Rückgang der Stückkosten mit steigender kumulativer Produktionsmenge beschreibt. Die Batteriekosten in **Abbildung 37** verdeutlichen einen kontinuierlichen Rückgang der Batteriekosten, während die Marktkapazität in **Abbildung 47** einen exponentiellen Anstieg der kumulierten Produktionsmenge im gleichen Zeitraum zeigt. Die Korrelation zwischen diesen Entwicklungen bestätigt die zentrale Rolle von Wright's Law für die Analyse der Kostenentwicklung in der Batterietechnologie bis 2017.

7 Fazit & Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, die historischen und langfristigen Trends in der technischen Entwicklung der Leistungsfähigkeit von Batterien zu analysieren. Dabei wurde untersucht, ob sich aus diesen Entwicklungen erkennbare Muster ableiten lassen, die eine fundierte Extrapolation für zukünftige Entwicklungen ermöglichen. Diese Analyse soll eine Grundlage schaffen, um strategische Entscheidungen in der Automobilindustrie zu unterstützen und somit einen wertvollen Beitrag zur Orientierung in einem dynamischen Technologiefeld leisten. Die Erreichung dieses Ziels wurde durch die Beantwortung folgender zentralen Forschungsfrage angestrebt:

Welche historischen Entwicklungen und langfristigen Trends lassen sich in der technischen Leistungsfähigkeit von elektrischen Energiespeichern erkennen und inwieweit können diese Trends für zukünftige Extrapolationen genutzt werden?

In der vorliegenden Arbeit wurden eine systematische Literaturrecherche und eine darauf aufbauende Trendanalyse durchgeführt, um die Forschungsfrage fundiert zu beantworten. Die im Rahmen der Literaturrecherche erfassten Daten dienten als Basis für die Trendanalyse, welche verschiedene Bewertungsmethoden beinhaltete, darunter die Regressionsanalyse zur quantitativen Bestimmung des Bestimmtheitsmaßes R^2 . Ergänzend wurden die Trendlinie und der Verlauf der Grenzlinie qualitativ analysiert, um eine umfassende Bewertung der identifizierten Trends zu ermöglichen. Die Ergebnisse der angewandten Methoden wurden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gewichtungen in die Bewertungsmatrix integriert. Die Ergebnisse zeigten eine deutliche Variabilität in der Eignung der Trends für die Extrapolation. Etwa die Hälfte der untersuchten Trends wurden als potenziell geeignet eingestuft, während ein Drittel als ungeeignet und ein Fünftel als geeignet bewertet wurde. Trotz der erzielten Erkenntnisse besteht weiterhin Verbesserungspotenzial, insbesondere durch die Behebung identifizierter Probleme. Die im Rahmen der Trendanalyse identifizierten Herausforderungen lassen sich in datenbezogene und methodenbezogene Aspekte unterteilen.

Die datenbezogenen Herausforderungen ergeben sich aus der Inkonsistenz erfassten Literatur sowie aus der unzureichenden Verfügbarkeit relevanter Daten. Dabei konnten zentrale Problematiken festgestellt werden.

Für bestimmte Leistungsparameter und Akkutechnologien wurde eine unzureichende Datenbasis identifiziert, die die Validität der Analyse erheblich einschränkt. Zudem weisen die in der Literatur angegebenen Werte häufig eine signifikante Streuung auf. Diese Streuung ist auf verschiedene Faktoren zurückzuführen, darunter das Fehlen standardisierter Testverfahren zur Erhebung der Werte, was die Vergleichbarkeit der Daten weiter erschwert.

Die methodenbezogenen Herausforderungen beziehen sich auf die eingesetzten Ansätze zur Bewertung der Eignung von Trends für Extrapolationen. Hierbei wurde deutlich, dass das Bestimmtheitsmaß R^2 als rein quantitatives Bewertungsinstrument aufgrund seiner Fehleranfälligkeit in Bezug auf diese Arbeit allein nicht ausreichend ist. Um eine fundierte Bewertung der Eignung der identifizierten Trends für Extrapolationen zu gewährleisten, ist eine ergänzende qualitative Analyse unerlässlich.

Zur Lösung der identifizierten Problematiken wurden spezifische Lösungsansätze entwickelt, die darauf abzielen, die Qualität der Trendanalyse signifikant zu steigern. Ein wesentlicher Ansatz besteht in der gezielten Eingrenzung des Untersuchungsbereichs auf die Literatur, die ausschließlich Werte berücksichtigt, die unter einheitlichen Testprozeduren ermittelt wurden. Ein geeignetes Vorbild könnte das WLTP-Testverfahren darstellen, das im Automobilsektor zur standardisierten und vergleichbaren Ermittlung des Verbrauchs von Fahrzeugen dient. Die Implementierung eines vergleichbaren standardisierten Ansatzes in der Akkutechnologie würde dazu beitragen, die Streuung der Daten zu minimieren und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wesentlich zu verbessern.

Darüber hinaus könnten für die methodenbezogenen Herausforderungen geglättete Trendlinien zum Einsatz kommen, um die Auswirkungen von Ausreißern und Datenstreuungen zu reduzieren. Dies würde zu präziseren Werten für das Bestimmtheitsmaß R^2 führen und die Aussagekraft der Regressionsanalyse erhöhen. Derartige Anpassungen könnten die methodische Grundlage der Trendanalyse erheblich stärken und die Verlässlichkeit der Ergebnisse verbessern. Solche Maßnahmen könnten die Aussagekraft der Analyse und die Verlässlichkeit der Ergebnisse signifikant steigern.

Trotz verbesserter Datengrundlage und optimierter Analyse könnte es in einigen Fällen dennoch keine Eignung für eine Extrapolation geben, da die zugrunde liegenden technologischen oder marktspezifischen Entwicklungen der Akkutechnologien von einer Vielzahl von externen Einflussfaktoren abhängen. Unvorhersehbare technologische Durchbrüche oder Änderungen in der Markt- und Regulierungslage, wie beispielsweise durch die **Richtlinie 2006/66/EG**, könnten die Kontinuität der beobachteten Trends beeinträchtigen und die langfristige Vorhersagbarkeit erschweren.

Aus der Trendanalyse wurden Parallelen zu bestehenden Trendgesetzen abgeleitet. Dabei konnte eine deutliche Übereinstimmung mit Wright's Law festgestellt werden, das den systematischen Rückgang der Stückkosten mit zunehmender kumulativer Produktionsmenge beschreibt. Die analysierten Daten bestätigen, dass die beobachteten Entwicklungen in der Batterietechnologie bis 2017 den Prinzipien dieses Gesetzes folgen. Die zunehmende Forschungsintensität der letzten Jahrzehnte zeigt nicht nur den Fortschritt bei den technischen Parametern wie der gravimetrischen Energiedichte, sondern auch die steigende Wettbewerbsfähigkeit alternativer Energiespeicher, die für die Energiewende und eine nachhaltige Mobilität unverzichtbar sind.

Diese Arbeit bildet ein Fundament für zukünftige Forschung im Bereich der Energiespeichertechnologien, insbesondere im Kontext der Elektromobilität. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine konsistentere Datenlage, die eine fundiertere Analyse ermöglicht. Ein klarer Fokus sollte dabei auf der Entwicklung standardisierter Analyseverfahren liegen, um die Vergleichbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen. Zusätzlich ist die Berücksichtigung disruptiver technologischer Innovationen von zentraler Bedeutung, da diese die zukünftige Entwicklung von Batterietechnologien und damit auch die Reichweite, Effizienz und Marktfähigkeit von Elektrofahrzeugen maßgeblich beeinflussen können. Durch einen eingegrenzten Untersuchungsrahmen könnten in der Zukunft präzisere Ergebnisse erzielt und wertvolle Erkenntnisse über die langfristigen Trends in der Batterietechnologie und ihre Relevanz für die Elektromobilität gewonnen werden.

