

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulative Bestimmung der Nachfrage nach wiederaufgearbeiteten Produkten unter Berücksichtigung von Kundenpräferenzen

Simulative Determination of Demand for Remanufactured Products under Consideration of Customer Preferences

Sandra Huster, Thomas Unterladstätter, Sonja Rosenberg, Andreas Rudi, Frank Schultmann, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (Germany),
sandra.huster@kit.edu, thomas.unterladstaetter@student.kit.edu,
sonja.rosenberg@kit.edu, andreas.rudi@kit.edu, frank.schultmann@kit.edu

Abstract: The remanufacturing market as a whole is growing. However, it is unclear how it will develop for single products. We propose a simulation model to simultaneously estimate the demand for remanufactured products and the supply of used products for remanufacturing. The estimation is based on the material flow of a 2-component product with distributed component lifetimes, the characteristics of the remanufactured product, and potential customers' preferences. The model, which combines discrete event and agent-based simulation, is applied to the use case of electric vehicles and their traction batteries. After battery failure, the car owners can decide whether to buy a new or a remanufactured battery or discard the vehicle and buy a new one. The model's features are demonstrated by varying the characteristics of remanufactured batteries and showing the effects on customer choices.

1 Einleitung

Der Markt für wiederaufgearbeitete Produkte wächst vor dem Hintergrund der effizienten Ressourcennutzung (Parker et al., 2015). Eine Herausforderung ist die Abschätzung der Menge an Altprodukten zur Wiederaufarbeitung (Marx-Gómez et al., 2002). Insbesondere für neue Produkte, wie die Batteriesysteme von Elektrofahrzeugen, ist dies aufgrund fehlender Erfahrungswerte und einer unsicheren Marktentwicklung relevant (Liang et al., 2014). Doch nicht nur das Angebot an aufzuarbeitenden Produkten ist mit Unsicherheiten behaftet, auch die Nachfrage nach wiederaufgearbeiteten Produkten ist ungewiss. Damit Nachfrage entsteht, müssen gewisse Voraussetzungen erfüllt sein. Eine Grundvoraussetzung ist, dass ein Bauteil ausfällt, welches ersetzt werden soll, da aufgearbeitete Komponenten in der Regel als Ersatzteile verwendet werden. Allerdings wird nicht jedes defekte Bauteil ersetzt, und statt eines aufgearbeiteten Ersatzteils kann auch ein neues Ersatzteil verwendet

werden. Eine zweite Voraussetzung für das Entstehen von Nachfrage ist, dass Kunden aufgearbeitete Ersatzteile akzeptieren (Singhal et al., 2019).

In der Literatur wird die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten bisher nachrangig betrachtet, einzelne Ansätze sind aber zu finden. So schätzen zum Beispiel Matsumoto und Komatsu (2015) und Mishra et al. (2013) die Nachfrage mithilfe der Zeitreihenanalyse. Manche Autoren, wie Ardi und Aditiya (2019) und Chou et al. (2020), sehen wiederaufgearbeitete Produkte als Substitute für Neuware, so dass die Nachfrage nach wiederaufgearbeiteten Produkten eine Teilmenge der gesamten Produktnachfrage ist. Andere Autoren, wie Jaber und El Saadany (2009), betrachten die Märkte für neue und aufgearbeitete Produkte als getrennte Märkte, für die eine separate Betrachtung notwendig ist. Goltsov et al. (2019) stellen nach einer Literaturanalyse fest, dass in der Regel davon ausgegangen wird, dass die Nachfrage bekannt ist und nicht prognostiziert werden muss. Dieser Annahme widersprechen sie aber und betonen die Wichtigkeit von Nachfrageprognosen, die gleichberechtigt neben Angebotsprognosen stehen sollten. Ganeshan (2020) erklärt Nachfrageprognosen im Aufarbeitungskontext ebenfalls zu einem bisher zu wenig erforschten Gebiet. Als eine der Schwierigkeiten führt er neben weiteren Unsicherheiten auf, dass die Kundenwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte unbekannt ist. Auch Akano et al. (2021) betonen die Wichtigkeit von Kundeninteressen bei Aufarbeitungsentscheidungen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Prognosen der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten Unsicherheiten unterliegen. Diese umfassen auch eine mögliche Ablehnung von aufgearbeiteten Produkten durch Kunden und sind noch unzureichend untersucht.

