

1 Einleitung

1.1. Ressourceneffizienz in der Nachhaltigkeit

Natürliche Ressourcen, insbesondere Rohstoffe, sind wesentliche Produktionsfaktoren und damit Grundlagen unseres Wohlstands. Ein Großteil davon ist nur in begrenztem Umfang vorhanden und nicht erneuerbar. Bereits im Jahr 1972 zeigte der Club of Rome⁵ der Öffentlichkeit in seiner Studie „Die Grenzen des Wachstums“⁶ zum ersten Mal das Risiko der kontinuierlichen Verfügbarkeit von Rohstoffen im Rahmen der gegenwärtigen Zunahme der Weltbevölkerung und der Industrialisierung.

Der weltweite Verbrauch von Materialien, z.B. Metallen und Mineralien usw., dürfte sich in den nächsten vierzig Jahren verdoppeln⁷. während das jährliche Abfallaufkommen bis 2050 voraussichtlich um 70% steigen wird⁸. Um die Chance nachfolgender Generationen durch unsere Art des Wirtschaftens und unseren Ressourcenverbrauch nicht zu vermindern, steht die „Ressourceneffizienz (Englisch: Resource Efficiency)“ als Lösungskonzept im Mittelpunkt. Das Schlüsselwort „Ressourceneffizienz“ betrifft momentan alle Politikfelder, sowohl auf lokaler, nationaler als auch auf internationaler Ebene.

Das „Ressourceneffizienz“ werden der wesentlich auf die folgenden vier notwendigen Teilstrategien beruht⁹:

- Schonende und gleichzeitig effiziente Rohstoffgewinnung
- Verringerung des Rohstoff- und Materialverbrauchs (Produktionsphase)
- Verlängerte Nutzungsphase von Rohstoffen in Produkten¹⁰
- Kreislaufführung von Rohstoffen (Recycling ¹¹)

Durch die oben genannten vier Strategien wird der ganze Lebensweg der Stoffströme abgedeckt. Recycling stellt am Ende ein wichtiges Instrument dar, um Sekundärrohstoffe aus End-of-Life Produkten zurückzugewinnen und eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu etablieren.

⁵ „Der Club of Rome ist eine nichtkommerzielle Vereinigung von Persönlichkeiten aus Wissenschaft, Kultur, Wirtschaft und Politik aus allen Regionen unserer Erde. Vgl. o.V., 2012

⁶ Vgl. Meadows, et al. 1972

⁷ Vgl. OECD 10.2018 – Global Material Resources Outlook

⁸ Vgl. Kaza, et al. 2018

⁹ Vgl. BMBF 2012 S. 50

¹⁰ Bei dieser Teilstrategie werden Energie-Rohstoffe nicht berücksichtigt.

¹¹ Bzgl. der europäischen Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG (Art. 3 Abs. 15 u. Abs. 17.) bedeutet Recycling jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Verwertung ist hier jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie andere Materialien ersetzen, die ansonsten zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen.

Recycling spielt eine wesentliche Rolle in drei der vier Haupt-Segmente des Produkt-Lebenszyklusses¹². Am Anfang soll der Recyclingaspekt bei der Entwicklung für neue Produkte berücksichtigt werden. Abfälle, die in der Produktionsphase entstehen, sollen gesammelt und danach recycelt werden. Wenn Produkte nach der Nutzung in die End-of-Life-Phase eintreten und Abfälle geworden sind, sind eine Rücknahmelogistik sowie das Recycling der Post-Consumer-Abfälle erforderlich.

Der Fokus der vorgelegten Doktorarbeit liegt auf der Rücknahme und dem Recycling von einem End-of-Life-Produkt der modernen Zivilisation, dem Elektro-Altfahrzeug.