Literaturverzeichnis

- Ahmad 2010** AHMAD, Jakaria; M. S. RAHMAN PIR, Rumel: Advanced Energy Storage for Evolving Telecom Needs. In : *International Journal of Research and Reviews in Computer Science*, 1 (2010), Nr. 4, S. 50 – 55
- Albany 2021** ALBANY, N. Y.: IBM Unveils World's First 2 Nanometer Chip Technology, Opening a New Frontier for Semiconductors, 2021 – URL: <https://newsroom.ibm.com/2021-05-06-IBM-Unveils-Worlds-First-2-Nanometer-Chip-Technology,-Opening-a-New-Frontier-for-Semiconductors> (17.08.2024)
- Andrew 1983** ANDREW, Michael G.; WEINLEIN, Conrad E.: The Lead-Acid Battery – Demonstrating the Systems Design Approach to a Practical Electric Vehicle Power Source. In : *IEEE Transactions on vehicular technology*, VT-32 (1983), Nr. 1, S. 21 – 25
- Antwerpes o.J.** ANTWERPES, Frank: DocCheck Flexikon - *Interkalation*, o.J.. – URL: <https://flexikon.doccheck.com/de/Interkalation> (14.10.2024)
- Appleby 1995** APPLEBY, A. J.: Electrochemical energy – progress towards a cleaner future: lead/acid batteries and the competition. In : *Journal of Power Sources*, 53 (1995), Nr. 2, S. 187 – 197
- Asbury et al. 1984** ASBURY, J. G.; SEAY, J. G.; WALSH, W. J.; et al.: *The Role of Electric Vehicles in the Nation's Energy Future*, 1984. – <https://www.osti.gov/servlets/purl/6450723> (16.12.2024)
- Axsen et al. 2008** AXSEN, Jonn; BURKE, Andrew; KURANI, Ken; et al.: *Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008*, 2008. – <https://escholarship.org/uc/item/1bp83874> (24.12.2024)
- Azulay 1967** AZULAY, M.; KIRKMAN, D. W. T.: SOME PRACTICAL APPLICATIONS OF „SEALED“ NICKEL CADMIUM BATTERIES WITH CHARGING ARRANGEMENTS ADOPTED FOR VARIOUS OPERATIONAL REGIMES. In : *Power Sources*, (1968), S. 399 – 410
- Backhaus et al. 2021** BACKHAUS, Klaus; ERICHSON, Bernd; GENSLER, Sonja; et al.: *Multivariate Analyseverfahren*. Wiesbaden : Springer Gabler, 2021
- Backhaus 2023** BACKHAUS, Richard: Zellentwicklung für die Batterien künftiger Elektrofahrzeuge. In : *MTZ – Motortechnische Zeitschrift*, 84 (2023), S. 8 – 13
- Barak 1968** BARAK, M.: Cordless Power Appliances. In : *Journal of Royal Society of Arts*, 116 (1968), Nr. 5146, S. 815 – 837

- Beck 1988** BECJ, F.: Elektrochemie neuer Speichersysteme. In : *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 92 (1988), Nr. 11, S. 1283 – 1297
- Bell et al. 1972** BELL, Chester Gordon; CHEN, Robert C.; REGE, Satish L.; et al.: Effect of Technology on Near Term Computer Structures. In : *Computer*, 5 (1972), Nr. 2, S. 29 – 38
- Bell 2008** BELL, Chester Gordon: Bells's law fort he birth and death of computer classes. In : *Communications oft he ACM*, 5 (2008), Nr. 1, S. 86 – 94
- Bernard 2015** BERNARD, Patrick; LIPPERT, Michael: Nickel-Cadmium and Nickel-Metal Hydride Battery Energy Storage. In : *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, 2015, Chapter Nr. 14, S. 223 – 251
- Berndt 2014** BERNDT, Dietrich: *Batteries, 3. Secondary Batteries – Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Kronberg : Wiley-VCH Verlag, 2014
- Bodamer et al. 1979** BODAMER, G. W.; BRANCA, G. C.; CASH, H. R.; et al.: *Research, development and demonstration of Lead-acid batteries for electric vehicle propulsion – Annual report*, 1977. – <https://www.osti.gov/biblio/6815867> (15.12.2024)
- Brill et al. 1990** BRILL, J.; COATES, D.; BEMIS, P.; et al.: *Sealed Nickel-Metal Hydride Batteries for Small Satellite Applications*, 1990. – <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2811&context=smallsat> (17.12.2024)
- Broussely et al. 1997** BROUSSELY, M.; PLANCHAT, J. P.; RIGOBERT, G.; et al.: Lithium-ion batteries for electric vehicles: performances of 100 Ah cells. In : *Journal of Power Sources*, 68 (1997), Nr. 1, S. 8 – 12
- Buchmann o.J.** BUCHMANN, Isidor: BU-205: Types of Lithium-ion, o.J.. – URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion> (09.11.2024)
- Budde-Meiwes et al. 2013** BUDDE-MEIWES, Heide; DRILLKENS, Julia; LUNZ, Benedikt; et al.: A review of current automotive battery technology and future prospects. In : *Journal of Automobile Engineering*, 227 (2013), Nr. 5, S. 761 – 776
- Bullock 1994** BULLOCK, Kathryn R.: Lead/acid batteries. In : *Journal of Power Sources*, 51 (1994), Nr. 1 – 2, S. 1 – 17
- Burton 2013** BURTON, Nigel: *A History of Electric Cars*. Ramsbury, Marlborough: The Crowood Press Ltd, 2014
- Camargos et al. 2022** CAMARGOS, Pedro H.; DOS SANTOS, Pedro H. J.; DOS SANTOS, Igor R.; et al.: Perspectives on Li-ion battery categories for electric vehicle applications: A review of state oft he art. In : *International Journal of Energy Research*, 46 (2022), Nr. 13, S. 19258 – 19268

- Caprioglio 1969** CAPRIOGLIO, Giovanni: *Review of Battery Systems for Electric Vehicles*. Detroit, Michigan : Society of Automotive Engineers, 1969
- Carlson 2022** CARLSON, Rob: *DNA Cost and Productivity Data, aka „Carlson Curves“*, 2022. – URL: <https://www.synthesis.cc/synthesis/2022/10/dna-synthesis-cost-data> (19.09.2024)
- Chan 1993** CHAN, C. C.: An Overview of Electric Vehicle Technology. In : *Proceedings of the IEEE*, 81 (1993), Nr. 9, S. 1202 – 1213
- Chen et al. 2009** CHEN, Haisheng; NGOC CONG, Thang; YANG, Wei; et al.: Progress in electrical energy storage system: A critical review. In : *Progress in Natural Science*, 19 (2009), Nr. 3, S. 291 – 312
- Cheng 2009** CHENG, K. W. E.: Recent Development on Electric Vehicles. In : *3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, (2009), S. 1 – 5
- Cheiky et al. 1990** CHEIKY, Mike C.; DANCZYK, Len G.; WEHREY, Michael C.: *Rechargeable Zinc-Air Batteries in Electric Vehicle Applications*. San Diego, California : Society of Automotive Engineers, 1990
- Cheiky et al. 1991** CHEIKY, Mike C.; DANCZYK, Len G.; SCHEFFLER, Robert L.: *Zinc-Air Powered Electric Vehicle Systems Integration Issues*. Detroit, Michigan : Society of Automotive Engineers, 1991
- Chih-Chiang Hua 2010** CHIH-CHIANG HUA, A.; ZONG-WEI SYUE, B.: Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO₄ battery. In : *The 2010 International Power Engineering Conference (IPEC)*, (2010), S. 1478 – 1489
- Chiriac et al. 2009** CHIRIAC, Gabriel; STICEA, Daniel; LIVINT, Gheorghe; et al.: Tendencies in electric and hybrid electric vehicles batteries. In : *7th International Conference on Electrochemical and Power Systems*, (2009), S. II-181 – II-186
- Choi et al. 2010** CHOI, Daiwon; WANG, Wei; VISWANATHAN, Vish V.; et al.: *Low Cost, Long Cycle Life, Li-ion Batteries for Stationary Applications*, 2010. – URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/ESS%202010%20Update%20Conference%20-%20Low%20Cost%20Long%20Cycle%20Life%20Li-ion%20Batteries%20for%20Stationary%20Applications%20-%20Daiwon%20Choi%2C%20PNNL.pdf> (14.12.2024)
- Chryssos 2012** CHRYSSOS, Georgios: *Die Welt der Batteries*, 2012. – URL: https://www.grs-batterien.de/fileadmin/Downloads/Welt_der_Batterien/Welt_der_Batterien.pdf (19.12.2024)
- Conte 2006** CONTE, F. V.: Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review. In : *Elektrotechnik & Informationstechnik*, 123 (2006), S. 424 – 431

