

# Assessing the application-specific substitutability of lithium-ion battery cathode chemistries based on material criticality, performance, and price

## *Supplementary Material*

Steffen Kiemel<sup>a,\*</sup>, Simon Glöser-Chahoud<sup>b</sup>, Lara Waltersmann<sup>a</sup>, Maximilian Schutzbach<sup>a</sup>, Alexander Sauer<sup>a</sup>, Robert Mieke<sup>a</sup>

<sup>a</sup>: *Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, Nobelstraße 12, Stuttgart, Germany*

<sup>b</sup>: *Karlsruhe Institute of Technology; Institute for industrial Production IIP, Hertzstraße 16, Karlsruhe, Germany*

\*Address correspondence to: [steffen.kiemel@ipa.fraunhofer.de](mailto:steffen.kiemel@ipa.fraunhofer.de)

Additional information “criticality-category” .....	2
Additional information “performance-category” .....	4
Additional information “cost-category” .....	5
Questionnaires and Participants .....	6
References.....	8

Full article published in Journal Resources.

Manuscript available online: xy

### Additional information “criticality-category”

The denotations of most utilized indicators from the Social Hotspots Database changed throughout the years. Table 1 lists the indicators mentioned by Kolotzek et al. and compares them with the latest version and thus the indicators utilized in this article. Where sensible, specific indicators for the mining sector were selected. This applies to the indicators written in italic.

Table 2 lists the criticality scores for the three dimensions “supply risk”, environmental impact” and “social implications” for the seven assessed cathode chemistries. For the respective weightings and transformation rules of the individual utilized indicators, the reader is referred to the supplementary material of Kolotzek et al. [1]. Table 3 illustrates the values from Table 2 normalized on a scale from zero to the maximum value, whereas the latter equals one. The scores are color-coded on a scale from green (best value) to red (worst value).

Original indicators utilized by Kolotzek et al. [1] (data from [2])	Revised indicators utilized in this article (data from [2])
Risk of unemployment	Average of Unemployment Percentage at the country level
characterization of indigenous population	Percent of Population that is Indigenous
risk that country does not provide laws to protect indigenous	Number of laws to protect indigenous according to ILO
risk that indigenous people are negatively impacted	Overall risk of indigenous rights being infringed
risk of child labor	<i>Risk of child labor by sector (qualitative)</i>
risk of average wage being lower than non-poverty guideline	<i>Risk that Sector Avg Wage is below Sweatfree Wage</i>
risk of forced labor	Overall Forced Labor in Country
risk of not to enforce collective bargaining rights	Collective bargaining coverage
risk of not to enforce freedom of association rights	Overall risk of Freedom of Association
risk of not to enforce the right to strike	Freedom of Association Rights, Collective Bargaining Rights, Right to Strike - Qualitative
risk of fatal injuries	<i>Fatal injuries by sector</i>
risk of non-fatal injuries	<i>Non Fatal Work Related injuries by sector</i>
risk of excessive working time	Percent of Population working >X hrs per week, >6ND hrs per week

**Table S1.** Social Indicators

	NMC 111	NMC 532	NMC 622	NMC 811	NCA 3% Co	NCA 9% Co	LMO	LFP	LCO
<b>Supply Risk</b>	53.56	51.18	50.66	48.48	46.95	48.75	51.13	47.67	62.84
<b>Environmental Impact</b>	21.14	24.40	26.32	28.28	34.02	33.78	22.34	12.47	14.47
<b>Social Implications</b>	63.35	60.22	59.72	56.99	55.45	57.79	60.27	58.68	76.25

**Table S2.** Raw material criticality of LIB cathode chemistries

	Criticality Normalized [0/max]								
	NMC 111	NMC 532	NMC 622	NMC 811	NCA 3% Co	NCA 9% Co	LMO	LFP	LCO
<b>Supply Risk</b>	0.852	0.814	0.806	0.771	0.747	0.776	0.814	0.759	1.000
<b>Environmental Impact</b>	0.622	0.717	0.774	0.831	1.000	0.993	0.657	0.366	0.425
<b>Social Implications</b>	0.831	0.790	0.783	0.747	0.727	0.758	0.790	0.770	1.000