1.2. Das Altfahrzeug als sekundäre Rohstoffquelle und Abfall

Ende 2023 wurden weltweit erstmals über 65 Millionen Personenkraftwagen¹³ (Abk.: Pkw) verkauft¹⁴. Dementsprechend ist der Fahrzeugbestand weiter angestiegen. Als einer der prägnantesten Indikatoren für das chinesische Wirtschaftswunder manifestiert sich der rasante Anstieg der Pkw-Neuzulassungen in der Volksrepublik China seit der Reform- und Öffnungspolitik. (Vgl. Abb. 1-1). Als Konsequenz des steigenden Fahrzeugbestandes wird hier zukünftig eine wichtige sekundäre Rohstoffquelle vorliegen, vor allem wegen des großen Metallgehaltes der Fahrzeuge.

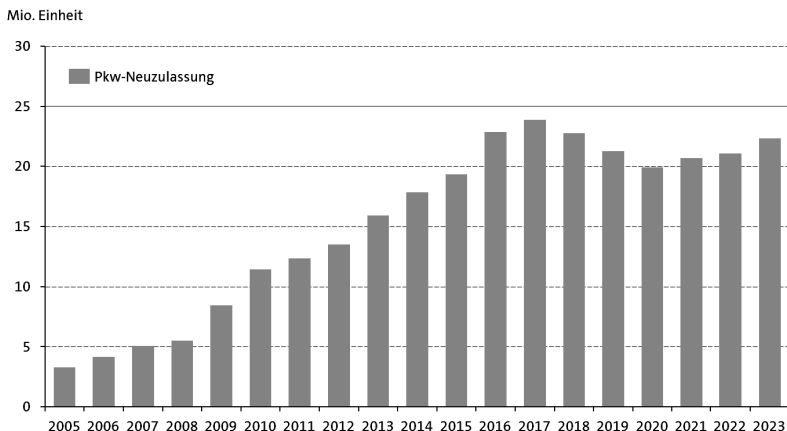


Abb. 1-1: Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen in China (2005–2023)¹⁵

¹² Der Produkt-Lebenszyklus / -Lebensweg bezeichnet in dem Fall das Leben eines Produktes aus Sicht der Industrie. Es wurden hier nur vier Hauptphasen berücksichtigt: Produktentwicklung, Produktion, Nutzung und Recycling in der End-of-Life-Phase. Vgl. Sendler 2009, S. 5, 8-10

¹³ Der Begriff „Personenkraftwagen“ (Pkw) bezieht sich in diesem Kontext spezifisch auf die Fahrzeugklasse M1 gemäß Art. 4 der Verordnung (EU) 2018/858. Diese definierten M1-Kraftfahrzeuge als zur Personenbeförderung und Gepäcktransport bestimmte Fahrzeuge mit maximal acht Sitzplätzen (exklusive Fahrersitz), wobei Stehplätze ausgeschlossen sind.

¹⁴ Datenquelle: OICA, Stand: Februar 2025

¹⁵ Datenquelle: CPCA, Stand: Dezember 2024

Neben dem Aspekt von Ressourcenrückgewinnung spielt in der derzeitigen Altfahrzeugbehandlung¹⁶ auch ein anderer wichtiger Aspekt eine Rolle, der Umweltschutz. In vielen Ländern sind nicht trockengelegte, und damit nicht von Schadstoffen entfrachtete Altfahrzeuge wegen des großen Umweltgefährdungspotenzials gesetzlich als gefährliche Abfälle eingeordnet. Das heißt die Vorbehandlung von Altfahrzeugen muss die gesetzlichen Anforderungen zum Umweltschutz einhalten und sorgfältig durchgeführt werden.

In den letzten Jahren erlebt die globale Automobilindustrie einen tiefgreifenden Wandel von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor hin zu Elektrofahrzeugen (EV). Dieser Wandel nicht nur die Art und Weise, wie wir uns fortbewegen, sondern wird auch langfristige Auswirkungen auf die Industrie für die Demontage und Recycling von Altfahrzeugen haben. Als größter Markt für Elektrofahrzeuge weltweit spielt China eine führende Rolle bei der Förderung von Elektrofahrzeugen, mit einer Bestandszahl von über 22 Mio. Einheiten¹⁷. Allerdings stellen die steigende Elektro-Altfahrzeugvolumen sowie die anstehende Flut von Traktionsbatterien und anderen Fraktionen eine Herausforderung dar, der sich die Branche stellen muss.