- Cornu 1994** CORNU, Jean-Pierre: High performance nickel-cadmium cells for electric vehicles. In : *Journal of Power Sources*, 51 (1994), Nr. 1 - 2, S. 19 – 28
- Crastan 2018** CRASTAN, Valentin: *Elektrische Energieversorgung 2*. Berlin : Springer Vieweg, 2018
- Das et al. 2021** DAS, Deya; GOPE, Subhra; JANA, Malay; et al.: Cell selection based on chemistry and key parameters for electric vehicle. In : *International Journal of Electrochemical Science*, 15 (2021), Nr. 8, S. 7242 – 7259
- Degnarain 2018** DEGNARAIN, Nishan; PHELAN, Ryan: *5 Biotechnologies that might help save endangered species*, 2018. – URL: <https://reviverestore.org/5-technologies-save-endangered-species/> (19.09.2024)
- Dhar et al. 1997** DHAR, S. K.; OVSHINSKY, P. R.; GIFFORD, P. R.; et al.: Nickel/metal hydride technology for consumer and electric vehicle batteries – a review and up-date. In : *Journal of Power Sources*, 65 (1997), Nr. 1 – 2, S. 1 – 7
- Dietlm 2018** CRASTAN, Valentin: *Elektrische Energieversorgung 2*. Berlin : Springer Vieweg, 2018
- DiLeo et al. 2010** DILEI, Roberta A.; CASTIGLIA, Anthony; GANTER, Matthew J.; et al.: Enhanced Capacity and Rate Capability of Carbon Nanotube Based Anodes with Titanium Contacts for Lithium Ion Batteries. In : *ACS Nano*, 4 (2010), Nr. 10 – 2, S. 6121 – 6131
- Douglas 1967** DOUGLAS, David L.: Lead-Acid Batteries and electric vehicles. In : *Power Systems for electric vehicles*, 37 - 39 (1967), S. 201 – 208
- Douglas 1974** DOUGLAS, David L.: The Impact of advanced batteries on electric power generation. In : *IEEE Power Engineering Society Paper*, 74 (1974), S. 37 – 41
- Duddy 1961** DUDDY, J. C.; SALKIND, A. J.: High Energy: Weight Ratio, Nickel Cadmium Cells. In : *Journal of The Electrochemical Society*, 108 (1961), Nr. 8, S. 717 – 719
- Dücker o.J.** DÜCKER, Simon Julius: *Dis- und Komproportionierung*, o.J.. – URL: <https://www.abiweb.de/anorganische-chemie/donator-akzeptor-prinzip/redox-chemie/dis-und-komproportionierung.html#:~:text=Eine%20Komproportionierung%2C%20auch%20Synproportionierung%20genannt,14>. (14.10.2024)
- Ecker 2013** ECKER, Madeleine; SAUER, Uwe: Batterietechnik Lithium-Ionen-Batterien. In : *MTZ – Motortechnische Zeitschrift*, 74 (2013), S. 66 – 70
- Edwards 2001** EDWARDS, Dean B.; KINNEY, Charles: Advanced Lead Acid Battery Designs for Hybrid Electric Vehicles. In : *IEEE Sixteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances*, (2001), S. 157 – 175

- Ferguson et al. 2008** FERGUSON, Scott; NECHEV, Kamen; ROLLER, David; et al.: Advanced Lithium Ion Systems for Military Vehicle Applications. In : *All Electric Vehicle Conference*, (2008), S. 1 – 11
- Fetcenko et al. 1990** FETCENKO, M. A.; VENKATESAN, S.; OVSHINSKY, S. R.; et al.: Advances in Ni-MH battery performance. In : *Proceedings of the 34th International Power Sources Symposium*, (1990), S. 207 – 212
- Foster 1986** FOSTER, Richard N.: *Innovation Die technologische Offensive*. Heidelberg : Redline Wirtschaft, 1986
- Gaines 2000** GAINES, L.; CUENCA, R.: *Costs of lithium-ion batteries for vehicles*, 2000. – <https://www.osti.gov/servlets/purl/761281> (20.12.2024)
- Gaines 2014** GAINES, Linda: The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. In : *Sustainable Materials and Technologies*, 1-2 (2014), S. 2 – 7
- Greif 2023** GREIF, Martin: *LFP / LiFePo4 Zellen: Der moderne Solarspeicher*, 2023. – URL: <https://www.pv-portal-thueringen.de/lfp-speicher/> (14.10.2024)
- Grellmann 2023** GRELLMANN, Martin: *Variabilität in der Statistik: Was es ist und warum es wichtig ist*, 2023. – URL: <https://martin-grellmann.de/variabilitaet-in-der-statistik-was-es-ist-und-warum-es-wichtig-ist#:~:text=In%20der%20Statistik%20bezieht%20sich,von%20dem%20durchschnittlichen%20Wert%20abweichen.> (25.12.2024)
- Gu et al. 2007** GU, Yi-Jie; ZENG, Cui-Song; WU, Hui-Kang; et al.: Enhanced cycling performance and high density of LiFePO₄ based lithium ion batteries. In : *Materials Letters*, 61 (2007), Nr. 25, S. 4700 – 4702
- Hardin 1989** HARDIN, J. E.: *Laboratory testing of Saft SEH-5-200 6 volt traction battery*, 1989. – <https://www.osti.gov/biblio/7037946> (15.12.2024)
- Hariprakash et al. 2004** HARIPRAKASH, B.; MANE, A. U.; MARTHA, S. K.; et al.: A Low-Cost, High Energy-Density Lead/acid Battery. In : *Electrochemical and Solid-State Letters*, 7 (2004), Nr. 3, S. A66 – A69
- Hasselwander et al. 2023** HASSELWANDER, Samuel; MEYER, Markus; ÖSTERLE, Ines; et al.: Techno-Economic Analysis of Different Battery Cell Chemistries for the Passenger Vehicle Market. In : *Batteries*, 9 (2023), Nr. 7, S. 1 – 26
- Heidelberger 2021** HEIDELBERGER, Martin; LEHNÉ, Margarete: *Nachhaltige und sichere Batterien: Forschung am Lebenszyklus*, 2021. – URL: https://www.kit.edu/kit/pi_2021_004_nachhaltige-und-sichere-batterien-forschung-am-lebenszyklus.php (16.07.2024)
- Hoese 2011** HOESE, Frank: *BYD F3Dm (2011)*, 2011. – URL: <https://www.automativ.de/byd-f3dm-2011-id-397.html> (28.12.2024)

- Högemann o.J.** HÖGEMANN, Astrid: *DNA-Sequenzierung*, o.J. – URL: <https://flexikon.doccheck.com/de/DNA-Sequenzierung> (28.12.2024)
- Hohentanner et al. o.J.** HOHENTANNER, Simon; SÖHLEMANN, Till; FELGENHAUER, Christian; et al.: *DNA-Synthese*, o.J. – URL: <https://www.studysmarter.de/schule/biologie/biowissenschaften/dna-synthese/> (27.12.2024)
- Honsberg 2019** HONSBURG, Christiana B.; BOWDEN, Stuart G.: *Summary and Comparison of Battery Characteristics*, 2019 – URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/battery-characteristics/summary-and-comparison-of-battery-characteristics> (19.10.2024)
- Hutchinson et al. 2014** HUTCHINSON, Tim; BURGESS, Stuart; HERRMANN, Guido; et al.: *Current Hybrid-Electric Powertrain Technologies: Evaluation of Architecture Designs and Empirical Analysis of Whole-life Costing*, 2014. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/33130765.pdf> (16.12.2024)
- Hülsebusch et al. 2010** HÜLSEBUSCH, Dirk; SCHWUNK, Simon; CARON, Simon; et al.: Modeling and simulation of electric vehicles – The effect of different Li-ion battery technologies. In : *The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS 25)*, (2010), S. 1 – 8
- Hyung et al. 1999** HYUNG, Yoo-Eup; MOON, Seong-In; YUM, Duk-Hyeng; et al.: Fabrication and evaluation of 100 Ah cylindrical lithium ion battery for electric vehicle applications. In : *Journal of Power Sources*, 81 - 82 (1999), S. 842 – 846
- IEA 2020** THE INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA): *Evolution of Li-ion battery price, 1995 - 2019*, 2020. – URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-li-ion-battery-price-1995-2019> (20.12.2024)
- Jafari 2020** JAFARI, Hasan; RAHIMPOUR, Mohammad Reza: Pb Acid Batteries. In : *Rechargeable Batteries: History, Progress and Applications*, (2020), S. 17 – 39
- Jerrard 1986** JERRARD, Harold G.; MCNEILL, Donald B.: *A dictionary of scientific units : including dimensionless numbers and scales*. London : Chaomann and Hall, 1986
- Jess o.J.** JESS, Alexander: *WLTP – neues Testverfahren weltweit am Start*, o.J.. – URL: https://www.vdik.de/wp-content/uploads/2019/09/WLTP_Fragen-und-Antworten-zum-neuen-Testverfahren.pdf (02.01.2025)
- John 2024** JOHN: *How Long do Lithium Batteries Last?*, 2024. – URL: <https://www.ufinebattery.com/blog/how-long-do-lithium-batteries-last/#:~:text=Let's%20explore%20some%20common%20types,usage%20patterns%20and%20environmental%20conditions.> (09.11.2024)

