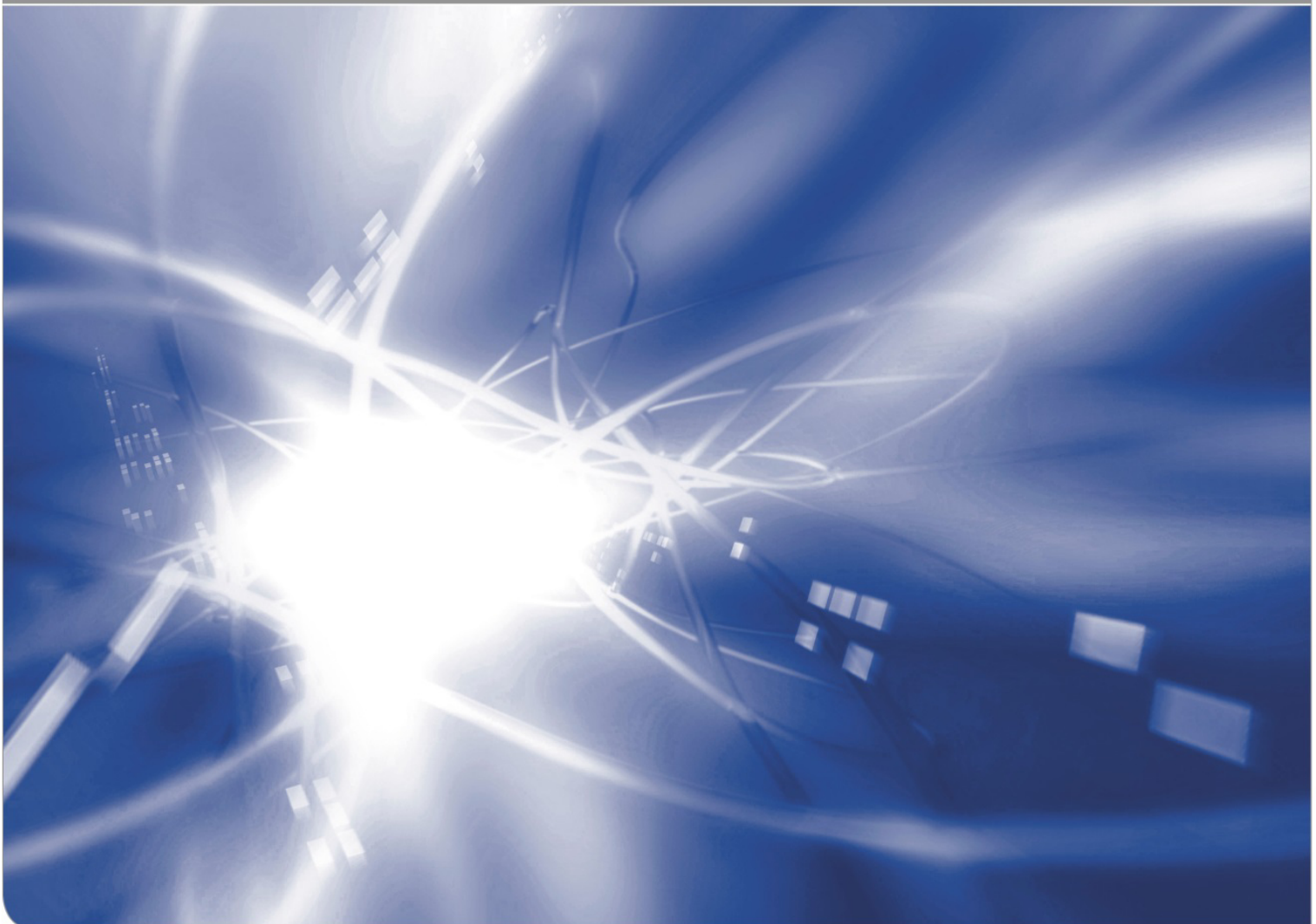


# **Methode zur anwendungsspezifischen Konzeptdefinition eines Batteriesystems unter Verwendung formatflexibel produzierter Pouch-Zellen**

Philip Müller-Welt, Konstantin Nowoseltschenko,  
Katharina Bause, Albert Albers

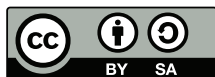
KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 182



Institut für Produktentwicklung  
Kaiserstr. 10  
76131 Karlsruhe  
[www.ipek.kit.edu](http://www.ipek.kit.edu)

### Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
[www.kit.edu](http://www.kit.edu)



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung –  
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

2022

ISSN: 2194-1629

# Methode zur anwendungsspezifischen Konzeptdefinition eines Batteriesystems unter Verwendung formatflexibel produzierter Pouch-Zellen

*Philip Müller-Welt<sup>1</sup>, Konstantin Nowoseltschenko<sup>1</sup>, Katharina Bause<sup>1</sup>, Albert Albers<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

## Abstract

---

Der für ein Batteriesystem zur Verfügung stehende Bauraum ist meist ein limitierender Faktor für die umsetzbare Kapazität und Leistung eines Batteriesystems. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Standardformen kann der Bauraum selten ausgenutzt werden. Eine Batteriezelle, die in variablen Größen und Formaten hergestellt wird, kann von Vorteil sein, da sie so besser an einen individuellen Bauraum angepasst werden kann. Diese Formatflexibilität erfordert jedoch ein ebenso skalierbares Produktionssystem für die Batteriezellenfertigung. Diese produktionssystemseitige Flexibilität hinsichtlich des Formats, Materials und der Stückzahl stellt den Schlüssel dar, um Freiheitsgrade in der Produktentwicklung von Batteriesystemen zu bieten: Beispielsweise ist es dadurch möglich individuell angepasste Zellen für unterschiedliche Anwendungsfelder wie beispielsweise Kraftfahrzeuge oder Powertools zu produzieren. Batteriemodelle oder -systeme können völlig neu gestaltet werden, was durch ebendiese neuen Gestaltungsmöglichkeiten und Wechselwirkungen mit den anderen Subsystemen neben den Zellen führt – wie zum Beispiel Temperierkonzept oder sicherheitsrelevanter Komponenten. Diese Flexibilität führt somit zu einer Vergrößerung des Lösungsraumes und der Lösungsvielfalt, so dass die Synthese des Batteriesystems unter Berücksichtigung unterschiedlicher, funktionsrelevanter Randbedingungen durch die Entwicklung einer Methode unterstützt wird. Im vorliegenden Beitrag stellen die Autoren daher eine Methode vor, die die Generierung anwendungsspezifischer Konzepte eines Batteriesystems mit formatflexibel produzierten Zellen unterstützt. Dazu wird ein Baukasten entwickelt, der funktionsrelevante Bausteine eines Batteriesystems beinhaltet und durch ein Baukasten-Regelwerk eine Konzeptvorauswahl ermöglicht. Dabei werden sowohl Wechselwirkungen zwischen den Bausteinen als auch anwendungsspezifische Anforderungen berücksichtigt.

## 1 Motivation und Zielsetzung

---

In den letzten Jahren haben Elektrofahrzeuge als potenzielle Lösung für wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Herausforderungen im Bereich der individuellen Mobilität an Bedeutung gewonnen. Derzeit sind batterieelektrische Fahrzeuge in ihrer Energie- und Leistungsdichte eingeschränkt, da der verfügbare Platz für das Batteriesystem begrenzt ist, respektive nicht ausgenutzt werden kann. Mitunter ein Grund dafür ist die Entwicklung auf vorhandenen Fahrzeugplattformen für die im Sinne des Conversion Designs zentrale Bauräume für das Batteriesystem vorgesehen sind. Eine Batteriezelle, die in variablen Größen und Formaten hergestellt wird, kann den Vorteil haben, dass sie an bestehende Bauräume angepasst werden kann oder dadurch weiterer Bauraum nutzbar gemacht wird. Auf heutigen Produktionsanlagen für Batteriezellen ist es allerdings nicht möglich, auf derselben Produktionslinie verschiedene Formate, Materialien oder gar Stückzahlen zu fertigen. Zur Umsetzung dieser Produktidee ist ein neuartiges Produktionssystem notwendig, das sowohl im individuellen Design der Zelle Flexibilität bietet als auch modular skalierbar ist. Durch ein solches Produktionssystem

entsteht die Möglichkeit einer Produktion von Zellen für verschiedene Anwendungsfeldern auf nur einer Produktionslinie, die modular angepasst und skaliert werden kann. Gleichzeitig eröffnen sich dadurch neue Potentiale in der Entwicklung dieser Produkte, die bisher mit Standardformaten noch nicht umsetzbar waren.