Eine Möglichkeit, Unsicherheit zu begegnen, ist die Verwendung von Simulationen; diese können auch komplexe Systeme und unterschiedliche Arten von Unsicherheiten abbilden (Mula et al., 2006) und erlauben die Betrachtung verschiedener Szenarien. In diesem Beitrag wird deshalb der Ansatz der Simulation gewählt, um gleichzeitig die Nachfrage nach aufgearbeiteten Ersatzteilen und das Angebot an aufarbeitungsfähigen Produkten zu schätzen. Der Ansatz berücksichtigt dabei sowohl die relevanten Materialflüsse als auch Produkteigenschaften und die Präferenzen von Endkunden. Der Materialfluss wird ereignisdiskret modelliert, was in einer Grundversion bereits veröffentlicht wurde (Huster et al., 2022). Kundenpräferenzen und Produkteigenschaften werden mithilfe der agentenbasierten Simulation in das Grundmodell integriert. Die Innovation des Ansatzes liegt darin, dass „harte“, zahlenbasierte Faktoren, wie Produktverkäufe und die Lebenserwartung von Produkten, mit weichen Faktoren, wie dem menschlichen Verhalten, kombiniert werden, um Prognosen im Kontext von geschlossenen Wertschöpfungsketten zu erstellen. Somit wird die Interdisziplinarität des Problems berücksichtigt und sozialwissenschaftliche Ansätze werden mit der simulationsbasierten Produktflussanalyse verknüpft.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 wird das Simulationsmodell vorgestellt. Es folgt in Kapitel 3 die Einführung in eine Case Study, nämlich die Anwendung des Modells auf den Fall der Elektrofahrzeuge. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Fallstudie vorgestellt (Kapitel 4). In Kapitel 5 werden die Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert.

2 Simulativer Lösungsansatz

Das Simulationsmodell zur simultanen Prognose von Angebot und Nachfrage nach aufgearbeiteten Teilen betrachtet ein Produkt, das aus einer Haupt- (HK) und einer Nebenkomponente (NK) besteht. Wenn die NK das Ende ihrer Nutzungsphase erreicht hat, kann sie potentiell durch ein aufgearbeitetes Produkt ersetzt werden. Die Modelllogik ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