- Johnson et al. 2008** JOHNSON, Za; CORDOVA, Stephen; ABRAHAM, K. M.: *High Performance Lithium Ion Aircraft Battery for DoD Platforms*. Bellevue, Washington : Society of Automotive Engineers, 2008
- Jung et al. 2015** JUNG, Joey; ZHANG, Lei; ZHANG, JiuJun: *Lead-Acid Battery Technologies*. Boca Raton : CRC Press, 2015
- Kaldellis 2008** KALDELLIS, J. K.: Integrated electrification solution for autonomous electrical networks on the basis of RES and energy storage configurations. In : *Energy Conversion and Management*, 49 (2008), Nr. 12, S. 3708 – 3720
- Kampker 2024** KAMPKER, Achim; HEIMES, Heiner Hans: *Elektromobilität*. Berlin: Springer Vieweg, 2024
- Kato et al. 1993** KATO, Hisayuki; YAMAMOTO, Yoshikatsu; NAGAMINE, Masayuki; et al.: Lithium Ion Rechargeable Batteries. In : *IEEE Proceedings of WESCON '93*, (1993), S. 210 – 214
- Keil et al. 2015** KEIL, Peter; SCHUSTER, Simon F.; VON LÜDERS, Christian; et al.: Lifetime Analysis of Lithium-Ion EV Batteries. In : *3rd Electromobility Challenging Issues conference (ECI)*, (2015), S. 1 – 5
- Kempton 1997** KEMPTON, Willett; LETENDRE, Steven E.: Electric vehicles as a new power source for electric utilities. In : *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2 (1997), Nr. 3, S. 157 – 175
- Kennedy et al. 2000** KENNEDY, B.; PATTERSON, D.; CAMILLERI, S.; et al.: Use of lithium-ion batteries in electric vehicles. In : *Journal of Power Sources*, 90 (2000), Nr. 2, S. 156 – 162
- Kevlishvili et al. 2019** KEVLISHVILI, Nina; RISSE, S.; FIGGEMEIER, E.; et al.: Herausforderungen und Perspektiven bei Lithium-Ionen-Batterien. In : *Energy Research for Future – Forschung für die Herausforderungen der Energiewende*, 2020, S. 61 – 66
- Kitaronka 2022** KITARONKA, Sefu: *Lead-Acid Battery*. Siirt University Institute of Science, Electrical and Electronics Engineering Department, 2022
- Koehler et al. 1997** KOEHLER, Uwe.; KRUGER, Franz J.; KUEMPERS, Joerg; et al.: High performance nickel-metal hydride and lithium-ion batteries. In : *IEEE Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering (IECEC)*, (1997), S. 93 – 98
- Kondoh et al. 1999** KONDOH, J.; ISHII, I.; YAMAGUCHI, H.: *Electrical Energy Storage Systems for the Energy Networks with Dispersed Generators*. Vancouver, British Columbia : Society of Automotive Engineers, 1999
- Korthauer 2013** KORTHAUER, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin Heidelberg : Springer Vieweg, 2013

- Kosmol o.J.** KOSMOL, Cornelia: „Suchbegriffe – geschickt verknüpft ist halb gewonnen“, o.J.. – URL: https://staatsbibliothek-berlin.de/fileadmin/user_upload/zentrale_Seiten/katalogsystem_wd/dokument/e/e-day/eday_16_HO_recherche_Suchbegriffe.pdf (16.07.2024)
- Krausa o.J.** KRAUSA, Michael: *Natrium-Nickelchlorid-Batterie*, o.J.. – URL: <https://www.batterieforum-deutschland.de/lexikon/natrium-nickelchlorid-batterie/> (16.08.2024)
- Kurzweil 2017** KURZWEIL, Peter; GARCHE, Jürgen: Overview of batteries for future automobiles. In: GARCHE, Jürgen; KARDEN, Eckhard; RAND, David A. J.; et al.: *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*. Amsterdam : Elsevier, 2017
- Kurzweil 2018** KURZWEIL, Peter; DIETLMEIER, Otto K.: *Elektrochemische Speicher*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2018
- Kurzweil 2020** KURZWEIL, Peter: *Angewandte Elektrochemie – Grundlagen, Messtechnik, Elektroanalytik, Energiewandlung, technische Verfahren*. Wiesbaden : Springer Nature, 2020
- Lailier et al. 2001** LAILLER, Patrick; SARRAU, Jean-François; SARRAZIN, Christian; et al.: Comparative study for „36 V“ vehicle applications: advantages of lead-acid batteries. In : *Journal of Power Sources*, 95 (2001), Nr. 1 - 2, S. 58 – 67
- Landgrebe et al. 1988** LANDGREBE, Albert R.; RAND, David J.; VAN VOORHEES, Seth L.: *Stationary energy storage: Load leveling and remote applications*. Pennington : The Electrochemical Society, 1988
- Linden 1984** LINDEN, David; REDDY, Thomas B.: *Handbook of batteries*. New York : McGraw-Hill, 1984
- Linden 2002** LINDEN, David; REDDY, Thomas B.: *Handbook of batteries*. New York : McGraw-Hill, 2002
- Lowe et al. 2010** LOWE, Marcy; TOKUOKA, Saori; TRIGG, Tali; et al.: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: The U.S. Value Chain. In : *Center on Globalization, Governance & Competitiveness*, (2010), S. 1 – 76
- Loyns et al. 2005** LOYNS, A. C.; ELLIS, K. G.; HILL, J. M.; et al.: High Voltage Lead-acid Battery Modules. In : *INTELEC 05 – Twenty-Seventh International Conference on Telecommunications Energy*, (2005), S. 277 – 281
- Lu 2005** LU, Zhonghua; DAHN, Jeffrey R.: *Cathode compositions for lithium-ion batteries*, 2005. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/31/8e/cb/64ee52461637a5/US6964828.pdf> (16.12.2024)
- Mandel 1966** MANDEL, Hyman: *RECENT DEVELOPMENTS IN SECONDARY BATTERIES*. Fort Monmouth, N. J. : Society of Automotive Engineers, 1966

- Martha et al. 2006** MARTHA, S. K.; HARIPRAKASH, B.; SHUKLA, A. K.; et al.: A low-cost lead-acid battery with high specific-energy. In : *Journal of Chemical Sciences*, 118 (2006), Nr. 1, S. 93 – 98
- Martín-Martín et al. 2018** MARTÍN-MARTÍN, Alberto; ORDUNA-MALEA, Enrique; THELWALL, Mike; et al.: Google Scholar, Web of Science, and Scopus: A systematic comparison of citations in 252 subject categories. In : *Journal of Informetrics*, 12 (2018), Nr. 4, S. 1160 – 1177
- McDowall 2006** MCDOWALL, Jim: Integrating energy storage with wind power in weak electricity grids. In : *Journal of Power Sources*, 162 (2006), Nr. 2, S. 959 – 964
- Morrow 1986** MORROW, George W.: *Qualification testing of general electric 50 Ah Nickel-Cadmium cells with new separator and new positive plate processing*, 1986. – URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19870001651/downloads/19870001651.pdf> (16.12.2024)
- Müller 2024** MÜLLER, Patrick: *C-Rate*, 2024. – URL: <https://chargehere.de/glossar/c-rate/> (16.12.2024)
- Nasajpour-Esfahani et al. 2024** NASAJPOUR-ESFAHANI, Navid; GARMESTANI, Hamid; BAGHERITABAR, Mohsen; et al.: Comprehensive review of lithium-ion battery materials and development challenges. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 203 (2024), 114783
- Nitta et al. 2015** NITTA, Naoki; WU, Feixiang; TAE LEE, Jung; et al.: Li-ion battery materials: present and future. In : *Materials today*, 18 (2015), Nr. 5, S. 252 – 264
- O'Brien et al. 1996** O'BRIEN, W. A.; STICKEL, R. B.; MAY, G. J.: Advancing electric-vehicle development with pure-lead-tin battery technology. In : *Journal of Power Sources*, 67 (1996), Nr. 1 - 2, S. 151 – 155
- Oman 1994** OMAN, Henry: New Electric-Vehicle Batteries. In : *IEEE Proceedings of NORTHCON '94*, (1994), 326 – 330
- Oman 1995** OMAN, Henry; GROSS, Sid: Electric-Vehicle Batteries. In : *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 10 (1995), Nr. 2, S. 29 – 35
- Orecchini et al. 2014** ORECCHINI, Fabio; SANTIANGELI, Adriano; DELL'ERA, Alessandro; et al.: EVs and HEVs Using Lithium-Ion Batteries. In: PISTOIA, Gianfranco: *Lithium-Ion Batteries*. Rom : Elsevier, 2014
- Owen 1997** OWEN, John R.: Rechargeable lithium batteries. In : *Chemical Society Reviews*, 26 (1997), S. 259 – 267