Zur Nutzbarmachung dieser Potenziale ist dabei eine gemeinsame Betrachtung und Entwicklung des Produkts und dessen Produktionssystems notwendig. Unter anderem ist für die Entwicklung von Produkten, die die Vorteile einer formatflexibel produzierten Zelle nutzen, zusätzlich eine übergreifende Betrachtung aller neuen Freiheitsgrade seitens der Gestaltung einzelner Komponenten als auch deren Wechselwirkungen von Vorteil [1]. Dies erfordert somit neue Methoden, die die Entwicklung den Umgang mit der durch die Flexibilität steigenden Komplexität unterstützen. Die Autoren streben an, eine Methode zur Synthese und Optimierung, auf Basis der Vielzahl an potentiellen Konzepten eines Batteriesystems und der sich durch die Formatflexibilität ergebenden Wechselwirkungen, zu entwickeln.

## 2 Stand der Forschung

---

Im aktuellen Entwicklungsprozess von Batteriesystemen steht zu Anfang die Frage der Wahl des für den Anwendungsfall richtigen Zelltyps. Für eine Vielzahl an Anwendungsfeldern stellen Lithium-Ionen-Batterien den Stand der Technik dar. Gängige Formate sind dabei zylindrische, prismatische und Pouch-Zellen. Welches Zellformat am besten geeignet ist, wird aktuell noch diskutiert. Letztlich folgt nach Wahl des Zelltyps die weitere Auslegung einzelner Module und anschließend des gesamten Batteriesystems [2]. Im Regelfall werden dabei einheitliche Zelltypen sowie Modulgrößen verwendet. Dies hat mitunter den Vorteil, dass durch Gleichteile Stückzahlen erhöht werden können. Ebenfalls resultiert dies in einer geringen Anzahl an in Frage kommenden Temperierkonzepten bzw. Anordnungs- und Verschaltungsmöglichkeiten. Die Entwicklung von Batteriesystem berücksichtigt nur selten einen flexiblen und vor allem anwendungsübergreifenden Ansatz. Beispiele für eine Auswahl eines Zelltyps und anschließender flexiblen Anordnung der Module stellen WAGNER [3] und FRANK [4] vor.

Zur Standardisierung von Produkten und deren Teilsystemen ist die Entwicklung und Anwendung von Baukastensystemen ein gängiger Ansatz. Die Teilsysteme eines Produkts können, unabhängig vom betrachteten System, entweder nach der Modul-, der Plattform- oder der Baureihen-Bauweise entworfen werden. Somit ist es möglich, auf verschiedenen Systemebenen eines Produkts auf jede beliebige Kombination der genannten Entwurfsarten zu stoßen. Diese Eigenschaft kann im Sinne von ALBERS [5] als fraktaler Charakter der Entwurfsarten bezeichnet werden. Unter anderem betrachtet BURSAC [6] diesen fraktalen Charakter im Entwurf von Systemen im Kontext der Baukastenentwicklung durch Unterstützung des Model Based Systems Engineering (MBSE) Ansatzes. In diesem Kontext wurde der Mehrwert des MBSE-Ansatzes zur Entwicklung von Baukästen für technische Systeme gezeigt, aber auch die steigende Komplexität in der Entwicklung von Baukästen durch die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Produkte aufgezeigt.

Eine Herausforderung in der Produkt- und Produktionstechnik besteht darin, dass die Kosten über den gesamten Lebenszyklus des Produktes und des Produktionssystems frühzeitig im Entwicklungsprozess festgelegt werden [7]. Kundenspezifische, individuelle Produkte führen zu einer hohen Produktvarianz und kürzeren Produktlebenszyklen, wodurch Entwicklungsprozesse vermehrt durchlaufen werden und eine gemeinsame Betrachtung von Produkt und Produktionssystems erforderlich wird. So beschreibt beispielsweise die VDI 2206 [8] die Notwendigkeit einer integrierten Betrachtung von Produkt- und

Produktionssystementwicklung. Dieser Ansatz zeigt, wie Produkte und Produktionssysteme entwickelt werden können, wobei Anforderungen und Randbedingungen des Produktionssystems bei der Entwicklung neuer Produkte berücksichtigt werden.

Derzeit bietet der Stand der Forschung keine Ansätze, die die Potentiale einer formatflexibel produzierten Pouch-Zelle, unter Berücksichtigung möglicher Flexibilität und Restriktion des Produktionssystems, zur Optimierung eines Batteriesystems nutzen. Zusätzlich stellt unter diesem Aspekt eine ganzheitliche Betrachtung der unterschiedlichen Auslegungsaspekte eines Batteriesystems unter Berücksichtigung von funktionsrelevanten Wechselwirkungen und Restriktionen einen neuen Ansatz dar. Eine Methode, in dem eine freie Auswahl und flexible Dimensionierung verschiedener Teilsysteme für verschiedene Anwendungsfelder möglich ist, existiert aktuell im Stand der Forschung nicht. Ein solche Methode bietet den Vorteil das Potential einer flexiblen Auslegung der Zellen sowie Teilsysteme des Batteriesystems darzustellen und zu nutzen.

### 3 Erhöhte Lösungsvielfalt und Komplexität durch Verwendung von formatflexibel produzierten Pouch-Zellen für verschiedene Anwendungsfelder

Im Rahmen des vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg geförderten Projektes „AgiloBat“ ist eine integrierte Entwicklung von Batteriesystemen und Produktion von Pouch-Zellen in verschiedenen Formaten, Materialien und Stückzahlen angestrebt, um dadurch Anforderungen eines Produkts im Vergleich zu aktuellen Batteriesystemen mit Standardformaten besser erfüllen zu können. Beispielsweise können eine höhere Kapazität und installierte Leistung durch eine bessere Nutzung eines vorhandenen Bauraums erreicht werden. Ziel ist es dabei, sowohl mehrere Anwendungsfelder als auch verschiedene Anforderungen betrachten zu können. Dabei werden verschiedene Freiheitsgrade betrachtet, die von der Auswahl einzelner Komponenten bis zur Formgebung von beispielsweise der Zellgeometrie oder der Kühlplattengeometrie reichen können.

Ziel der Forschung des Projektes „AgiloBat“ ist die domänenübergreifende Optimierung des Batteriesystems durch Nutzung formatflexibel produzierter Pouch-Zellen. Das dabei verfolgte Ziel ist die Entwicklung von Methoden und Tools die für diverse Anwendungsfelder und deren assoziierten Anforderungen einsetzbar sind und den Entwickler bei der Auslegung des Batteriesystems unterstützen. Eine schematische Darstellung des verfolgten Ansatzes ist in Abbildung 1 zu sehen.

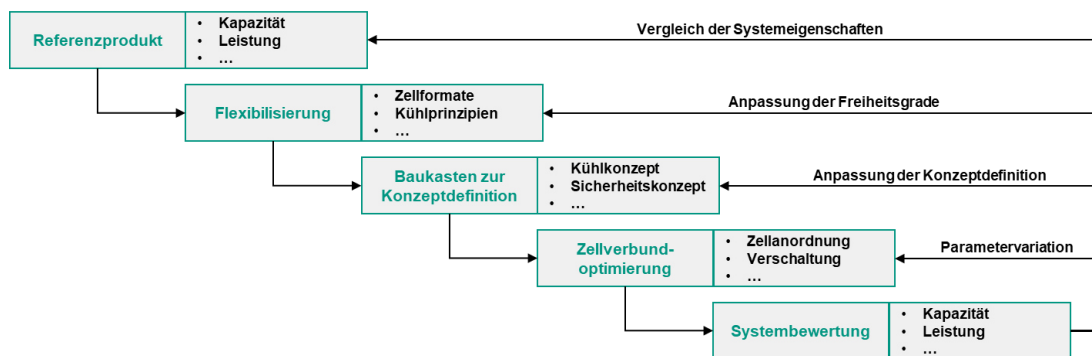


Abbildung 1: Ansatz zur Batteriesystementwicklung

Die grundsätzliche Vorgehensweise besteht dabei aus mehreren Aspekten. Den Ausgangspunkt stellt ein Referenzprodukt, für das ein neues Batteriesystem entwickelt werden soll dar. Für dieses ergeben sich grundsätzliche Anforderungen, wie der für das Batteriesystem zur Verfügung stehende Bauraum, die Systemspannung oder bspw. Vorgaben hinsichtlich der Sicherheit. Für die Neugestaltung des Batteriesystems im Rahmen von „AgiloBat“ werden diverse Freiheitsgrade, die durch das flexible Zellformat aber auch andere Systemkomponenten erreicht werden können definiert. Zum Umgang mit der sich dadurch ergebenden Lösungsvielfalt ist der Einsatz eines Baukastens zur anwendungsspezifischen Konzeptdefinition vorgesehen. Worauf aufbauend eine gezielte Optimierung und Auslegung der mechanischen, thermischen und elektrischen Aspekte des Zellverbunds erfolgt. Letztlich können die sich durch dieses Vorgehen ergebenden Systemeigenschaften mit denen des Referenzprodukts verglichen werden, um die Verbesserung der Systemeigenschaften evaluieren zu können.