Im Kontext dieser Entwicklung ist eine Analyse des aktuellen Standes und eine Prognose der Trends für die Wiederverwertung und Demontage von Elektro-Altfahrzeugen in China von großer Bedeutung und kann als globales Vorbild dienen. Bisherige Forschungen konzentrierten sich hauptsächlich auf einzelne Bereiche wie die Altfahrzeugrücknahme und Demontagetechnologie sowie die Verwertungstechnologie für Traktionsbatterien und für Permanentmagnete aus Elektromotoren. Diese Forschungen fokussierten meistens auf die Prozessoptimierung und die Effizienz der Ressourcenextraktion innerhalb dieser einzelnen Bereiche, jedoch fehlt eine systematische Untersuchung der Zusammenhänge zwischen diesen Bereichen im Hinblick auf die Wertschöpfungskette.

¹⁶ Der Begriff der Altfahrzeugbehandlung umfasst gemäß Art. 3 Abs. 14 u. 19 der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 sämtliche Verwertungs- und Beseitigungsverfahren einschließlich der Vorbehandlungsprozesse. Dabei bezeichnet »Beseitigung« im rechtstechnischen Sinne (Abs. 19) alle Verfahren außerhalb der stofflichen Verwertungskette, selbst wenn dabei Sekundärstoffe oder Energieträger zurückgewonnen werden. Die terminologische Unterscheidung zwischen Verwertung (Abs. 14) und Beseitigung folgt dem europarechtlichen Abfallhierarchieprinzip.

¹⁷ Datenquelle: MPS, Januar 2025

2 Zielsetzung und Rahmen der Arbeit

2.1 Zielsetzung

Die vorliegende Dissertation verfolgt das übergeordnete Ziel, **ein integriertes Handlungskonzept zur Optimierung der Rücknahme und Verwertung von Elektro-Altfahrzeugen in China zu entwickeln**, die sowohl technologische Innovationen als auch institutionelle Reformen integrieren. Die Arbeit gliedert sich in zwei analytische Kernbereiche, die folgende Forschungsschwerpunkte umfassen:

Teil I: Herausforderungen und Entwicklungstendenzen des chinesischen Rücknahmesystems und der Verwertungskette von Elektro-Altfahrzeugen

1. Analyse der **regulatorischen Rahmenbedingungen** und **politischen Divergenzen**:
 - Historische Analyse der Gesetzgebung zur Verwertungskette von Elektro-Altfahrzeugen in China
 - Vertiefende Auslegung zentraler Vorschriften (z. B. Recyclingquoten, Herstellerverantwortung, Umweltauflagen)
 - Prognose zukünftiger regulatorischer Trends im Kontext der Elektromobilität und Kreislaufwirtschaft
2. Technologische und Strukturelle Analyse des **Rücknahmesystems**¹⁸:
 - Evaluierung der Marktstruktur, Logistiknetzwerke und Stakeholder-Interaktionen im chinesischen Altfahrzeugsektor
 - Identifikation systemischer Schwachstellen und Prognose zukünftiger Rücknahmeprozesse.
3. Technologische und Strukturelle Analyse der **Verwertungskette**:
 - Tiefgehende Bestandsaufnahme der Verwertungspraxis in China inkl. Branchenstatus und Stakeholder-Interaktionen.
 - Technologievergleich und Identifikation dominanter Verfahren für Demontage von Elektro-Altfahrzeugen, Traktionsbatterierecycling und Elektromotor- und Magnetverwertung¹⁹
 - Systematische Darstellung der zentralen Hindernisse und Prognose zukünftiger Innovationen in der Verwertungskette von Elektro-Altfahrzeugen

¹⁸ Es besteht derzeit kein signifikanter Unterschied zwischen den Rücknahmekanälen für Elektro-Altfahrzeuge und Altfahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

¹⁹ Traktionsbatterien und Elektromotoren mit Permanentmagneten wurden als Fokuskomponenten dieser Arbeit ausgewählt, aufgrund ihres Gehalts an kritischen Rohstoffen und ihres entscheidenden Einflusses auf die Elektrofahrzeugverwertung.