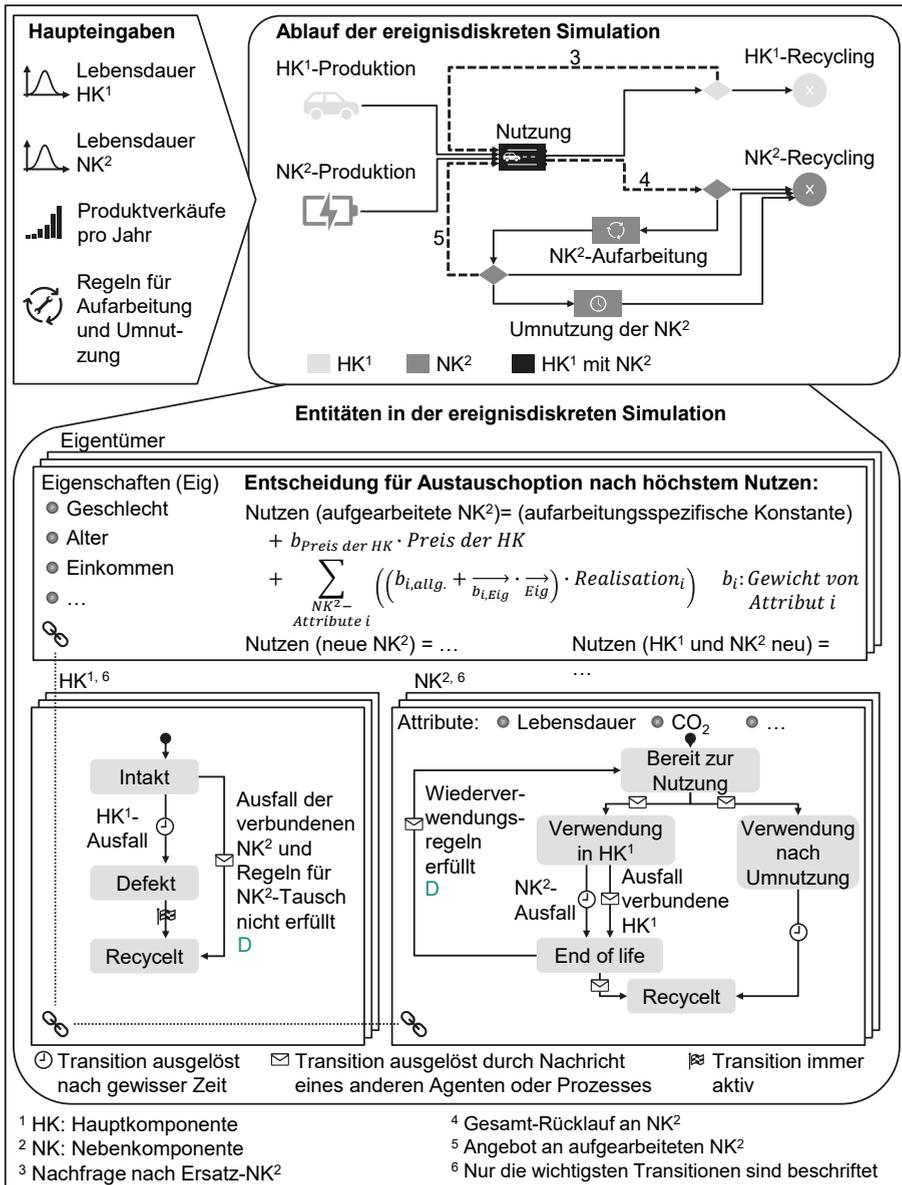


Abbildung 1: Modelllogik (in Teilen basierend auf Huster et al. (2022))

In einem ersten Teil des Modells wird der Produktfluss der HK und der NK abgebildet. Dieser Teil des Modells ist ausführlich in Huster et al. (2022) dargestellt und wird hier nur kurz erläutert: Der Produktfluss beginnt damit, dass gemäß prognostizierten Produktverkäufen neue Produkte bestehend aus einer HK und einer NK in das System eingebracht werden. Dies erlaubt Märkte mit sich ändernden Marktvolumen zu modellieren. Die HKs und NKs haben eigene Lebensdauerverteilungen und können somit unabhängig voneinander ausfallen. Wenn eine der Komponenten ausfällt, verlassen beide die Nutzungsphase. Danach kann unabhängig von der jeweils anderen Komponente bestimmt werden, welcher Nutzung oder Verwertung die HK und die NK zugeführt werden. Verschiedene Verwertungsalternativen stehen zur Verfügung. Ob HKs und NKs direkt recycelt werden oder ein Ersatzteil erhalten bzw. zu einem Ersatzteil aufgearbeitet werden, hängt unter anderem von Regeln ab, die vor dem Simulationsbeginn festgelegt werden. Diese Regeln gelten beispielsweise hinsichtlich Altersgrenzen, bis zu denen eine HK ein Ersatzteil erhält oder bis zu denen eine HK aufgearbeitet wird. Außerdem können sich die Eigentümer für oder gegen ein Ersatzteil (neu oder aufgearbeitet) entscheiden. Diese Kundenentscheidung stellt den zweiten Teil des Simulationsmodells dar.

Jedes Produkt (HK mit NK) wird, sobald es das System betritt, mit einem Eigentümer verknüpft. Fällt nun eine NK aus, muss der Eigentümer entscheiden, ob er eine neue Ersatz-NK oder eine aufgearbeitete Ersatz-NK erwerben möchte, oder ob er ein komplett neues Produkt (HK mit NK) erwirbt. Die Entscheidung hängt von den Eigenschaften der HK, der NK und des Eigentümers ab. Als entscheidungsrelevante Eigenschaft der HK wird der Neupreis festgelegt, der folglich bei jeder HK-Entität im Simulationsmodell hinterlegt sein muss. Die relevanten Eigenschaften der NK sind der Preis, die Haltbarkeit (Lebensdauer) und die Umweltfreundlichkeit. Um neue und aufgearbeitete NKs gut vergleichen zu können, werden die Attribute im Modell übersetzt zu „Preiseinsparungen im Vergleich zu einer neuen NK“, „Lebensdauereinbußen im Vergleich zu einer neuen NK“ und „CO₂-Äquivalent-Einsparungen im Vergleich zu einer neuen NK“. Eigentümer werden über die Eigenschaften Geschlecht, Alter, Einkommen, Bildungsgrad und Wohnort definiert.