Im Folgenden soll der im Rahmen des Projektes verfolgte Flexibilisierungsansatz genauer beschrieben werden.

Beginnend mit der Auswahl der zu verwendenden Zellen entstehen erste Freiheitsgrade, die berücksichtigt werden sollen. Zum einen soll die Geometrie und die Dicke der Zelle flexibel gestaltet werden können. Dabei sind beispielsweise rechteckige, dreieckige oder trapezförmige Zellen denkbar. Des Weiteren ist dabei die Position der Stromableiter der Zellen zu definieren, die zum einen auf derselben Seite der Zelle oder auf gegenüberliegenden Seiten liegen können. Zusätzlich sollen die auf dem Produktionssystem zu produzierenden Zellen in ihren elektrischen Eigenschaften unterschiedlich festlegbar sein, um sowohl Anforderungen hoher Kapazität als auch hoher Leistung bedienen zu können. Die dabei wesentlich zu beeinflussenden Parameter stellen die Porosität und die Schichtdicke der Aktivmaterialschichten dar. Durch Variation dieser können unterschiedliche elektrische Eigenschaften erreicht werden. Somit können zusätzlich verschiedene Zelltypen definiert werden, die zusätzlich zur geometrischen Variation der Zelle einen Freiheitsgrad darstellen.

Zusätzlich zur Zelldefinition stellt die Anordnung und Verschaltung der Zellen zu einem Zellverbund einen wichtigen Faktor dar. Zum einen ist der zur Verfügung stehende Bauraum bestmöglich auszunutzen um sowohl den Energieinhalt als auch die potentielle Leistungsfähigkeit des Batteriesystems zu erhöhen. Dabei ist sowohl eine Modularisierung der Zellen als auch eine freie Anordnung denkbar. Insbesondere die Wechselwirkung der Zell- und Modulform mit dem potentiell notwendigen Temperiersystem muss bereits während der Anordnung der Zellen berücksichtigt werden. Für die sich jeweils ergebenden möglichen Zellanordnungen ist zusätzlich eine Betrachtung der Verschaltungsmöglichkeiten notwendig. Dabei können die Verschaltungsmöglichkeiten in unterschiedliche Parallel- und Reihenschaltungen der Zellen in Frage kommen. Diese sind zum einen räumlich als auch elektrothermisch zu bewerten, da sich durch die unterschiedlichen Zellformate Unterschiede in den Zelleigenschaften ergeben können, wodurch sich unterschiedliche State of Charge und Temperaturentwicklungen für die Verschaltungsmöglichkeiten ergeben.

Seitens der Definition eines Temperierkonzeptes bestehen weiterhin unterschiedliche Optionen die jeweils individuell für das entsprechende Anwendungsszenario und gegebene Anforderungen gewählt werden müssen. Die reichen von der ersten Auswahl des grundsätzlichen Funktionsprinzips über die Definition des Kühlorts bis zur geometrischen Festlegung der potentiellen Kühlplatten und Kanäle. Hierbei ist insbesondere der hierarchische Charakter des Gesamtkonzepts und somit die Auswahlreihenfolge zu beachten, da sich gewisse Prinzipien ggf. gegenseitig ausschließen. Beispielsweise ist der Einsatz von Kühlplatten bei einer Umsetzung mittels Luftkühlung nur bedingt sinnvoll. Zusätzlich sind ebenfalls Abhängigkeiten die sich durch die flexible Definition der Zellen und

Anordnungen ergeben zu beachten. Eine Abhängigkeit stellt dabei die Wahl des Kühlorts dar, welche im direkten Zusammenhang mit der Wahl der elektrischen Verbindung der Zellen sowie z. B. der Ableiterposition steht.

Abschließend stellen sicherheitsrelevante Komponenten sowie das Batterie Management System (BMS) Teilsysteme des Batteriesystems dar, die in für den Anwendungsfall angepasster Konfiguration umgesetzt werden können. Thermische Barrieren können zum Einsatz kommen und in mehreren Ausführungen vorliegen und stehen im Wechselspiel mit dem Kühlkonzept. Beispielsweise ist eine thermische Trennung zweier Zellen über Barrieren nicht sinnvoll, wenn eine Kühlung dieser Zellen an der Zellfläche bevorzugt wird. Ebenso ist eine gemeinsame Betrachtung der Funktionen des BMS mit der elektrischen Topologie der Batteriesystems erforderlich. Mitunter kann eine aktive Schaltung einzelner Stränge je nach Topologie erforderlich sein oder nicht. Zusätzlich stellt sich die Möglichkeit einer Temperaturüberwachung einzelner Zellen, der Module oder keiner Überwachung.

Eine schematische Darstellung des formatflexiblen Ansatzes der Zellen und letztlich Konfiguration der Module und Systemanordnung ist beispielhaft in Abbildung 2 zu sehen.

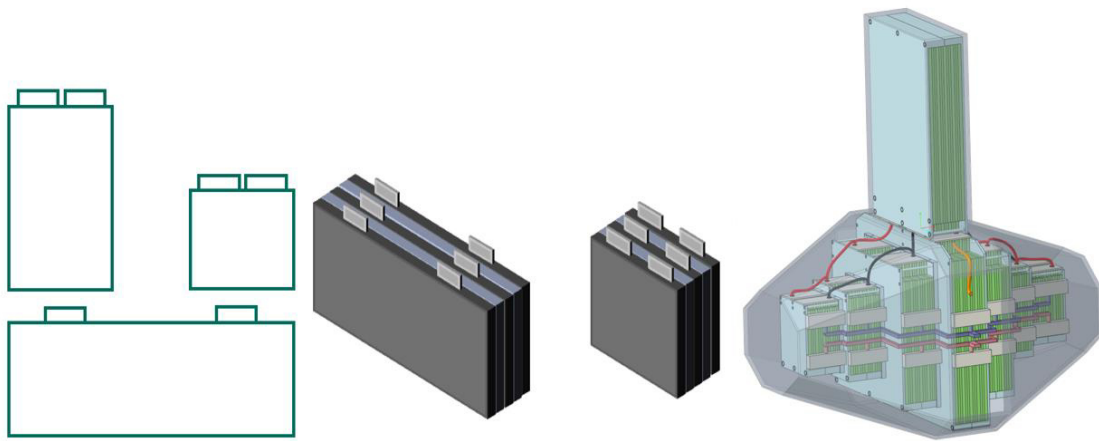


Abbildung 2: Schematische Darstellung des formatflexiblen Ansatzes

Für eine Auslegung des Batteriesystems mit dem Ansatz einer flexiblen Zelldefinition ergeben sich somit diverse Freiheitsgrade und Wechselwirkungen, die im bisherigen Entwicklungsprozess eines Batteriesystems nicht berücksichtigt werden mussten. Um das volle Potential dieses Ansatzes nutzen zu können, ist eine ganzheitliche Betrachtung aller Aspekte notwendig um aus dem entstehenden Lösungsraum eine optimierte Lösung finden zu können. Um dies zu ermöglichen, müssen zum einen die potentiell in Frage kommenden Lösungsprinzipien als auch deren Wechselwirkungen bekannt sein. Aufgrund der sich durch den flexiblen Ansatz ergebenden Freiheitsgrade in der Entwicklung des Batteriesystems ist eine Unterstützung des Entwicklers durch eine Methode zur Auswahl geeigneter Lösungskonzepte erforderlich.

## 4 Baukastenentwicklung zum Umgang mit der Lösungsvielfalt und Komplexität

Die sich durch den in „AgiloBat“ verfolgten Ansatz ergebende große Lösungsvielfalt und diverse zu beachtenden Wechselwirkungen stellen eine große Herausforderung dar. Zur Handhabung dieser Komplexität ist eine Methode notwendig, die den Entwickler bei der Konzeptdefinition unterstützt. Eine gängige Herangehensweise ist dafür die Nutzung eines Baukastens zur Generierung alternativer Produktlösungen. BURSAC [6] definiert einen Baukasten für die Entwicklung technischer Systeme wie folgt:

*Ein Baukasten ist die Menge aller technischen Subsysteme, die dem zugehörigen Baukasten-Regelwerk folgen, mit dem Ziel, aus diesen Subsystemen technische Systeme mit jeweils unterschiedlicher Menge aller Funktionen konfigurieren zu können.*

Eine schematische Darstellung eines Baukastens sowie eines daraus abgeleiteten Produktes ist in Abbildung 3 zu sehen.