**Table S3.** Raw material criticality of LIB cathode chemistries, normalized on a scale from zero to the maximum value

### Additional information “performance-category”

For the application-specific performance assessment of LIB cathode chemistries, the main article refers to Full et al. and Zubi et al. Table 4 and Table 5 list the underlying data derived from the respective publications [3, 4]. Green highlighted values are adjusted based on the assumptions described in the main article. Table 6 lists the final performance score per cathode chemistry and field of application. The initially obtained values are normalized with the approach mentioned before. The same color-code is applied.

Indicator		NMC	NMC111	NMC532	NMC622	NMC811	NCA	NCA 3% Co	NCA 9% Co	LMO	LFP	LCO
Maturity	Degree of standardization	2	2	2	1.75	1.75	2	1.75	2	1.5	1.5	2
Durability	Lifespan	2	2	2	1.5	1.5	1.5	1	1.5	1.5	2	1
Safety	Stability	1.5	1.75	1.5	1.5	1.25	1.5	1	1.5	2	2	0.5
Power	Power density	2	2	2	2	2	1.5	1.5	1.5	2	2	1.5
Energy	Energy density	1.5	1	1.5	1.5	2	2	2	1.75	1	1	1.5

**Table S4.** Performance of cathode chemistries, based on [4]

		Original scoring, based on [3]						Transformed and normalized scoring				
Indicator		Traction batteries						Stationary energy storage systems				
		Traction batteries	Stationary energy storage systems	Consumer electronics	Power-/ garden tools	Domestic appliances		Traction batteries	Stationary energy storage systems	Consumer electronics	Power-/ garden tools	Domestic appliances
Maturity	Degree of standardization	1.5	0.9	0.9	1.2	1.1	-->	0.183	0.191	0.143	0.169	0.186
Durability	Lifespan	1.9	1.7	1.3	0.9	1.1	-->	0.232	0.362	0.206	0.127	0.186
Safety	Stability	2	1.6	1.7	1.8	1.6	-->	0.244	0.340	0.270	0.254	0.271
Power	Power density	1.1	0.2	0.8	1.9	1	-->	0.134	0.043	0.127	0.268	0.169
Energy	Energy density	1.7	0.3	1.6	1.3	1.1	-->	0.207	0.064	0.254	0.183	0.186

**Table S5.** Importance of technical criteria/indicator per field of application, based on [3]

	Performance [0/max]								
	NMC 111	NMC 532	NMC 622	NMC 811	NCA 3% Co	NCA 9% Co	LMO	LFP	LCO
<b>Traction batteries</b>	0.35	0.29	0.50	0.45	0.77	0.46	0.54	0.39	1.00
<b>Stationary energy storage systems</b>	0.16	0.22	0.47	0.52	0.83	0.42	0.37	0.17	1.00
<b>Consumer electronics</b>	0.40	0.33	0.50	0.43	0.72	0.46	0.53	0.41	1.00
<b>Power-/ garden tools</b>	0.34	0.30	0.44	0.40	0.76	0.50	0.45	0.37	1.00
<b>Domestic appliances</b>	0.33	0.30	0.48	0.45	0.76	0.47	0.48	0.36	1.00

**Table S6.** Weighted performance of cathode chemistries for selected fields of application, normalized on a scale from zero to the maximum value

### Additional information “cost-category”

The underlying information for the price category on a raw material level can be obtained from Table 7. The following Table 8 lists the aggregated results on the cathode-chemistry level. Table 9 transforms the obtained values to the introduced scaling from zero to the maximum value.