Muss nun ein Eigentümer mit defekter NK eine Entscheidung treffen, wird im Modell der Nutzen jeder seiner Optionen berechnet. Die Berechnung setzt sich additiv aus folgenden Bestandteilen zusammen (siehe Abbildung 1, „Entscheidung für Austauschoption nach höchstem Nutzen“):

1. Ein optionsspezifischer Wert bildet die grundsätzliche Präferenz für (I) eine Reparatur der HK mit neuen Ersatz-NKs („Ersatz neu“) oder mit (II) aufgearbeiteten Ersatz-NKs („Ersatz reman“) oder (III) den Neuerwerb des gesamten Produkts („none“) ab, unabhängig von den Eigenschaften der NKs. Der Wert schwankt in jeder Entscheidungssituation lediglich dadurch, dass er einer Verteilung folgt.
2. Der HK-Preis fließt positiv oder negativ in den Nutzen ein, indem er mit einem Gewicht multipliziert wird, das den Nutzen jeder Option erhöht oder verringert, je teurer die HK ist.
3. Die Eigenschaften der neuen und aufgearbeiteten NKs und der Eigentümer bilden die dritte und größte Komponente. Jedes Attribut, z. B. die Einsparungen im Vergleich zu einer neuen NK, wird mit einem Faktor gewichtet, der für die gesamte Population gilt, plus Zuschlags- oder

Minderungsfaktoren, die sich aus den Eigenschaften der Eigentümer ergeben.

Alle „Konstanten“ und Gewichte folgen Verteilungen, um dem Zufall der Entscheidung und der Heterogenität der Population Rechnung zu tragen. Die Bestimmung der Verteilungsparameter erfolgt exogen, z. B. durch ein diskretes Entscheidungsexperiment, und wird dem Modell als Input übergeben.

Die Entscheidung fällt auf die Option mit dem höchsten Nutzen. Sie beeinflusst die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten und, sofern das Angebot an die Nachfrage angepasst wird, auch den Verwertungsweg von NKs am Nutzungsende.

3 Fallstudie Traktionsbatterien

Das in Kapitel 2 vorgestellte Simulationsmodell wird zu Demonstrationszwecken auf Elektrofahrzeuge in Deutschland angewendet. Das Produkt eignet sich deshalb, weil es erst vor wenigen Jahren in heutiger Form auf den Markt gekommen ist, seit dem einen steigenden Marktanteil erreicht, und erwartet wird, dass sich dieses Marktwachstum fortsetzt (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2022; Deloitte, 2020). Damit kann die Stärke des Modells, zeitliche Verzögerungen zwischen Angebot und Nachfrage darzustellen, genutzt werden. Die Nebenkomponekte ist in dem Fall die Traktionsbatterie, das restliche Fahrzeug ohne Batterie die Hauptkomponente. Wie in Kapitel 2 beschrieben, werden Elektrofahrzeuge gemäß einer Neuzulassungsprognose in das System eingebracht und direkt mit einem Eigentümer verknüpft. Erreicht das Fahrzeug das Ende seiner Lebensdauer, wird es dem Recycling zugeführt und die Batterie wird separat und unabhängig vom Fahrzeug recycelt oder aufgearbeitet. Fällt andersherum die Batterie vor dem Fahrzeug aus, muss der Eigentümer über einen Batteriewechsel mit einer neuen oder aufgearbeiteten Batterie oder die Aufgabe des Fahrzeugs entscheiden. Dies gilt nur, sofern das Fahrzeug älter als acht Jahre ist, da ansonsten die Garantie greift, die in der Regel 8 Jahre oder 160.000 km beträgt (ADAC, 2021), und der Hersteller die Batterie ersetzt, annahmegemäß durch eine Neubatterie.

Als Betrachtungszeitraum wird 2015-2050 gewählt. Der Start in der Vergangenheit erlaubt es, das System initial und realistisch zu befüllen. Von 2015-2021 werden die tatsächlichen Neuzulassungszahlen in Deutschland als Input für das System verwendet (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2022). Von 2022-2040 dient die Prognose von Deloitte (2020) als Basis. Von 2041 bis 2050 wird die Anzahl an Neuzulassungen konstant auf den Wert von 2040 festgelegt. Die technologische Entwicklung in diesem Zeitraum wird berücksichtigt, indem alle fünf Jahre eine neue Fahrzeug- und Batteriegeneration angenommen wird, die jeweils ein Jahr Überschneidung zu der vorherigen und der nachfolgenden Generation aufweist. Zwischen den Generationen besteht keine Kompatibilität, so dass Fahrzeuge der Generation A auch nur Ersatzbatterien der Generation A erhalten können. Es werden drei Fahrzeuggrößen betrachtet (groß: 44 %, mittel: 16 %, klein: 40 %, in Anlehnung an Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2022)). Die mittlere, weibullverteilte Fahrzeuglebensdauer beträgt 14 Jahre (Oguchi und Fuse, 2015), auf die der Batterien wird später eingegangen.