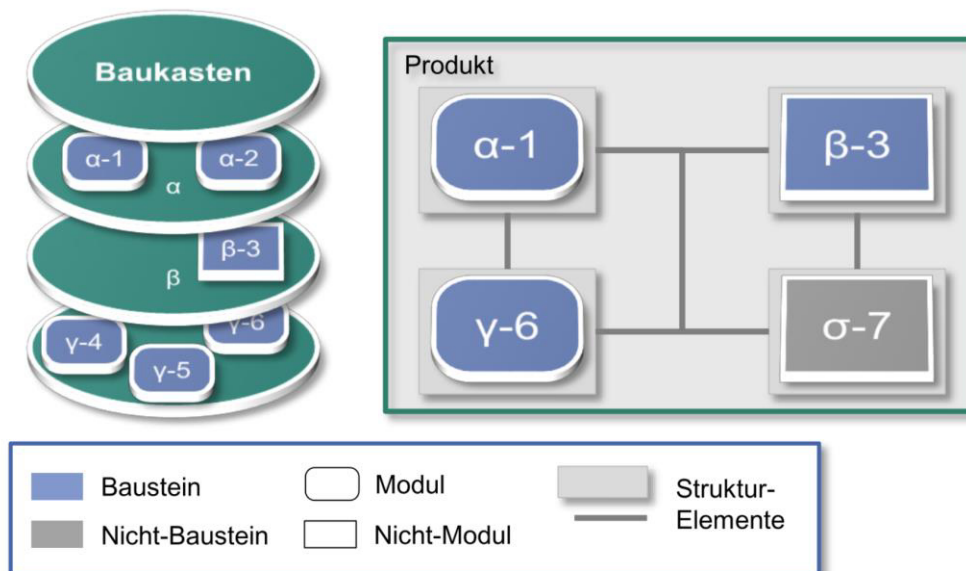


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Baukastens und eines auf dem Baukasten basierenden Produkts [6]

Hierbei wird ein Baukasten nicht als ein vollständiges Produkt verstanden, sondern als ein abstraktes Gebilde, welches die Bausteine beinhaltet, aus welchen technische Systeme letztendlich konfiguriert werden können. Das zu entwickelnde System kann dabei aus mehreren Subsystemen bestehen, welche wiederum aus Subsystemen bestehen können [7], [9]. Das Baukasten-Regelwerk beschreibt die Produktarchitektur (bestehend aus einer Wirkstruktur und Baustuktur) der einzelnen Subsysteme mit dem Ziel, die Kompatibilität der Subsysteme zu gewährleisten. Besonders wichtig ist dabei die Beachtung der Schnittstellen und Wechselwirkungen der Bausteine. Somit beinhaltet die Entwicklung eines Baukastens die Entwicklung der einzelnen Subsysteme des Baukastens als auch die Definition des Baukasten-Regelwerks. Zur Konfiguration eines Produktes können schließlich einzelne Bausteine des Baukastens ausgewählt und kombiniert werden. Diese stellen noch nicht die gesamte



Produktarchitektur dar, sondern können zusätzlich durch Nicht-Bausteine, die weitere Komponenten darstellen ergänzt und durch Strukturelemente kombiniert werden.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte zur Entwicklung des Baukastens für ein Batteriesystem mit formatflexiblen Zellen und alternativen weiteren Teilsystemen beschrieben. Diese sind in Abbildung 4 dargestellt.

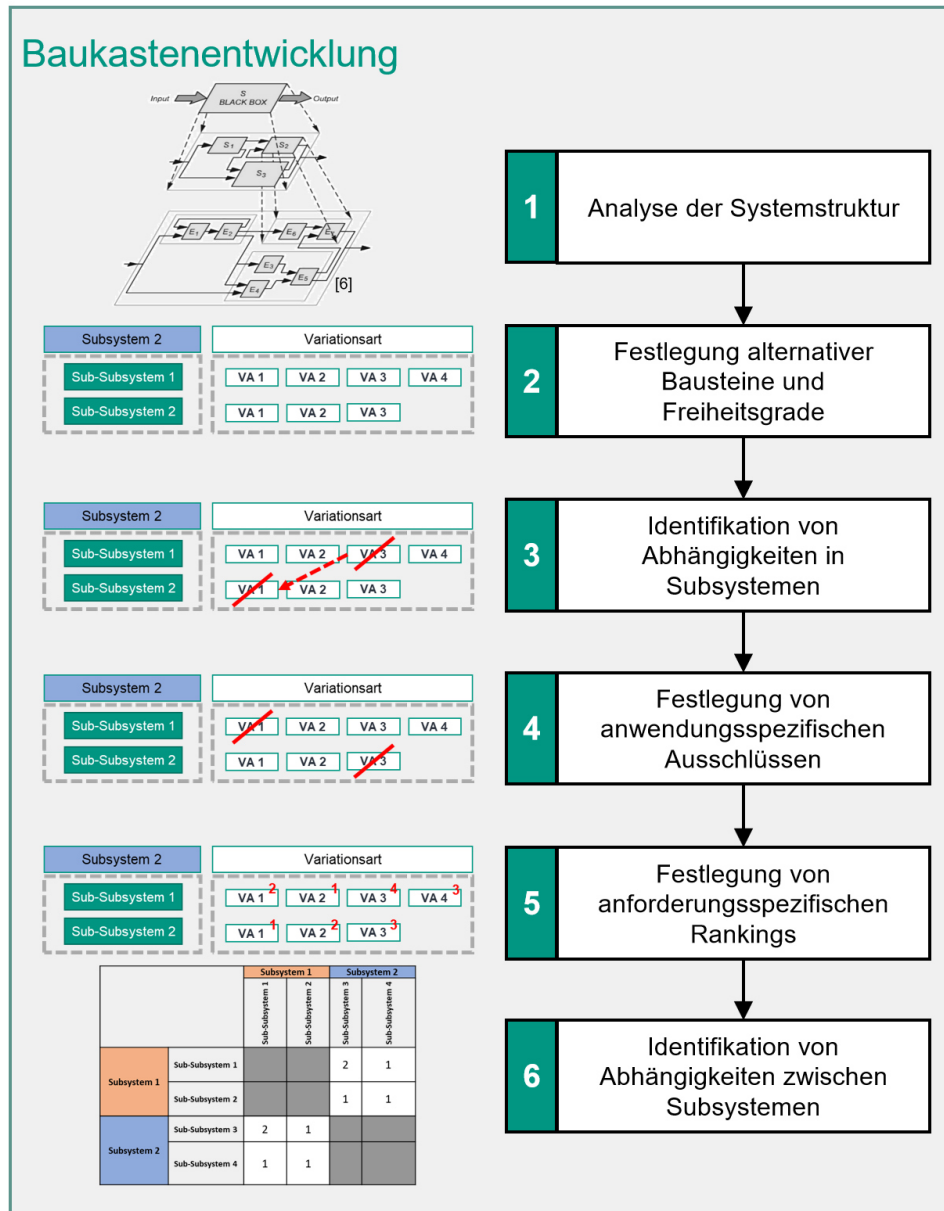


Abbildung 4: Ablauf der Baukastenentwicklung zur flexiblen Konzeptdefinition eines Batteriesystems

Den ersten Schritt stellt die Erstellung der Baukastenstruktur und die Definition der einzelnen Bausteine sowie die Identifikation deren Abhängigkeiten innerhalb eines Teilsystems dar. Anschließend werden sich durch die unterschiedlichen Anwendungsszenarien und Anforderungen ergebende Ausschlüsse von Bausteinen in das Baukasten-Regelwerk aufgenommen. Schließlich werden alle Abhängigkeiten und ggf. Ausschlüsse zwischen den Bausteinen unterschiedlicher Teilsysteme durch eine paarweise Betrachtung identifiziert.