		Li	Ni	Mn	Co	Al	Fe	P
<b>Current Price (2019)</b>	Current Price [\$]	10,169 <sup>1</sup>	13,903 <sup>2</sup>	1,825 <sup>3</sup>	32,796 <sup>4</sup>	1,793 <sup>5</sup>	400 <sup>6</sup>	89 <sup>7</sup>
	Reference	[5]	[5]	[5]	[5]	[5]	[6]	[5]
<b>Average Price</b>	Average Price [\$] long term 1990-2015	3,703	12,748	958	36,642	1,852	52	46
	Average Price [\$] mid term 2000-2015	3,311	16,406	1,141	34,450	2,071	65	61
	Reference	Own calculations, based on [7]						
<b>Historic Volatility</b>	Volatility long term 1990-2015	0.260	0.303	0.264	0.332	0.170	0.140	0.233
	Volatility mid term 2000-2015	0.330	0.336	0.318	0.333	0.179	0.145	0.287
	Reference	Own calculations, based on [7]						

**Table S7.** Price information – raw material level

#### Names of utilized datasets:

- <sup>1</sup> Lithium-carbonate, min. 99.5 % Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, battery grade, spot price, ex works, domestic China
- <sup>2</sup> LME, primary, min. 99,8 %, cash, in LME warehouse
- <sup>3</sup> Electrolytic (EMM), >= 99,7 %, export (fob), domestic
- <sup>4</sup> LME, min. 99,8 %, cash, in LME warehouse
- <sup>5</sup> LME, high grade primary, cash, in LME warehouse
- <sup>6</sup> Pig Iron FOB Southern Brazil
- <sup>7</sup> Phosphate rock, fob North Africa

	NMC 111	NMC 532	NMC 622	NMC 811	NCA 3% Co	NCA 9% Co	LMO	LFP	LCO	LFP cathode
Current Price Commodity Perspective	15,544	13,650	14,731	14,121	14,058	15,914	2,325	604	30,295	6072
Average Price 1990-2015 Commodity Perspective	15,409	12,910	13,965	12,882	12,601	14,925	1,123	195	33,002	5539
Average Price 2000-2015 Commodity Perspective	15,860	14,162	15,528	15,280	15,485	17,271	1,271	192	31,009	6570
Price Volatility 1990-2015 Commodity Perspective	0.30	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.26	0.20	0.32	0.20
Price Volatility 2000-2015 Commodity Perspective	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32	0.24	0.33	0.24

**Table S8.** Price information – cathode chemistry level

	Price Normiert [0/max]									
	NMC 111	NMC 532	NMC 622	NMC 811	NCA 3% Co	NCA 9% Co	LMO	LFP	LCO	LFP cathode
Current Price Commodity Perspective	0.513	0.451	0.486	0.466	0.464	0.525	0.077	0.020	1.000	0.200
Average Price 1990-2015 Commodity Perspective	0.467	0.391	0.423	0.390	0.382	0.452	0.034	0.006	1.000	0.168
Average Price 2000-2015 Commodity Perspective	0.511	0.457	0.501	0.493	0.499	0.557	0.041	0.006	1.000	0.212
Price Volatility 1990-2015 Commodity Perspective	0.912	0.905	0.915	0.918	0.914	0.925	0.815	0.618	1.000	0.618
Price Volatility 2000-2015 Commodity Perspective	0.987	0.989	0.994	1.000	0.994	0.995	0.956	0.712	0.997	0.712

**Table S9.** Price of cathode chemistries, normalized on a scale from zero to the maximum value

## Questionnaires and Participants

For identifying the weightings of indicators from the categories “criticality of substitute” and “price of substitute” as well as the categories from the level “substitutability” a questionnaire was conducted (compare main article for further information). Fig\_\_\_ visualizes the utilized questionnaire for the pairwise comparisons. The survey was conducted in German. \_\_\_ lists the consulted experts as well as their respective affiliation.