Die Festlegung der Eigentümereigenschaften ist angelehnt an die Verbrauchertypen des Diffusionsprozesses nach Rogers (2003), nämlich die Innovatoren, die frühen

Anwender, die frühe Mehrheit, die späte Mehrheit und die Nachzügler. Kunden der ersten Jahre sind Innovatoren, es folgen die frühen Anwender usw. Die Eigenschaften werden den Verbrauchertypen zugeordnet. Zum Beispiel sind Elektrofahrzeugkäufer der ersten Stunde (Innovatoren) vorrangig männlich (Frenzel et al., 2015) und der Frauenanteil steigt bei späteren Verbrauchertypen. Hinsichtlich der Altersverteilung unterscheiden sich die Typen laut Rogers (2003) hingegen nicht, weshalb hier mithilfe einer Weibull-Verteilung näherungsweise die Altersverteilung in Deutschland ab 18 Jahren für alle Verbrauchertypen gespiegelt wird.

Ein weiterer Input in das Modell sind die Gewichtungen, welche die Batterieeigenschaften bei der Nutzenberechnung erhalten. Hierfür wurde ein diskretes Auswahlexperiment durchgeführt mit 914 vollständigen Antworten. In diesem Auswahlexperiment wurden die Befragten 14 Mal vor die Wahl gestellt, welche Option sie wählen würden, wenn nach Ablauf der Batteriegarantie die Batterie nicht mehr die Leistungsanforderungen erfüllt: Entscheiden sie sich für eine neue Ersatzbatterie, für eine aufgearbeitete Ersatzbatterie oder für die Aufgabe und den Ersatz des Fahrzeugs? Die ersten beiden Optionen unterschieden sich hinsichtlich der Eigenschaften, die im Simulationsmodell die NK unterscheiden. Außerdem war bei allen Optionen der Fahrzeugneupreis angegeben. Die Auswertung erfolgte mittels hierarchischer Bayes-Methode unter Verwendung eines Mixed Logit-Modells. Für Grundlagen zur Auswertung von Auswahlexperimenten sei auf Train (2009) verwiesen.

Um das Angebot und die Nachfrage unter verschiedenen Bedingungen zu vergleichen, wurden verschiedene Spezifikationen für aufgearbeitete Batterien angenommen (siehe Tabelle 1). Neue Batterien haben annahmegemäß eine weibullverteilte Lebensdauer von 10 Jahren (Ai et al., 2019). Für aufgearbeitete Batterien wird angenommen, im Standardfall eine vier Jahre kürzere Lebenserwartung zu haben, 40 % günstiger zu sein und einen um 20 % verringerten Treibhausgasausstoß bei der Produktion im Vergleich zu einer Neubatterie zu verursachen. Zusätzlich werden jeweils Fälle mit 20 Prozentpunkten mehr und weniger Einsparungen hinsichtlich Preis und CO₂ betrachtet, und Fälle mit 2 Jahren mehr und weniger Lebensdauereinbußen.

Tabelle 1: Untersuchte Szenarien

Name	Batteriekosten- ersparnis	Lebensdauer- verkürzung	CO ₂ -Einsparung
Standard	40 %	4 Jahre	20 %
BP-20	20 %	4 Jahre	20 %
BP-60	60 %	4 Jahre	20 %
LD-2	40 %	2 Jahre	20 %
LD-6	40 %	6 Jahre	20 %
CO ₂ -0	40 %	4 Jahre	0 %
CO ₂ -40	40 %	4 Jahre	40 %