- Paiola 2022** PAIOLA, Alessandro: *GM EV1 (1996– 1999): Der verhinderte Elektro-Fortschritt*, 2022. – <https://insideevs.de/news/586129/gm-ev1-1996-elektroauto-historie/> (21.12.2024)
- Pedram et al. 2010** PEDRAM, Massoud; CHANG, Naehyuck; KIM, Younghyun: Hybrid electrical energy storage systems. In : *ISLPED '10: Proceedings of the 16th ACM/IEEE international symposium on Low power electronics and design*,(2010), S. 363 – 368
- Perez 1987** PEREZ, Richard: Lead-Acid Batteries. In : *Home Power*, 1 (1987), S. 25 – 30
- Planté 1887** PLANTÉ, Gaston: *The storage of electrical energy and researches in the effects created by currents combining quantity with high tension*. London : Whittaker, 1887
- Porzio 2021** PORZIO, Jason; SCOWN, Corinne D.: Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials. In : *Advanced Energy Materials*, 11 (2021), Nr. 33, S. 1 – 20
- Putois 1995** PUTOIS, F.: Market for nickel-cadmium batteries. In : *Journal of Power Sources*, 57 (1995), Nr. 1 - 2, S. 67 – 70
- Ragone 1968** RAGONE, D. V.: *Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles*. Detroit, Michigan : Society of Automotive Engineers, 1968
- Ramakumar et al. 1976** RAMAKUMAR, R.; HUGHES, W. L.; ALLISON, H. J.: *Development and adaptation of field modulated generator systems for wind energy applications. Final report*, 1976. – <https://www.osti.gov/servlets/purl/7287303> (17.12.2024)
- Rantik 1999** RANTIK, Michail.: *Life Cycle Assessment of Five Batteries for Electric Vehicles under Different Charging Regimes*, 1999. – <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20016968> (19.12.2024)
- Rand et al. 1998** RAND, David A. J.; WOODS, R.; DELL, Ronald: *Batteries for electric vehicles*. New York : John Wiley & Sons, 1998
- Ratner 1990** RATNER, E. Z.; HENRIKSEN, G. L.: *Assessment of battery technologies for electric vehicles*, 1990. – <https://www.osti.gov/biblio/6718495> (15.12.2024)
- Reimann 2023** REIMANN, Julian: *Die Evolution der Batterie ist noch lange nicht zu Ende*, 2023. – <https://edison.media/verkehr/die-evolution-der-autobatterie-und-was-da-noch-kommt/25243196/> (15.12.2024)
- Richter 2020** RICHTER, Bernhard: *Die Entwicklung der Lithium-Ionen-Batterie*, 2020. – <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/die-entwicklung-der-lithium-ionen-batterie-a-962889/> (15.12.2024)

- Richtlinie 2006/66/EG** Richtlinie 2006/66/EG: *Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG*, ABl. L 266, 26.9.2006, S. 5
- Ruetschi 2004** RUETSCHI, Paul: Aging mechanism and service life of lead-acid batteries. In : *Journal of Power Sources*, 127 (2004), Nr. 1 - 2, S. 3 – 44
- Saakes et al. 2005** SAAKES, M.; WOORTMEIJER, R.; SCHMAL, D.; et al.: Bipolar lead-acid battery for hybrid vehicles. In : *Journal of Power Sources*, 144 (2005), Nr. 2, S. 536 – 545
- Sabihuddin et al. 2015** SABIHUDDIN, Siraj; KIPRAKIS, Aristides E.; MUELLER, Markus; et al.: A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies. In : *energies*, 8 (2015), Nr. 1, S. 172 – 216
- Sakai et al. 1990** SAKAL, Tetsuo; MIYAMURA, Hiroshi; KURIYAMA, Nobuhiro; et al.: Metal Hydride Anodes for Nickel-Hydrogen Secondary Battery. In : *Journal of The Electrochemical Society*, (1990), S. 795 – 799
- Sanguesa et al. 2021** SANGUESA, Julio A.; TORRES-SANZ, Vicente; GARRIDO, Piedad; et al.: A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. In : *Smart Cities*, 4 (2021), Nr. 1, S. 372 – 404
- Sauer et al. 2001** SAUER, Dirk Uwe; SCHMIDT, Heribert; KUHMANN, Jérôme: *Elektrische Energiespeicher und Laderegler für Geräte und Kleinsysteme*, 2001. – https://www.researchgate.net/profile/Dirk-Uwe-Sauer/publication/308430244_Elektrische_Energiespeicher_und_Laderegler_fur_Gerate_und_Kleinsysteme/links/57e4461108ae06097a0bf7c7/Elektrische-Energiespeicher-und-Laderegler-fuer-Geraete-und-Kleinsysteme.pdf (06.09.2024)
- Schlotter 1977** SCHLOTTER, W. J.: *Development of a lead acid battery suitable for electric vehicle propulsion final report*, 1977. – <https://www.osti.gov/servlets/purl/7092270> (10.12.2024)
- Sedlak 2019** SEDLAK, Mario: *Citroen Saxo Electric und Peugeot 106 Electric*, 2019. – <https://sedl.at/Elektroauto/Saxo> (10.12.2024)
- Shafique et al. 2022** SHAFIQUE, Muhammad; AKBAR, Arslan; RAFIQ, Muhammad; et al.: Global material flow analysis of end-of-life of lithium nickel manganese cobalt oxide batteries from battery electric vehicles. In : *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 41 (2022), Nr. 2, S. 376 – 388
- Shah Bukhari et al. 2015** SHAH BUKHARI, Syed Murtaza Ali; MAQSOOD, Junaid; QUTAB BAIG, Mirza; et al.: Comparison of Characteristics – Lead Acid, Nickel Based, Lead Crystal and Lithium Based Batteries. In : *17th UKSim-AMSS International Conference on Computer Modeling and Simulation*, (2015), S. 444 – 450