## 4.1 Analyse der Systemstruktur und Definition alternativer Lösungsprinzipien

Um die Systemstruktur sowie potentielle Lösungsprinzipien zu identifizieren, werden Referenzprodukte unterschiedlicher Anwendungsfelder analysiert. Zusätzlich werden Bausteine, die sich durch die Flexibilisierung gewisser Produkteigenschaften ergeben, ergänzt. Ein Batteriesystem besteht aus verschiedenen Systemebenen die im ersten Schritt der Vorgehensweise identifiziert werden. Anhand dieser Produktstruktur wird ebenso die Baukastenstruktur definiert und aufgebaut. Die oberste Systemebene stellt dabei das Batteriesystem selbst dar. Diese ist in vier Subsysteme unterteilt, welche jeweils wieder in Subsysteme unterteilt werden. In dieser Systemebene werden schließlich im zweiten Schritt die einzelnen Bausteine die als Varianten zur Produktkonfiguration im Baukasten vorliegen sollen erfasst. Eine für das Temperiersystem beispielhafte Darstellung ist in Abbildung 5 gegeben.

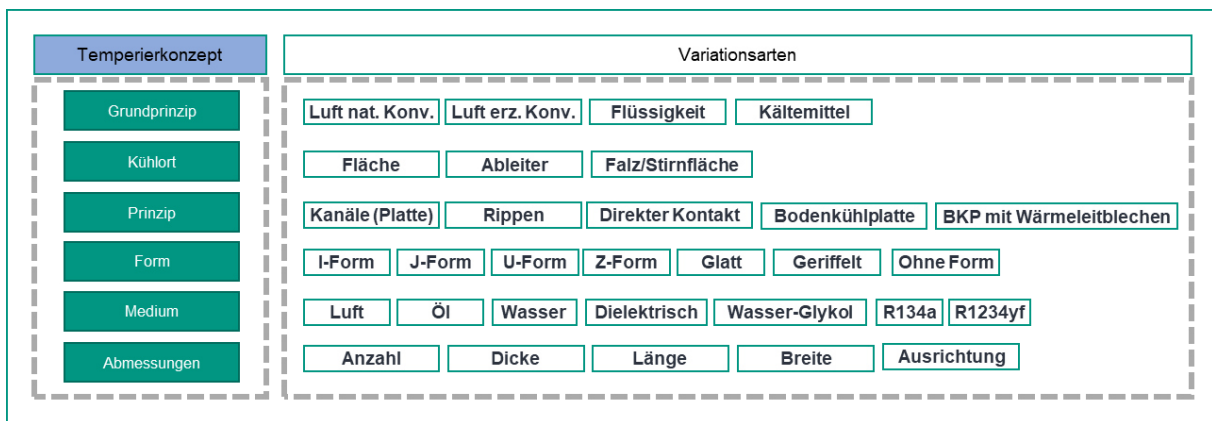


Abbildung 5: Definierte Varianten des Baukastens am Beispiel der Temperierkonzept-Bausteine

Die für das Temperierkonzept erfassten Lösungsprinzipien umschließen dabei Varianten in der prinzipiellen Umsetzung, die Wahl des Kühlortes an der Zelle, die Umsetzung der Leitung des Kühlmediums sowie deren geometrische Umsetzung und die Auswahl des Kühlmediums selbst. Innerhalb dieser Kategorien stellen die Lösungsprinzipien jeweils alternative Varianten dar. Die für die Entwicklung des Baukastens weiterhin als relevant identifizierten Subsysteme sind Sicherheitsbauteile, Bauteile, die den elektrischen Aufbau und die Zellauswahl betreffen sowie das Batterimanagementsystem. Analog zu dem in Abbildung 5 zu sehendem Beispiel wurden somit zusätzlich für diese drei Hauptkategorien jeweils Unterkategorien und deren jeweiligen Bausteine definiert.

Das zur Nutzung des Baukastens erforderliche Baukasten-Regelwerk beinhaltet mehrere Aspekte die sowohl die Reihenfolge in der Auswahl der Bausteine, deren gegenseitigen Abhängigkeiten sowie Auswahlbedingungen bezüglich des betrachteten Anwendungsszenarios und präferierter Anforderungen betreffen. Zunächst werden die vier Hauptkategorien dazu jeweils einzeln betrachtet. Zu definieren ist dabei die Reihenfolge in der eine Auswahl in den Unterkategorien erfolgen kann. Beispielsweise ist eine Auswahl des Grundprinzips vor der Auswahl eines Mediums erforderlich. Dabei ergeben sich ggf. bereits Ausschlüsse einzelner Kühlorte und Medien, die mit dem definierten Grundprinzip nicht kompatibel sind. Das Baukastenregelwerk sieht dafür eine schrittweise Auswahl eines Bausteins in den Kategorien von oben nach unten vor.

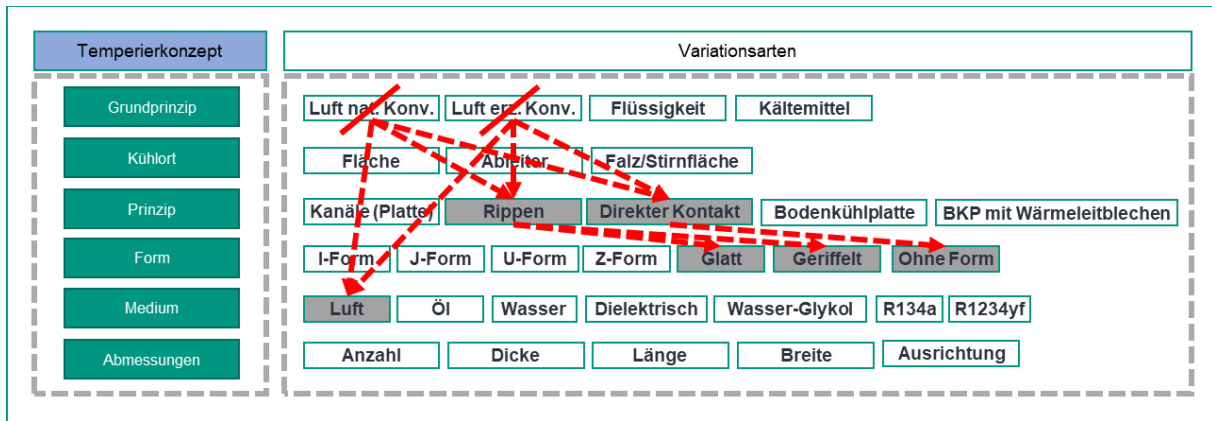


Abbildung 6: Definition von Abhängigkeiten zwischen den Bausteinen

Entsprechend der Auswahl des Bausteins der obersten Kategorie werden in den darunterliegenden Kategorien Ausschlüsse getroffen. Beispielsweise kann wie oben zu sehen der Ausschluss einer Luftkühlung den Einsatz von Kühlrippen ausschließen. Ein analoges Vorgehen erfolgt bei Auswahl eines Bausteins in weiter unten liegenden Kategorien. Dieser Teil des Regelwerks kann somit genutzt werden, um sich durch Auswahl einzelner Bausteine ergebende Ausschlüsse in einem Subsystem zu berücksichtigen.

## 4.2 Anwendungs- und Anforderungsspezifische Auswahl von Lösungsprinzipien

Für eine anwendungsspezifische Konzeptdefinition kann eine Eingrenzung der Anzahl an in Frage kommenden Kombinationsmöglichkeiten hilfreich sein. Daher sieht ein weiterer Schritt des Baukasten-Regelwerks eine Vorauswahl anhand eines definierten Anwendungsszenarios vor. Für die Auswahl ist eine Bewertung aller Bausteine des Baukastens hinsichtlich ihrer Eignung für das Anwendungsszenario erforderlich. Dabei sind Ausschlüsse die sich aufgrund ihrer technischen oder ökonomischen Umsetzbarkeit für die Anwendung ergeben zu definieren.