4 Ergebnis

Wie Abbildung 2 a) zeigt, entscheidet sich in allen betrachteten Szenarien die Mehrheit der Fahrzeugeigentümer im Fall eines Batteriedefekts nach Garantieende für den Austausch der Batterie durch eine aufgearbeitete Ersatzbatterie. Im Standard-Fall fällt die Wahl in ca. 57 % der Entscheidungssituationen auf die aufgearbeitete Batterie. Ausgehend von diesem Standardfall zeigt sich, dass eine Variation der erwarteten Lebensdauer die höchsten Auswirkungen auf die Anzahl der Entscheidungen für die Option „Ersatz reman“ hat. Wird statt einer Lebensdauer von sechs Jahren (Standardfall: $10-4=6$) eine Lebensdauer von nur vier Jahren (LD-6) erwartet, sinkt die Wahlhäufigkeit um 27 %. Steigt die Lebensdauererwartung hingegen auf acht Jahre, steigt sie um 35 %. Steigt oder sinkt die Kostenersparnis für den Batteriekauf um 20 Prozentpunkte (BP-60, BP-20), beeinflusst dies die Wahlhäufigkeit einer aufgearbeiteten Batterie ebenfalls stark (-25 % bzw. +35 %). Die Umweltfreundlichkeit von aufgearbeiteten Batterien hat einen deutlich geringeren Effekt. Wird ein Aufarbeitungsprozess gewählt, der gar kein CO₂ einspart (CO₂-0), verringert dies die Wahlhäufigkeit um nur 9 %. Wird die eingesparte CO₂-Menge verdoppelt von -20 % im Standardfall auf -40 % (CO₂-40), wird die Option 8 % häufiger gewählt. Die anderen beiden Optionen, eine neue Ersatzbatterie zu wählen oder das Fahrzeug abzustoßen, werden in allen Szenarien von einem Teil der Eigentümer im Modell gewählt. Es ist jedoch nicht einheitlich, welche der Optionen häufiger gewählt wird.

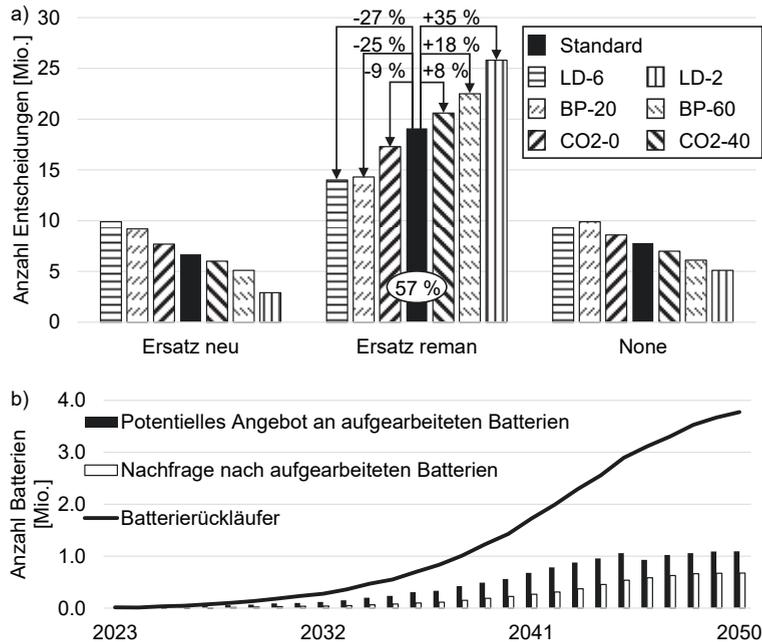


Abbildung 2: a) Anzahl der Entscheidungen der Fahrzeugeigentümer für eine der Austauschoptionen. b) Potentielles Angebot und Nachfrage nach aufgearbeiteten Batterien und die jährliche Gesamtzahl an Batterierückläufern im Standard-Szenario

In Abbildung 2 b) ist für das Standard-Szenario dargestellt, wie sich das potentielle Angebot von aufgearbeiteten Batterien und die Nachfrage danach im Zeitverlauf darstellen. Nachdem es in den ersten Jahren der Simulation zu einer minimalen Übernachfrage kommt (in der Abbildung nicht sichtbar), ist ab 2025 unter den simulierten Bedingungen damit zu rechnen, dass die Nachfrage vollständig befriedigt werden kann. Im späteren Verlauf übersteigt das potentielle Angebot die Nachfrage deutlich. In dem Szenario mit der höchsten Nachfrage, LD-2, könnte ca. 3 % der Nachfrage nach aufgearbeiteten Batterien nicht bedient werden, in allen anderen Szenarien läge der Anteil bei unter einem Prozent.