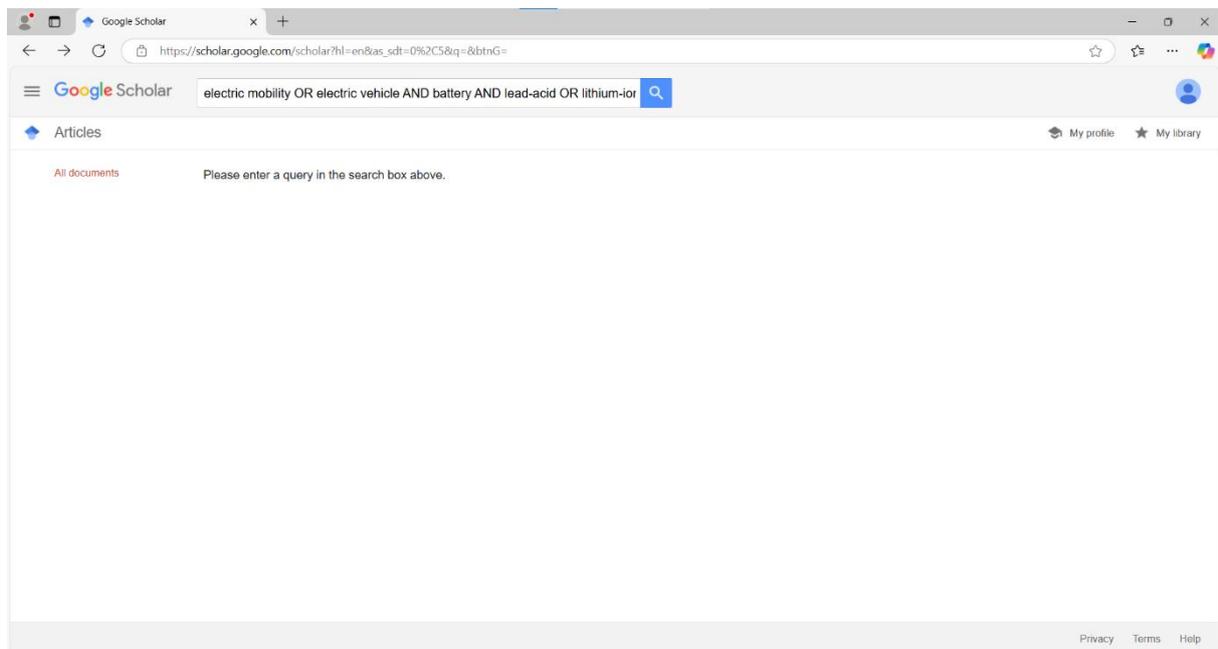
- Shair et al. 1962** SHAIR, R. C.; RAMPPEL, G.; KANTNER, E.; et al.: Hermetically-Sealed Nickel-Cadmium and Silver-Cadmium Storage Batteries. In : *IRE Transactions on Military*. MIL-6 (1962), Nr. 1, S. 67 – 71
- Shukla et al. 2001** SHUKLA, A. K.; VENUGOPALAN, S.; HARIPRAKASH, B.; et al.: Nickel-based rechargeable batteries. In : *Journal of Power Sources*. 100 (2001), Nr. 1 - 2, S. 125 – 148
- Šimić et al. 2021** ŠIMIĆ, Zvonimir; TOPIĆ, Danijel; PELIN, Denis; et al.: Battery energy storage technologies overview. In : *International journal of electrical and computer engineering systems*, 12 (2021), Nr. 1, S. 53 – 65
- Simon o.J.** SIMON, Alexander: *Traktionsbatterie*, o.J.. – https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d12903-2/*/*Traktionsbatterie?op=Wiki.getwiki&search=Na/S-Akku (27.12.2024)
- Sokoli 2022** SOKOLI, Megan: *Electric Pioneers: The Forgotten Chrysler TEVan*, 2022.. – <https://www.hotcars.com/electric-pioneers-chrysler-tevan/> (27.12.2024)
- Srinivasan 2008** SRINIVASAN, Venkat: Batteries for Vehicular Applications. In : *AIP Conference Proceedings*, 1044 (2008), Nr. 1, S. 283 – 296
- Stefan 2024** STEFAN, Annegret: *Alternativen zur Lithium-Ionen-Batterie: Potenziale und Herausforderungen alternativer Batterietechnologien*, 2024. – <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/alternative-batterie-technologien-lithium-ionen-potenziale-herausforderungen.html> (16.10.2024)
- Steindler et al. 1990** STEINDLER, M. J.; NELSON, P. A.; BATTLES, J. E.; et al.: *Chemical Technology Division annual technical report*, 1990. – <https://www.osti.gov/servlets/purl/5759406> (16.12.2024)
- Sterner 2017** STERNER, Michael; STADLER, Ingo: *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin : Springer Vieweg, 2017
- Stiller o.J.** STILLER, Gudrun: *Erfahrungskurveneffekt*, o.J.. – <https://www.wirtschaftslexikon24.com/e/erfahrungskurveneffekt/erfahrungskurveneffekt.htm> (15.09.2024)
- Stippe 2024** STIPPE, Boris: *Entladetiefe (DoD) - Was ist die Depth of Discharge bei Batteriespeichern?*, 2024. – <https://solarwissen.selfmade-energy.com/entladetiefe-dod-was-ist-das/> (15.12.2024)
- Sullivan 2010** SULLIVAN, J. L.; GAINES, L.: *A review of battery life-cycle analysis: state of knowledge and critical needs*, 2010. – <https://publications.anl.gov/anlpubs/2010/11/68455.pdf> (21.12.2024)
- Sure 2017** SURE, Matthias: *Internationales Management*. Wiesbaden : Springer Gabler, 2017

- Susnjara 2024** SUSNJARA, Stephanie; SMALLEY, Ian: *Was ist ein Mainframe?*, 2024. – <https://www.ibm.com/de-de/topics/mainframe#:~:text=Der%20Begriff%20%E2%80%9EMainframe%E2%80%9C%20bezug%20sich,Datenverarbeitungszentrum%20eines%20Unternehmens%20miteinander%20verband.> (27.12.2024)
- Swinkels 1968** SWINKELS, D. A. J.: Electrochemical vehicle power plants. In : *IEEE Spectrum*, 5 (1968), Nr. 5, S. 71 – 77
- Thielmann et al. 2017** THIELMANN, Axel; NEEF, Christoph; HETTESHEIMER, Tim; et al.: *Energiespeicher-Roadmap*, 2017. – <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf> (16.12.2024)
- Tiefel 2007** TIEFEL, Thomas (Hrsg.): *Gewerbliche Schutzrechte im Innovationsprozess*. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 2007
- Tran et al. 2021** TRAN, Manh-Kien; DACOSTA, Andre; MEVAWALLA, Anosh; et al.: Comparative Study of Equivalent Circuit Models Performance in Four Common Lithium-Ion Batteries: LFP, NMC, LMO, NCA. In : *batteries*, 7 (2021), Nr. 3, S. 1 – 15
- Tredeau 2009** TREDEAU, F. P.; SALAMEH, Z. M.: Evaluation of Lithium Iron Phosphate Batteries for Electric Vehicles Applications. In : *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion (VPPC)*, (2009), S. 1266 – 1270
- Ubaldi 2023** UBALDI, Sofia; RUSSO, Paola: Comparison between 18650 Lithium-ion Cells of Different Composition Subjected to Thermal Abuse. In : *Chemical Engineering Transactions*, 104 (2023), S. 49 – 54
- Uehara et al. 1997** UEHARA, I.; SAKAI, T.; ISHIKAWA, H.; et al.: The state of research and development for applications of metal hydrides in Japan. In : *Journal of Alloys and Compounds*, 253 - 254 (1997), S. 635 – 641
- Valenciano et al. 2009** VALENCIANO, J.; FERNÁNDEZ, M.; TRINIDAD, F.; et al.: Lead-acid batteries for micro- and mikd-hybrid applications. In : *Journal of Power Sources*, 187 (2009), Nr. 2, S. 599 – 604
- Valsera-Naranjo et al. 2009** VALSERA-NARANJO, Eduardo; SUMPER, Andreas; LLORET-GALLEGO, Pau; et al.: Electrical vehicles: State of art and issues for their connection to the network. In : *10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, (2009), S. 1 – 3
- Van den Bossche et al. 2006** VAN DEN BOSSCHE, Peter; VERGELS, Frédéric; VAN MIERLO, Joeri; et al.: SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. In : *Journal of Power Sources*, 162 (2006), Nr. 2, S. 913 – 919
- Vinal 1955** VINAL, George Wood: *Storage batteries*. New York : John Wiley & Sons Inc., 1955