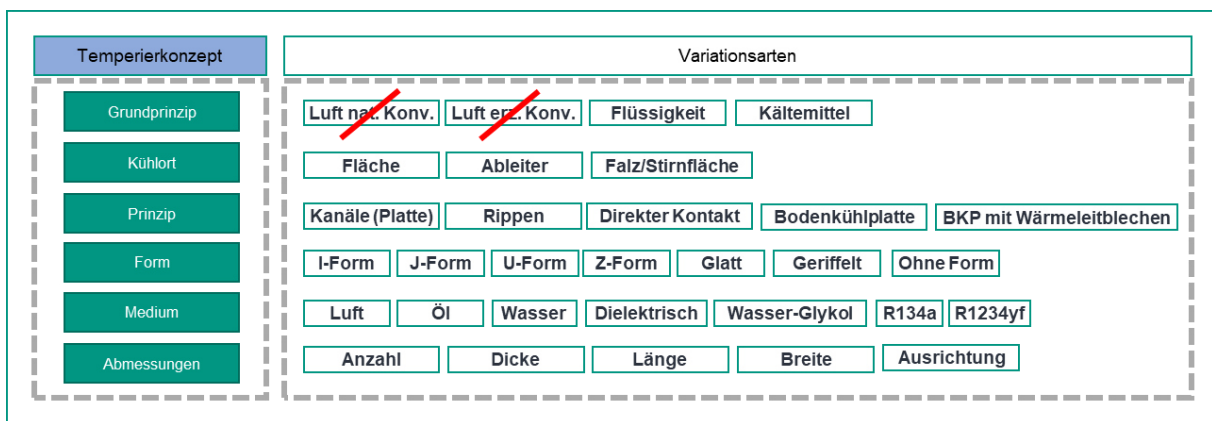


Abbildung 7: Beispielhafter Ausschluss von Bausteinen anhand des Anwendungsszenarios Plug-In-Hybridfahrzeug

Beispielsweise kann eine Luftkühlung im Falle eines Plug-In-Hybridfahrzeugs ggf. prinzipiell ausgeschlossen werden. Dennoch ist dabei darauf zu achten, die Lösungsvielfalt nicht zu sehr einzuschränken, da sonst das mögliche Potential der formatflexiblen Entwicklung nicht voll genutzt werden kann. Die sich dabei ergebende Vorauswahl ist beispielhaft in Abbildung 7 zu sehen. Im Falle der Auswahl des Anwendungsszenarios eines Plug-In-Hybridfahrzeugs entfallen somit eine Luftkühlung

durch natürliche oder erzwungene Konvektion, als Grundprinzipien des Temperierkonzepts, als auswählbare Bausteine des Baukastens.

Im letzten Schritt ist zusätzlich eine Vorauswahl anhand von präferierten Anforderungen möglich. Für diese ist ebenfalls eine Bewertung der Bausteine bezüglich ihrer Eignung hinsichtlich der Anforderungen wie Leistung, Kosten, Sicherheit oder Bauraum notwendig.

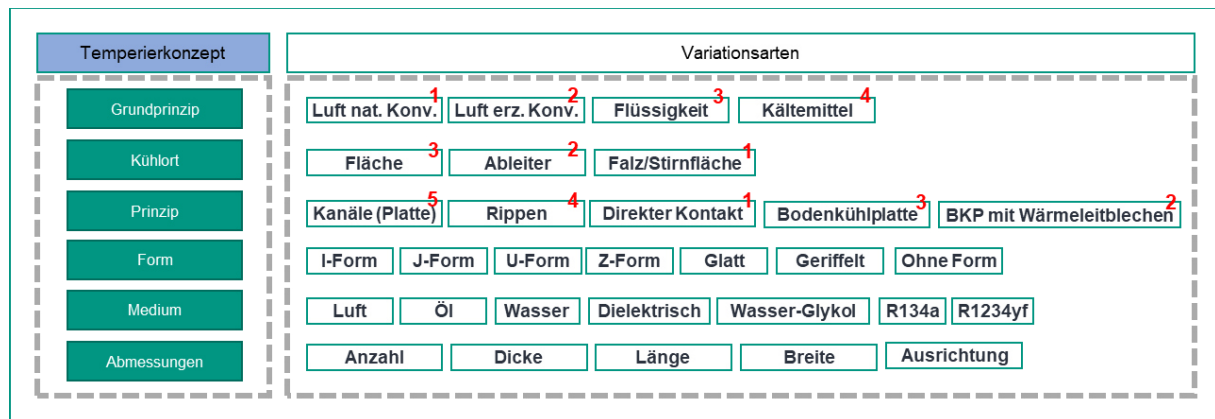


Abbildung 8: Beispielhaftes Ranking von Bausteinen anhand des Bauraumbedarfs

Durch diese Vorgehensweise kann schließlich jede Hauptkategorie durchgegangen werden und schrittweise ein bezüglich der Anforderung am besten geeigneter Baustein ausgewählt werden. Diese Auswahl führt wiederum, wie bereits oben erwähnt, zu einem Ausschluss anderer Bausteine die für dieses Lösungsprinzip nicht mehr in Frage kommen. Eine beispielhafte Darstellung der Vorgehensweise ist in Abbildung 8 gegeben, in der für die Kategorien schrittweise die bauraumtechnisch zu bevorzugende Lösung wie z.B. eine Luftkühlung mit natürlicher Konvektion definiert wurde.

Letztlich können somit durch das beschriebene Regelwerk individuell Konzeptdefinitionen generiert werden. Dabei war mitunter eine Zielsetzung die Eingrenzung der Lösungsvielfalt beliebig gestalten zu können. Dies bedeutet, dass letztlich dem Entwickler überlassen ist in welchem Maße er die potentiellen Konzepte des Batteriesystems einschränken möchte. Dies erfolgt zum einen durch die Auswahl einer beliebigen Anzahl an zu bedienenden Anwendungsszenarien und zum anderen durch die Auswahl einer beliebigen Anzahl an Anforderungen anhand derer präferierte Lösungskonzepte ausgewählt werden sollen.

### 4.3 Identifikation von Abhängigkeiten zwischen Lösungsprinzipien

Im abschließenden Schritt werden Wechselwirkungen zwischen den Bausteinen der vier Hauptkategorien identifiziert. Zwischen diesen Bausteinen können Wechselwirkungen bestehen, die eine Kombination einzelner Bausteine ggf. vollständig ausschließen oder nur bedingt erlauben. Zum Beispiel steht die Auswahl eines Gehäusematerials in keiner Abhängigkeit zum gewählten Kühlprinzip. Andererseits besteht eine bedingte Kompatibilität zwischen der Wahl des Kühlorts und der Position der Ableiter der Zellen. Aufgrund der hohen Anzahl an identifizierten Bausteinen wurde die Bewertung der Wechselwirkungen in einem zweistufigen Verfahren durchgeführt. Zunächst werden dazu die definierten Kategorien betrachtet. Um eine einfache Bewertung der Wechselwirkungen zu ermöglichen, können diese wie in Abbildung 9 beispielhaft zu sehen in Matrixform paarweise betrachtet werden. Eine Bewertung in drei Stufen wurde dabei vorgenommen. Unterschieden wurde in Kombinationen der Bausteine der Kategorien, die ohne Einschränkung miteinander kompatibel,

unter gewissen Bedingungen kompatibel oder keinesfalls kompatibel sind. Diese Bewertung ist ausschnittsweise in Abbildung 9 dargestellt.

Ist Hauptkategorie in Zeile mit Hauptkategorie in Spalte kompatibel?		Sicherheitskonzept		Temperierkonzept	
		Gehäuseisolation	Barrieren	Kühlort	Prinzip
Sicherheitskonzept	Gehäuseisolation			2	1
	Barrieren			1	1
Temperierkonzept	Kühlort	2	1		
	Prinzip	1	1		

2 - frei kompatibel  
 1 - bedingt kompatibel  
 0 - nicht kompatibel

Abbildung 9: Ausschnitt der Definition der Kombinierbarkeit der Baukasten Kategorien

Durch diese Vorgehensweise kann die Anzahl an, für eine weitere Bewertung, genauer zu betrachtenden Kombinationsmöglichkeiten der Bausteine eingeschränkt werden. Somit wurden anschließend die einzelnen Bausteine, für die eine Bedingung gegeben sein kann, weiter betrachtet und erneut bewertet. Die sich dadurch ergebende Wechselwirkungsmatrix ist ausschnittsweise in Abbildung 10 gegeben. Die sich für das Gesamtsystem ergebende Matrix kann schließlich genutzt werden, um eine Auswahl an Bausteinen zu treffen. Diese definiert dabei die prinzipiell in Frage kommenden Produktkonfigurationen unter Berücksichtigung der Kompatibilitäten der einzelnen Bausteine. Letztlich sind für alle Bausteine Kompatibilitäten als frei, bedingt oder nicht kombinierbar gegeben. Im Falle von bedingt kompatibel bewerteten Kombinationen ist eine zusätzliche Definition von Bedingungen notwendig. Diese Bedingungen stellen die Kompatibilität der Schnittstellen zwischen den Bausteinen sicher.