5 Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem vorgestellten Simulationsmodell die Auswirkungen verschiedener Charakteristika aufgearbeiteter Batterien auf die Nachfrage geschätzt werden können und dabei gleichzeitig das erwartete Angebot abgebildet wird. Es ist jedoch zu beachten, dass zahlreiche Annahmen als Inputparameter in das Modell eingehen und die Aussagekraft auch von der Güte der Inputs abhängt. In vorherigen Untersuchungen konnte bereits der Einfluss verschiedener Annahmen hinsichtlich der Batterie- und Fahrzeuglebensdauern gezeigt werden (Huster et al., 2022). In der hier gezeigten Erweiterung um Kundenpräferenzen ist vor allem die Bestimmung der Nutzenwerte der einzelnen Optionen als kritischer Input zu nennen. Im vorliegenden Fall ist die Bestimmung dieser über diskrete Auswahlexperimente erfolgt mit einer Datenbasis von über 900 befragten Personen, von denen ca. die Hälfte ein Elektrofahrzeug besitzt und somit potentiell in die Situation kommen kann, eine Entscheidung über den Batterietausch treffen zu müssen. Die Art der Befragung mittels diskreten Auswahlexperimenten hat eine hohe externe Validität (Telser und Zweifel, 2007). Dennoch ist fraglich, ob die nicht systematisch ausgewählten Befragten einen Querschnitt der deutschen Bevölkerung darstellen. Dies könnte durch repräsentative Bevölkerungsbefragungen überprüft werden.

Es scheint plausibel, dass die erwartete Batteriebensdauer und die Kostenersparnis einer aufgearbeiteten Batterie die wichtigsten Kriterien sind, anhand derer Kunden sich für oder gegen eine aufgearbeitete Batterie entscheiden. Die Umweltfreundlichkeit spielt eine untergeordnete Rolle. Für Aufarbeiter heißt das, dass in der Entwicklung von Aufarbeitungsprozessen auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Kosteneffizienz und Qualität geachtet werden muss und diese Kriterien auch bei potentiellen Kunden beworben werden sollten.

Das Simulationsmodell wurde auf den Anwendungsfall der Elektrofahrzeuge angewendet mit der Hauptkomponente „Fahrzeug ohne Batterie“ und der Nebekomponente „Batterie“, die bei einem Defekt ersetzt werden kann. Wie in Kapitel 3 kurz erläutert, eignet sich dieses Produkt, weil es einen wachsenden Markt darstellt. Für Produkte, in denen die Aufarbeitung bereits etabliert ist, ist die aufwändige Untersuchung des zukünftigen Marktes mittels des vorgestellten Simulationsmodells weniger geeignet. Bei etablierten Produkten kann auf Erfahrungswerte zurückgegriffen und Methoden der Zeitreihenanalyse können sowohl für die Schätzung des Angebots an aufarbeitbaren Teilen als auch für die Schätzung der Nachfrage verwendet werden. Der simulative Ansatz zeigt seine

Stärke, wenn verschiedene Zukunftsszenarien realistisch scheinen, z. B. hinsichtlich der Eigenschaften der aufgearbeiteten Produkte, der Käufer oder der Absatzzahlen.

Das Modell ermöglicht es, technologischen Fortschritt abzubilden, indem verschiedene Produktgenerationen zeitlich getrennt in das Modell eingespielt werden können, zwischen denen keine Kompatibilität besteht. Mögliche Erweiterungen wären, die Batterieeigenschaften generationsspezifisch anzupassen, etwa hinsichtlich der Lebensdauer oder des unter anderem rohstoffabhängigen Preises.

In der Realität beeinflussen mehr Akteure als die privaten Endkunden das Angebot und die Nachfrage nach aufgearbeiteten Teilen. Diese zu integrieren stellt eine mögliche Erweiterung des Modells dar. Auf den Automobilmarkt bezogen könnten zum Beispiel Geschäftskunden einbezogen oder der Gebrauchtwagenmarkt könnte modelliert werden. Auch der Einfluss weiterer Akteure, wie Autowerkstätten oder Originalteileherstellern, ist zu untersuchen und gegebenenfalls in das Modell einzupflegen.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist im Rahmen des Projekts „Akteursbeziehungen in der kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfung von E-Fahrzeugbatterien“ entstanden. Die Autoren danken dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg für die Förderung. Außerdem bedanken sich die Autoren bei Simon Hufnagel für die Durchführung der Befragung zur Wahl von aufgearbeiteten Antriebsbatterien.