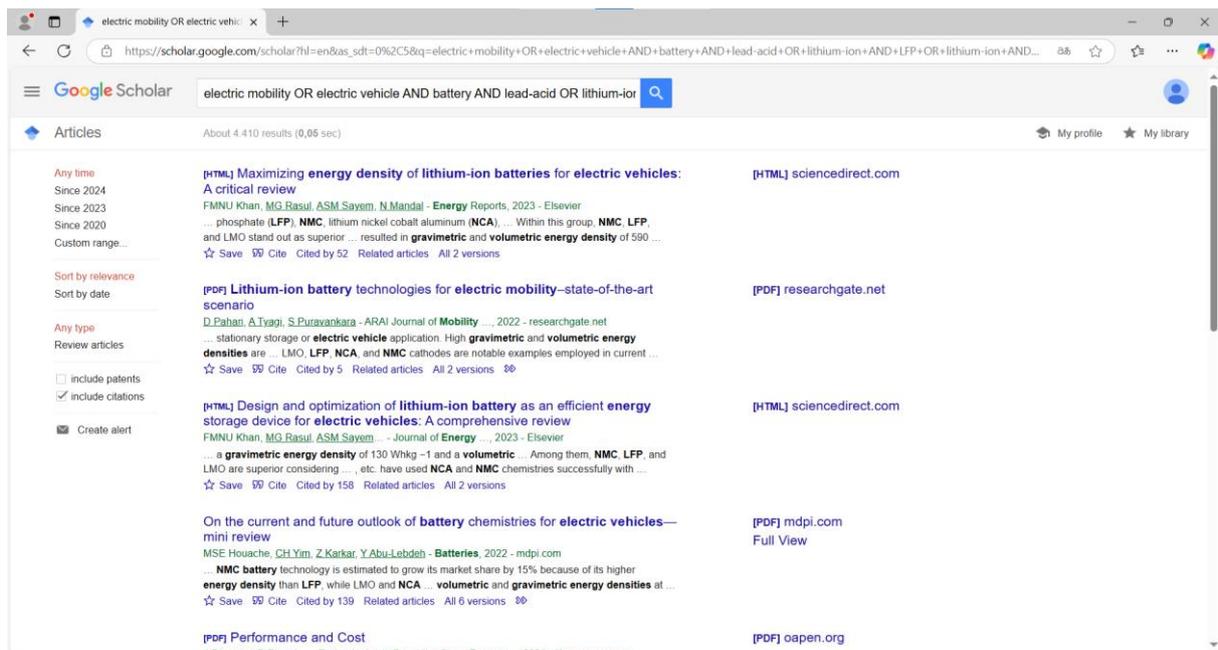
- Vissers et al. 1993** VISSERS, D. R.; DELUCA, W. H.; HENRIKSEN, G. L.; et al.: *Advanced batteries for electric vehicle applications*, 1993. – <https://www.osti.gov/servlets/purl/139698> (18.12.2024)
- Völker 2018** VÖLKER, Rainer; FRIESENHAHN, Andreas (Hrsg.): *Innovationsmanagement 4.0*. Stuttgart : W. Kohlhammer GmbH, 2018
- Wang et al. 2015** WANG, Haotian; LIU, Yayuan; LIN, Dingchang: Electrochemical tuning of olivine-type lithium transition-metal phosphates as efficient water oxidation catalysts. In : *Energy & Environmental Science*, 6 (2015), Nr. 8, S. 1719 – 1724
- Williamson et al. 2005** WILLIAMSON, Sheldon S.; KHALIGH, Alireza; CHUL OH, Sung; et al.: Impact of energy storage device selection on the overall drive train efficiency and performance of heavy-duty hybrid vehicles. In : *2005 IEE Vehicle Power and Propulsion (VPPC)*, (2005), S. 381 – 390
- Winkelhake 2024** WINKELHAKE, Uwe: *Die digitale Transformation der Automobilindustrie*. Berlin : Springer Vieweg, 2024
- Winter 2004** WINTER, Martin; BESENHARD, Jürgen O.: Wiederaufladbare Batterien. In : *Chemie in unserer Zeit*, 33 (2004), Nr. 5, S. 252 – 266
- Witherspoon 1969** WITHERSPOON, ROMEO. R.: *A Mechanically Rechargeable 1-KW Zinc-Air Battery*. Detroit, Michigan : Society of Automotive Engineers, 1969
- Yada 2014** YADA, Chihiro; BRASSE, Claudia: Bessere Batterien mit festem statt flüssigem Elektrolyt. In : *ATZ elektronik*, 9 (2014), S. 20 – 25
- Yao 1978** YAO, N. P.: *Advanced secondary batteries for electric vehicle propulsion*, 1978. – <https://www.osti.gov/servlets/purl/6862193> (15.12.2024)
- Yao et al. 1980** YAO, N. P.; CHRISTIANSON, C. C.; ELLIOTT, R. C.; et al.: *DOE's near-term electric vehicle battery program. Status of improved lead-acid, nickel/iron, and nickel/zinc battery developments*, 1977. – <https://www.osti.gov/biblio/6573707> (15.12.2024)
- Zheng et al. 2018** ZHENG, Feng; KOTOBUKI, Masashi; SONG, Shufeng; et al.: Review on solid electrolytes for all-solid-state lithium-ion batteries. In : *Journal of Power Sources*, 389 (2018), S. 198 – 213
- ZSW 2024** ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG BADEN-WÜRTTEMBERG: *Anzahl von Elektroautos weltweit von 2013 bis 2023 und eine Prognose bis 2030, 2024*. – URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168350/umfrage/bestandsentwicklung-von-elektrofahrzeugen/> (16.07.2024)
- Zubi et al. 2018** ZUBI, Ghassan; DUFO-LÓPEZ, Rodolfo; CARVALHO, Monica; et al.: The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89 (2018), S. 292 – 308

Anhänge

Anhang A – Eingabe des ersten Suchstrings in Google Scholar



Anhang B – Ergebnisse der Eingabe des ersten Suchstrings in Google Scholar



Anhang C – Eingabe des ersten Suchstrings in Scopus

The screenshot shows the Scopus search interface with the following search terms entered in a sequence:

- Search within: Article title, Abstract, Keywords. Search documents: electric mobility
- OR
- Search within: Article title, Abstract, Keywords. Search documents: electric vehicle
- AND
- Search within: Article title, Abstract, Keywords. Search documents: battery
- AND
- Search within: Article title, Abstract, Keywords. Search documents: lead-acid
- OR
- Search within: Article title, Abstract, Keywords. Search documents: lithium-ion
- AND
- Search within: (empty). Search documents: (empty)

Anhang D - Ergebnisse der Eingabe des ersten Suchstrings in Scopus

The screenshot shows the Scopus search results page for the query. It displays 55 documents found, sorted by Date (newest). The results are as follows:

Document title	Authors	Source	Year	Citations
1 Linear Regression-Based Procedures for Extraction of Li-Ion Battery Equivalent Circuit Model Parameters	Savu, V.-I., Brace, C., Engel, G., ... Kural, E., Zhang, N.	Batteries, 10(10), 343	2024	0
2 Optimizing high-energy lithium-ion batteries: a review of single crystalline and polycrystalline nickel-rich layered cathode materials: performance, synthesis and modification	Chen, Y.-S., Dominke, R., Marczewski, M., Wieczorek, W.	Applied Physics A: Materials Science and Processing, 130(10), 740	2024	0
3 A review of improvements on electric vehicle battery	Koehn, A.K., Mwandila, G., Mulalani, F.	Helvion, 10(15), e34806	2024	3

Anhang E – Ergebnisse der Suche für die metrischen Einheiten bis 1960

The screenshot shows a Google Scholar search interface with the following search query: "energy density" OR "volumetric" OR "gravimetric" AND "kWh/kg" OR "kWh/m3". The results are filtered to show articles published between 1900 and 1960. The search results list several articles, including:

- A Review on Ergonomic Design and Development of Flywheel in Exercise Equipment for Energy Generation** by DS Deshmukh, MP Mohurle (1950). Source: academia.edu.
- The flywheel energy storage system: a conceptual study, design, and applications in modern power systems** by TM Aljohani (1950). Source: ijoe.org.
- Dynamic Simulation and Thermodynamic Assessment of the High Performance MED-TVC Plant at Marafiq-Yanbu** by G Ozair, KZ Al-Sebaie, SA Al-Zahrany, HS Al-Subhi (1960). Source: researchgate.net.
- CB4 OFW** by TS Rice (1922). Source: service.gov.uk.
- The production and properties of super-purity aluminium** by TG Pearson, HWL Phillips (1957). Source: journals.sagepub.com.

Anhang F – Ergebnisse der Suche für die metrischen Einheiten bis 1970

The screenshot shows a Google Scholar search interface with the same search query as in Anhang E. The results are filtered to show articles published between 1900 and 1970. The search results list several articles, including:

- Applications and costs of electrical energy sources** by Al Harrison, GR Lomax (1967). Source: Elsevier.
- A Review on Ergonomic Design and Development of Flywheel in Exercise Equipment for Energy Generation** by DS Deshmukh, MP Mohurle (1950). Source: academia.edu.
- The flywheel energy storage system: a conceptual study, design, and applications in modern power systems** by TM Aljohani (1950). Source: ijoe.org.
- Dynamic Simulation and Thermodynamic Assessment of the High Performance MED-TVC Plant at Marafiq-Yanbu** by G Ozair, KZ Al-Sebaie, SA Al-Zahrany, HS Al-Subhi (1960). Source: researchgate.net.
- Electrochemical vehicle power plants** by DAJ Swinkels (1968). Source: ieeexplore.ieee.org.