Supplementary Material for 'Assessing the application-specific substitutability of lithium-ion battery cathode chemistries based on material criticality, performance, and price'

**Erläuterung**

Die beschriebenen Kategorien und Indikatoren sollen mit Hilfe der Methodik der paarweisen Vergleiche hinsichtlich ihrer Relevanz für die übergeordnete Ebene/Kategorie gewichtet werden. Bitte nutzen Sie die Schieberegler um Ihre Gewichtung einzutragen. Die Skala entspricht dabei der eines klassischen AHP-Prozesses und ist in nachfolgender Tabelle dargestellt. Dabei müssen Sie ausschließlich die linke Seite der Tabelle ("Wichtiger/Gleich") berücksichtigen, da jeweils die Frage "Welche Kategorie/Indikator ist wichtiger?" gestellt wird. Die Bedeutung Ihrer am Schieberegler eingestellten Bewertung ist als Fließtext unterhalb des Schiebereglers abzulesen. Sollten Sie Anmerkungen haben, nutzen Sie bitte das Kommentarfeld am rechten Rand des Fragebogens.

Bitte speichern Sie den ausgefüllten Fragebogen ab und schicken Sie ihn an [steffen.kiemel@ipa.fraunhofer.de](mailto:steffen.kiemel@ipa.fraunhofer.de)

Herzlichen Dank!

Kategorien/Indikatoren "a" vs. "b"			
Wichtiger/Gleich		Unwichtiger	
1	gleich wichtig		
3	etwas wichtiger	1/3	etwas unwichtiger
5	deutlich wichtiger	1/5	deutlich unwichtiger
7	viel wichtiger	1/7	viel unwichtiger
9	absolut dominierend	1/9	absolut untergeordnet
2,4,6,8	Zwischenwerte	1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Zwischenwerte

**Frage:** Wie sind die Kategorien der Ebene "Substituierbarkeit" gegeneinander zu gewichten? (vgl. Abbildung 2 - PDF Dokument)

Folgende Kategorien sollen gewichtet werden:

Performance des Substituts

Kritikalität des Substituts

Preis des Substituts

9 6 3 1 3 6 9

Grübelkoeffizient 1.00

Welche Kategorie ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Performance des Substituts ist gleich wichtig wie Faktor Kritikalität des Substituts

Grübelkoeffizient 1.00

Welche Kategorie ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Performance des Substituts ist gleich wichtig wie Faktor Preis des Substituts

Grübelkoeffizient 1.00

Welche Kategorie ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Kritikalität des Substituts ist gleich wichtig wie Faktor Preis des Substituts

**Frage:** Wie sind die Indikatoren der Kategorie "Kritikalität des Substituts" gegeneinander zu gewichten? (vgl. Abbildung 2 - PDF Dokument)

Folgende Indikatoren sollen gewichtet werden:

Versorgungsrisiko des Substituts

Ökologisches Risiko des Substituts

Soziales Risiko des Substituts

9 6 3 1 3 6 9

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Versorgungsrisiko des Substituts ist gleich wichtig wie Faktor Ökologischer Risiko des Substituts

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Versorgungsrisiko des Substituts ist gleich wichtig wie Faktor Sozialer Risiko des Substituts

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Ökologischer Risiko des Substituts ist gleich wichtig wie Faktor Sozialer Risiko des Substituts

**Frage:** Wie sind die Indikatoren der Kategorie "Preis des Substituts" gegeneinander zu gewichten? (vgl. Abbildung 2 - PDF Dokument)

Folgende Indikatoren sollen gewichtet werden:

Derzeitiger Rohstoffpreis

Ø Rohstoffpreis langfristig

Ø Rohstoffpreis mittelfristig

Volatilität Rohstoffpreis langfristig

Volatilität Rohstoffpreis mittelfristig

9 6 3 1 3 6 9

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Derzeitiger Rohstoffpreis ist gleich wichtig wie Faktor Ø Rohstoffpreis langfristig