Ist Variationsart in Zeile mit Variationsart in Spalte kompatibel?			Sicherheitskonzept				Temperierkonzept										
			Gehäuseisolation				Barrieren		Kühlort			Prinzip					
			Keine	Mica starr	Mica-Verbund	Smart Materials	Keine	Mica starr	Mica-Verbund	Smart Materials	Fläche	Ableiter	Stirn	Kanäle	Rippen	Direkter Kontakt	BKP mit Wärmeleitblechen
Sicherheitskonzept	Gehäuseisolation	Keine							2	2	2	2	2	2	2	2	
		Mica starr							2	2	2	2	1	2	2	2	
		Mica-Verbund							2	2	2	2	1	2	2	2	
		Smart Materials							2	2	2	2	1	2	2	2	
	Barrieren	Keine							2	2	2	2	2	2	2	2	
		Mica starr							1	2	1	1	2	2	1	1	
		Mica-Verbund							1	2	1	1	2	2	1	1	
		Smart Materials							1	2	1	1	2	2	1	1	
Temperierkonzept	Kühlort	Fläche	2	2	2	2	2	1	1	1							
		Ableiter	2	2	2	2	2	2	2	2							
		Stirn	2	2	2	2	2	1	1	1							
	Prinzip	Kanäle	2	2	2	2	2	1	1	1							
		Rippen	2	1	1	1	2	2	2	2							
		Direkter Kontakt	2	2	2	2	2	2	2	2							
		BKP mit Wärmeleitblechen	2	2	2	2	2	1	1	1							
		Bodenkühlplatte	2	2	2	2	2	1	1	1							

Abbildung 10: Ausschnitt der Definition der Kombinierbarkeit der Baukastenbausteine

Insgesamt können durch dieses Vorgehen Abhängigkeiten zwischen Bausteinen für das zu entwickelnde Batteriesystem identifiziert werden. Für eine bessere Übersichtlichkeit und einfachere Identifikation relevanter Wechselwirkungen im gesamten System sind die im gesamten Baukasten definierten Kompatibilitäten zusätzlich farblich abgegrenzt. Wobei grüne Felder mit einer Zwei eine freie Kompatibilität, gelbe Felder mit einer Eins bedingte Kompatibilität und graue Felder mit einer Null keine Kompatibilität zwischen den Bausteinen bedeuten. Mitunter stellen der Typ der elektrischen Verbindung und der Ort der Kühlung sowie die Ableiterposition Aspekte dar für die sich Wechselwirkungen zwischen den Bausteinen ergeben. Somit konnten damit sowohl sich gegenseitig ausschließende Produktkonfigurationen als auch, falls notwendig, Bedingungen identifiziert werden, die in der Kombination von Bausteinen erforderlich sind. Diese gelten zunächst unabhängig vom betrachteten Anwendungsszenario.

## 5 Anwendung der Methodik

Final sollen die Anwendung und die sich durch den entwickelten Baukasten und dessen Baukasten-Regelwerk ergebende Konzeptdefinitionen des Batteriesystems an einem Beispiel gezeigt werden. Das dafür gewählte Beispiel stellt ein Plug-In-Hybridfahrzeug dar, dessen Batteriesystembausteine anhand deren Bauraumbedarf ausgewählt werden sollen. Als Startpunkt dient dabei der in Kapitel 4 entwickelte Baukasten in Form der Wechselwirkungsmatrix sowie den darin hinterlegten Regeln zur Auswahl und Ausschluss von Bausteinen. Wird folglich in einem ersten Schritt durch den Entwickler das zu betrachtende Anwendungsszenario eines Plug-In-Hybridfahrzeugs definiert, ergeben sich, auf Basis der in Schritt 4 der Baukastenentwicklung definierten Regeln, die in Abbildung 11 zu sehenden Ausschlüsse von Bausteinen.

Welche Anwendung soll definiert werden?			Sicherheitskonzept						Temperierkonzept									
			Gehäuseisolation				Barrieren		Kühlort			Prinzip						
			Keine	Mica starr	Mica-Verbund	Smart Materials	Keine	Mica starr	Mica-Verbund	Smart Materials	Fläche	Ableiter	Stirn	Kanäle	Rippen	Direkter Kontakt	BKP mit Wärmeleitblechen	Bodenkühlplatten
Sicherheitskonzept	Gehäuseisolation	Keine									2	2	2	2	2	2	2	2
		Mica starr									2	2	2	2	1	2	2	2
		Mica-Verbund									2	2	2	2	1	2	2	2
		Smart Materials									2	2	2	2	1	2	2	2
	Barrieren	Keine									2	2	2	2	2	2	2	2
		Mica starr									1	2	1	1	2	2	1	1
		Mica-Verbund									1	2	1	1	2	2	1	1
		Smart Materials									1	2	1	1	2	2	1	1
Temperierkonzept	Kühlort	Fläche	2	2	2	2	2	1	1	1								
		Ableiter	2	2	2	2	2	2	2	2								
		Stirn	2	2	2	2	2	1	1	1								
	Prinzip	Kanäle	2	2	2	2	2	1	1	1								
		Rippen	2	1	1	1	2	2	2	2								
		Direkter Kontakt	2	2	2	2	2	2	2	2								
		BKP mit Wärmeleitblechen	2	2	2	2	2	1	1	1								
		Bodenkühlplatte	2	2	2	2	2	1	1	1								

Abbildung 11: Ausschnitt der Ausschlüsse von Bausteinen anhand des Anwendungsszenarios Plug-In-Hybridfahrzeug

Die sich ergebenden Ausschlüsse werden im Baukasten grau hinterlegt und fallen als Produktkonfigurationen die in Frage kommen weg.

In einem weiteren Schritt kann durch den Entwickler eine Auswahl einer oder mehrerer präferierter Anforderungen erfolgen, um die betrachtenden Kombinationen aus Bausteinen weiter einzugrenzen. Diese ergeben sich durch die in Schritt 5 der Baukastenentwicklung definierten Rankings und sich aus Schritt 3 ergebenden Ausschlüsse von Bausteinen. In Abbildung 12 sind die aufgrund des

Bauraumbedarfs zu bevorzugenden Bausteine in grün zu erkennen. Zusätzlich ergeben sich wiederum wegfallende Bausteine, die im Baukasten grau hinterlegt werden.

Welche präferierte Anforderung soll definiert werden?			Sicherheitskonzept						Temperierkonzept									
			Gehäuseisolation			Barrieren			Kühlort			Prinzip						
			Keine	Mica starr	Mica-Verbund	Smart Materials	Keine	Mica starr	Mica-Verbund	Smart Materials	Fläche	Ableiter	Stirn	Kanäle	Rippen	Direkter Kontakt	BKP mit Wärmeleitblechen	Bodenkühlplatten
Sicherheitskonzept	Gehäuseisolation	Keine									2	2	2	2	2	2	2	2
		Mica starr									2	2	2	2	1	2	2	2
		Mica-Verbund									2	2	2	2	1	2	2	2
		Smart Materials									2	2	2	2	1	2	2	2
	Barrieren	Keine									2	2	2	2	2	2	2	2
		Mica starr									1	2	1	1	2	2	1	1
		Mica-Verbund									1	2	1	1	2	2	1	1
		Smart Materials									1	2	1	1	2	2	1	1
Temperierkonzept	Kühlort	Fläche	2	2	2	2	2	1	1	1								
		Ableiter	2	2	2	2	2	2	2	2								
		Stirn	2	2	2	2	2	2	1	1	1							
	Prinzip	Kanäle	2	2	2	2	2	2	1	1	1							
		Rippen	2	1	1	1	2	2	2	2								
		Direkter Kontakt	2	2	2	2	2	2	2	2								
		BKP mit Wärmeleitblechen	2	2	2	2	2	2	1	1	1							
		Bodenkühlplatte	2	2	2	2	2	2	1	1	1							

Abbildung 12: Ausschnitt der Ausschlüsse von Bausteinen anhand der präferierten Anforderung Bauraum

Zur letzten Generierung von Lösungskonzepten für das Batteriesystem können Kombinationen aus allen Bausteinen gebildet werden, die nicht durch eine Vorauswahl ausgeschlossen wurden. Diese sind in der grafischen Darstellung grün oder weiß hinterlegt. Zu beachten sind dabei die ggf. vorhandenen bedingten Kombinierbarkeiten zwischen einzelnen Bausteinen die durch eine Eins markiert in der matrixbasierten Umsetzung zu finden sind. Vor Auswahl des Anwendungsszenarios standen somit für den in Abbildung 11 und gewählten Ausschnitt noch 240 Kombinationsmöglichkeiten zur Auswahl, diese wurden durch die Wahl des Anwendungsszenarios Plug-In-Hybrid auf 15 Möglichkeiten reduziert und schließlich durch die Auswahl der präferierten Anforderung Bauraum auf nur eine Möglichkeit. Eine gesamte Darstellung der im Baukasten enthaltenen und für ein Beispiel einer anhand deren Bauraumbedarf und anschließend deren Kosten ausgewählten Bausteine ist in Abbildung 13 gegeben.