Anhang G – Beispielrechnung für die lineare Regressionsanalyse

Um die Anwendung der linearen Regressionsanalyse zu verdeutlichen, betrachten wir die Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte von Batterien über einen Zeitraum von 20 Jahren. Die unabhängige Variable (X) steht dabei für das Jahr, in dem der entsprechende Leistungsparameter der gravimetrischen Energiedichte gemessen wurde. Sie repräsentiert also den Stand der Technik in Bezug auf die Batterietechnologie zu diesem Zeitpunkt. Die abhängige Variable (Y) gibt die gravimetrische Energiedichte in Wh/kg an. Die analysierten Datenpunkte sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Beobachtungswerte der abhängigen Variable Y und unabhängigen Variablen X

Grav. Energiedichte (Y) (Wh/kg)	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
	20	60	70	100	120	150	180	200
Jahr (X)	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020

Die Werte wurden exemplarisch gewählt, um die Methodik der linearen Regressionsanalyse verständlich zu machen. Sie dienen lediglich der Illustration und stehen nicht im Zusammenhang mit realen Daten aus der Batterieforschung.

1. Mittelwerte bestimmen

Die Mittelwerte von X und Y werden gemäß der **Gleichung 2.3** und **Gleichung 2.4** berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{1985 + 1990 + 1995 + 2000 + 2005 + 2010 + 2015 + 2020}{8}$$

$$\bar{x} = \mathbf{2002,5}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n}$$

$$\bar{y} = \frac{20 + 60 + 70 + 100 + 120 + 150 + 180 + 200}{8}$$

$$\bar{y} = \mathbf{112,5}$$

2. Abweichungen und Produkte bestimmen:

Mit den zuvor ermittelten Mittelwerten werden die Abweichungen $(x_i - \bar{x})$ und $(y_i - \bar{y})$ sowie deren Produkte $(x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})$ und die quadratische Abweichung der unabhängigen Variable X $(x_i - \bar{x})^2$ berechnet, die zur Ermittlung des Regressionskoeffizienten b benötigt werden. Folgende Tabelle beinhaltet die Ergebnisse dieser Berechnungen:

Ergebnistabelle der Parameter zur Bestimmung des Regressionskoeffizienten b

Jahr (x_i)	grav. Energie- dichte (y_i)	$(x_i - \bar{x})$ (x_i - 2002,5)	$(y_i - \bar{y})$ (y_i - 112,5)	$(x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})$ ($x_i - 2002,5$) * (y_i - 112,5)	$(x_i - 2002,5)^2$
1985	20	-17,5	-92,5	1618,75	306,25
1990	60	-12,5	-52,5	656,25	156,25
1995	70	-7,5	-42,5	318,75	56,25
2000	100	-2,5	-12,5	31,25	6,25
2005	120	2,5	7,5	18,75	6,25
2010	150	7,5	37,5	281,25	56,25
2015	180	12,5	67,5	843,75	156,25
2020	200	17,5	87,5	1531,25	306,25

3. Regressionskoeffizienten b bestimmen:

Nun lässt sich der Regressionskoeffizient b, welche die Steigung der Trendlinie darstellt, wie folgt berechnen:

$$b = \frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2}$$

$$b = \frac{1618,75 + 656,25 + 318,75 + 31,75 + 18,75 + 281,25 + 843,75 + 1531,25}{306,25 + 156,25 + 56,25 + 6,25 + 6,25 + 56,25 + 156,25 + 306,25}$$

$$b = \frac{5300}{1044} = 5,08$$

4. Konstanten Term a bestimmen

Der konstante Term a der linearen Regressionsgleichung berechnet sich über die Differenz der Mittelwerte (\bar{y}) der abhängigen Variable Y (grav. Energiedichte) und des Regressionskoeffizienten b multipliziert mit dem Mittelwert (\bar{x}) der unabhängigen Variable X (Jahre):

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = 112,5 - 5,08 * 2002,5 = -9973,7$$

Der Term a gibt den Y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden an, also den theoretischen Wert von Y , wenn $X = 0$. In unserem Fall würde dies bedeuten, dass die gravimetrische Energiedichte nach der Trendlinie im Jahr 0 bei $-9973,7$ Wh/kg liegen würde. Dieser Wert ist offensichtlich unlogisch und irrelevant, da es im Jahr 0 weder Batterietechnologie noch eine realistische Grundlage für diesen Wert gibt. Der Achsenabschnitt hat somit in diesem Kontext keine praktische Bedeutung und dient lediglich als mathematische Konstante in der Gleichung.

5. Lineare Regressionsgleichung

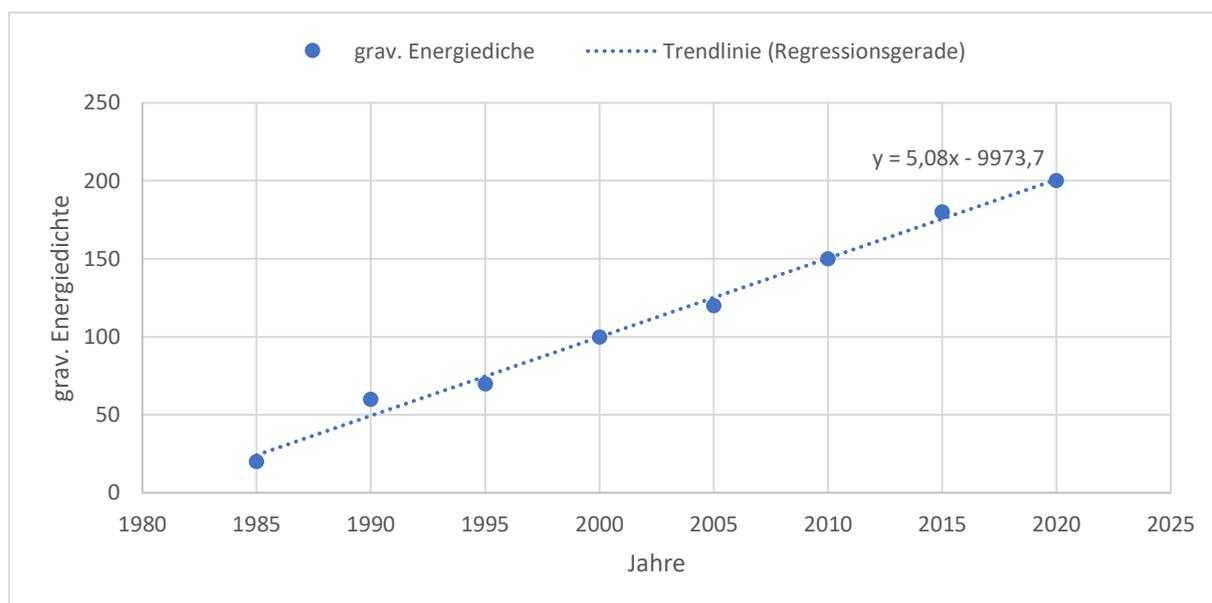
Die Lineare Regressionsgleichung lässt sich durch Einsetzen des ermittelten Regressionskoeffizienten b und des konstanten Terms a beschreiben:

$$Y = a + bX$$

$$Y = -9973,7 + 5,08 * X$$

Nach der Berechnung der linearen Regressionsgleichung werden die erhobenen Datenpunkte in einem Punktediagramm dargestellt, um die Analyse grafisch zu veranschaulichen. Die berechnete Trendlinie wird in das Diagramm integriert, um den Zusammenhang zwischen den Variablen deutlich zu machen und weitere Analysen, wie beispielsweise eine Trendextrapolation, zu ermöglichen. Diese Trendlinie basiert auf der Regressionsgleichung $Y = -9973,7 + 5,08 * X$, die den durchschnittlichen Verlauf der gravimetrischen Energiedichte über die Jahre beschreibt.

Zur Veranschaulichung wird das zuvor errechnete Beispiel herangezogen. In der **Abbildung** sind die Datenpunkte, welche die gravimetrische Energiedichte in Abhängigkeit vom Jahr darstellen, abgebildet. Die Trendlinie ergänzt diese Punkte und verdeutlicht, wie die gravimetrische Energiedichte im Zeitverlauf zunimmt. Dieses Beispiel zeigt, wie die Regressionsanalyse genutzt wird, um Trends zu identifizieren und die zeitliche Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte zu modellieren.



Beispielhafte Darstellung der grav. Energiedichte über die Jahre und dessen Trendlinie