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Derzeitiger Rohstoffpreis ist gleich wichtig wie Faktor Ø Rohstoffpreis mittelfristig

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Derzeitiger Rohstoffpreis ist gleich wichtig wie Faktor Volatilität Rohstoffpreis langfristig

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Derzeitiger Rohstoffpreis ist gleich wichtig wie Faktor Volatilität Rohstoffpreis mittelfristig

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Ø Rohstoffpreis langfristig ist gleich wichtig wie Faktor Ø Rohstoffpreis mittelfristig

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Ø Rohstoffpreis langfristig ist gleich wichtig wie Faktor Volatilität Rohstoffpreis langfristig

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Ø Rohstoffpreis langfristig ist gleich wichtig wie Faktor Volatilität Rohstoffpreis mittelfristig

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Ø Rohstoffpreis mittelfristig ist gleich wichtig wie Faktor Volatilität Rohstoffpreis langfristig

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Ø Rohstoffpreis mittelfristig ist gleich wichtig wie Faktor Volatilität Rohstoffpreis mittelfristig

Grübelkoeffizient 1.00

Vas ist wichtiger?

Grübelkoeffizient 1.00

Faktor Volatilität Rohstoffpreis langfristig ist gleich wichtig wie Faktor Volatilität Rohstoffpreis mittelfristig

Figure S1. Questionnaire for the AHP-process

Titel	Name	Institution
Dr. -Ing.	Lara Waltersmann	Fraunhofer IPA
	Johannes Full	Fraunhofer IPA
	Robert Miehe	Fraunhofer IPA
	Steffen Kiemel	Fraunhofer IPA
	Sonja Rosenberg	Karlsruher Institut für Technologie
	Sandra Huster	Karlsruher Institut für Technologie
Dr. -Ing.	Simon Glöser-Chahoud	Karlsruher Institut für Technologie
Dr. -Ing.	Gernot Kraberger	Samsung SDI
Dr. -Ing.	Klaus Steinmüller	THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien
Dr. -Ing.	Christoph Helbig	Universität Augsburg
	Lars Wietschel	Universität Augsburg
Dr. -Ing.	David Ensling	Varta Microbattery GmbH

**Table S10.** Consulted experts for the AHP-process

## References

- [1] Kolotzek, C., Helbig, C., Thorenz, A., Reller, A., and Tuma, A. 2018. A company-oriented model for the assessment of raw material supply risks, environmental impact and social implications. *Journal of Cleaner Production* 176, 566–580.  
DOI=10.1016/j.jclepro.2017.12.162.
- [2] New Earth / Social Hotspots Database project. 2021. *Social Hotspots Database*. <http://www.socialhotspot.org/>.
- [3] Full, J., Wanner, J., Kiemel, S., Miehe, R., Weeber, M., and Sauer, A. 2020. Comparing Technical Criteria of Various Lithium-Ion Battery Cell Formats for Deriving Respective Market Potentials. In *2020 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC)*. IEEE, 1–6. DOI=10.1109/EPEC48502.2020.9320122.



- [4] Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., and Pasaoglu, G. 2018. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89, 292–308. DOI=10.1016/j.rser.2018.03.002.
- [5] DERA and BGR. 2019. *Preismonitor. Dezember 2019*. Deutsche Rohstoffagentur; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Produkte/Preisliste/pm\\_19\\_12.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/Preisliste/pm_19_12.pdf?__blob=publicationFile&v=5).
- [6] Shulga, M. 2018. *US Pig Iron: Prices go down on weakening scrap market*. <https://www.metalbulletin.com/Article/3825289/US-PIG-IRON-Prices-go-down-on-weakening-scrap-market.html>.
- [7] Kelly, T. D., Matos, G. R., Buckingham, D. A., DiFrancesco, C. A., and Porter, K. E. 2017/2018. *Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States*. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/historical-statistics-mineral-and-material-commodities-united-states>.