Sicherheitskonzept	Gehäusematerial	Aluminium
	BMS	Außen
	Gehäuseisolation	Mica starr
	Barrieren	Mica-Verbund
	Ventil	Zellverbundebene
	Sicherung	El. Sicherung
	Separator	Kunststoff
	Stromableiter	Referenzmaterial
	Kathode	Referenzmaterial
	Additive Elektrolyt	SEI-Bildner
Temperierkonzept	Grundprinzip	Flüssigkeit
	Kühlort	Falz/Stirn
	Prinzip	Bodenkühlplatte
	Medium	Öl
		Wasser
Dielektrisch		
Wasser-Glykol		
Elektrischer Aufbau und Zellauswahl	Zelltyp	Hochleistungszelle +
		Hochleistungszelle
		Allroundzelle
		Hochenergiezelle
		Hochenergiezelle +
	Tabposition	beieinander
	Modularisierung	keine
Verbinder	Verbindungsblech	
BMS	Hauptkontakte	MOSFETs
	Sicherheitsfunktion	Schmelzsicherung
	Thermomanagement	aktiv einfach
	Zustandsschätzung	State-Of-Power
	Cell-Balancing	aktiv
	Strangabschaltung	ohne
	Temperaturmessung	je Modul
	Kommunikation	CAN-Bus
	User-Interface	Extern

Abbildung 13: Konzeptauswahl für ein Plug-In-Hybridfahrzeug

Durch das in Kapitel 4 beschriebene Vorgehen wurde für dieses Beispiel durch das Baukasten-Regelwerk ein Aluminiumgehäuse mit thermischen Barrieren sowie eine Flüssigkühlung mittels Bodenkühlplatte und eine BMS-Konfiguration mit aktivem Cell-Balancing gewählt. Die Auswahl des Kühlmediums und Zelltyps ist auf Basis der Vorauswahl nicht erfolgt und stellt somit eine Auswahl an Produktkonfigurationen dar, die im weiteren Auslegungsprozess berücksichtigt werden können.

Für eine weitere Auslegung müssen schließlich noch zusätzliche Parameter der Bausteine sowie deren Bedingungen zueinander quantifiziert werden. Um diese Parameter festlegen zu können ist Wissen über beispielsweise Restriktionen in der Produktion notwendig. Zusätzlich hängen diese final von der weiteren Auslegung des Systems ab. Wie zum Beispiel die Zellabmessungen die in einem folgenden Entwicklungsschritt anhand von gegebenen Anforderungen definiert werden. Letztlich stellen, wie in den Beispielen zu sehen, einige Freiheitsgrade sowie Lösungsprinzipien Varianten dar die innerhalb des Baukasten-Regelwerks nicht final quantitativ festgelegt werden müssen. Diese können für den weiteren Entwicklungsprozess und eine weitere Optimierung des Batteriesystems in detaillierte Modelle überführt werden. Zusätzlich können die Auslegung des Batteriesystems und Konzeptdefinition als iterativer Prozess gesehen werden, der mehrmals durchlaufen wird.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Konzeptdefinition eines Batteriesystems bietet eine Möglichkeit zur anwendungs- und anforderungsspezifischen Auswahl von Bausteinen eines Batteriesystems aus einem Baukasten. Dazu wurden sowohl die Struktur und Bausteine des Baukastens definiert als auch ein Baukasten-Regelwerk abgeleitet das die Auswahl der Bausteine unter Berücksichtigung von Kompatibilitäten zwischen den Bausteinen und anwendungsabhängigen Ausschlüssen ermöglicht. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der weiteren Auswahl anhand von Präferenzen in der Anforderungserfüllung.

Durch die vorgestellte Methode ist es somit möglich die in Kapitel 3 adressierte große Lösungsvielfalt und Komplexität in der Lösungsauswahl handhabbar zu machen und somit den Entwickler zu unterstützen. Dabei ist es möglich den Grad der Lösungsauswahl individuell zu gestalten und sowohl eine vollständige Konzeptauswahl als auch eine Vielfalt an potentiellen Konzepten zu generieren. Hervorzuheben ist dabei die Möglichkeit der Anwendung auf verschiedene Anwendungsszenarien eines Batteriesystems. Der entwickelte Baukasten ist sowohl für Anwendungen im Automobilbereich als auch handgehaltene Geräte wie Powertools einsetzbar.

Dabei stellen die durch den Baukasten generierbaren Konzepte des Batteriesystems keine vollständig entwickelten Produkte, sondern einen Teil der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung dar. Die Frühe Phase, nach dem Modell der PGE - Produktgenerationsentwicklung, ist eine Phase im Entwicklungsprozess einer neuen Produktgeneration, die mit der Initiierung eines Projektes beginnt und mit der Bewertung einer Produktspezifikation endet. Die Produktspezifikation enthält u. a. Informationen bzgl. der verwendeten Technologien und Subsysteme [10]. Die definierten Konzepte des Batteriesystems stellen somit einen Ausgangspunkt für den weiteren Entwicklungsprozess dar.

Zur weiteren Auslegung des Batteriesystems ist eine Berücksichtigung der identifizierten Abhängigkeiten zwischen den ausgewählten Bausteinen erforderlich. Dabei sind unter anderem potentielle geometrische Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Für eine weitere Auslegung unter Nutzung der sich durch den flexiblen Ansatz ergebenden Potentiale ist des Weiteren eine ganzheitliche Betrachtung der unterschiedlichen Auslegungsaspekte erforderlich. Dazu ist im weiteren Vorhaben des Projektes AgiloBat die Entwicklung eines Auslegungstools angestrebt, das dies ermöglicht. Dabei soll sowohl eine Optimierung der Zellgeometrien für den zur Verfügung stehenden Bauraum erfolgen, welche im Wechselspiel mit erforderlichem Bauraum für Kühl- und Sicherheitskomponenten steht, als auch eine elektrische und thermische Optimierung des Zellverbundes erfolgen, die sowohl die internen Zelleigenschaften als auch Verschaltungs- und Kühlungsaspekte bewerten soll.

## 7 Danksagungen

---

Diese Arbeit wurde durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg im Rahmen des Projekts "AgiloBat" als Teil des Innovationscampus Mobilität der Zukunft gefördert.

Wir danken Julia Gandert (Institut für Thermische Verfahrenstechnik – KIT), Sabine Paarmann (Institut für Thermische Verfahrenstechnik – KIT), Sebastian Schuhmann (Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik – KIT), Niklas Weber (Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik – KIT), Adrian Schmidt (Institut für Angewandte Materialien – KIT) und Daniel Schall (Elektrotechnisches Institut – KIT) für die Bereitstellung der jeweiligen Fachexpertise, die diese Forschung unterstützt hat.

## 8 Literatur

---

- [1] J. Ruhland *et al.*, „Development of a Parallel Product-Production Co-design for an Agile Battery Cell Production System“ in *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems*, A.-L. Andersen et al., Hg., Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 96–104, doi: 10.1007/978-3-030-90700-6\_10.
- [2] M. Schmalz, C. Lensch-Franzen, M. Kronstedt und M. Wittemann, „Skalenübergreifende Batteriesystembetrachtung zur effizienten Entwicklung und Optimierung elektrischer Antriebe“, S. 15–24, doi: 10.1007/978-3-658-28707-8\_2.
- [3] D. Wagner, „Methodengestützte Entwicklung eines elektrischen Energiespeichers zur Erschließung von Leichtbaupotenzialen als Beitrag zur Produktgenerationsentwicklung“. Dissertation, Institut für Produktentwicklung (IPEK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2015.
- [4] F. Frank, „Optimierter Hochvoltbatterieentwurf hinsichtlich mechanischer, thermischer und elektrischer Randbedingungen unter Berücksichtigung der Produktionskosten“. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2018.
- [5] A. Albers, A. Braun und S. Muschik, „Uniqueness and the Multiple Fractal Character of Product Engineering Processes“ in *1st International Conference on Modelling and Management Engineering Processes*, Cambridge, London, 2010, S. 15–26.
- [6] N. Bursac, *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung*. Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016.
- [7] K. Ehrlenspiel, *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München: Carl Hanser, 2009.
- [8] *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, VDI 2206, Berlin, Jun. 2004.
- [9] G. Ropohl, *Allgemeine Technologie: eine Systemtheorie der Technik*. s.l.: KIT Scientific Publishing, 2009.
- [10] A. Albers, S. Rapp, C. Birk und N. Bursac, „Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung“ in *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017*, Stuttgart, 2017, o. S.

KIT Scientific Working Papers  
ISSN 2194-1629

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)