Literatur

- ADAC, 2021: Elektroauto-Batterie: Lebensdauer, Garantie, Reparatur. Unter Mitarbeit von Wolfgang Rudschies. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-batterie/>, zuletzt geprüft am 14.02.2022.
- Ai, N.; Zheng, J.; Chen, W.-Q.: U.S. end-of-life electric vehicle batteries: Dynamic inventory modeling and spatial analysis for regional solutions. *Resources, Conservation and Recycling* 145 (2019), S. 208–219.
- Akano, D.I.; Ijomah, W.; Windmill, J.: Stakeholder considerations in remanufacturability decision-making: Findings from a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production* 298 (2021), S. 126709.
- Ardi, R.; Aditiya, G.P.: Remanufacturing Capacity Planning Strategy for Multigeneration Television Products in Closed Loop Supply Chain. In: *Proceedings of the 2019 5th International Conference on Industrial and Business Engineering*, Hong Kong, 27.09.2019-29.09.2019, 2019, S. 143–147.
- Chou, M.; Sim, C.K.; Yuan, X.M.: Policies for inventory models with product returns forecast from past demands and past sales. *Annals of Operations Research* 288 (2020) 1, S. 137–180.
- Deloitte: *Elektromobilität in Deutschland: Marktenwicklung bis 2030 und Handlungsempfehlungen*, 2020.
- Frenzel, I.; Jarass, J.; Trommer, S.; Lenz, B.: *Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland: Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Berlin, 2015.

- Ganeshan, R.: Commentary: Why Is Forecasting for Remanufacturing Hard? *Forecasting: The International Journal of Applied Forecasting* (2020) 56, S. 18–19.
- Goltsos, T.E.; Syntetos, A.A.; van der Laan, E.: Forecasting for remanufacturing: The effects of serialization. *Journal of Operations Management* 65 (2019) 5, S. 447–467.
- Huster, S.; Glöser-Chahoud, S.; Rosenberg, S.; Schultmann, F.: A simulation model for assessing the potential of remanufacturing electric vehicle batteries as spare parts. *Journal of Cleaner Production* 363 (2022), S. 132225.
- Jaber, M.Y.; El Saadany, A.M.: The production, remanufacture and waste disposal model with lost sales. *International Journal of Production Economics* 120 (2009) 1, S. 115–124.
- Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen (FZ 14): Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, Jahr 2021. Flensburg, 2022.
- Liang, X.; Jin, X.; Ni, J.: Forecasting product returns for remanufacturing systems. *Journal of Remanufacturing* 4 (2014) 1.
- Marx-Gómez, J.; Rautenstrauch, C.; Nürnberger, A.; Kruse, R.: Neuro-fuzzy approach to forecast returns of scrapped products to recycling and remanufacturing. *Knowledge-Based Systems* 15 (2002) 1-2, S. 119–128.
- Matsumoto, M.; Komatsu, S.: Demand forecasting for production planning in remanufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 79 (2015) 1-4, S. 161–175.
- Mishra, P.; Yuan, X.-M.; Huang, G.; Xu, X.X.: Remanufacturing intermittent demand forecast: A critical assessment. In: 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Bangkok, Thailand, 10.12.2013 - 13.12.2013, 2013, S. 1012–1016.
- Mula, J.; Poler, R.; García-Sabater, J.P.; Lario, F.C.: Models for production planning under uncertainty: A review. *International Journal of Production Economics* 103 (2006) 1, S. 271–285.
- Oguchi, M.; Fuse, M.: Regional and longitudinal estimation of product lifespan distribution: a case study for automobiles and a simplified estimation method. *Environmental Science & Technology* 49 (2015) 3, S. 1738–1743.
- Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar, S.; Peck, D.: *Remanufacturing market study*, 2015.
- Rogers, E.M.: *Diffusion of innovations*. New York: Free Press 2003.
- Singhal, D.; Tripathy, S.; Jena, S.K.: Acceptance of remanufactured products in the circular economy: an empirical study in India. *Management Decision* 57 (2019) 4, S. 953–970.
- Telser, H.; Zweifel, P.: Validity of discrete-choice experiments evidence for health risk reduction. *Applied Economics* 39 (2007) 1, S. 69–78.
- Train, K.: *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge: Cambridge University Press 2009.