

---

# RFID-basierte Nachverfolgung logistischer Einheiten in der Kreislaufwirtschaft

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Martin Schnatmeyer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Dieter Thoben  
Prof. Dr.-Ing. Dieter H. Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 21. November 2007

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation zur Arbeit.....	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	2
1.3	Vorgehensweise.....	3
2	Einführung in die Themenstellung.....	7
2.1	Aufgaben der Redistributionslogistik.....	8
2.2	Herausforderungen an die Informationstechnologie.....	12
2.3	Qualitative und quantitative Herausforderungen.....	14
2.4	Gesetzliche Herausforderungen.....	16
2.4.1	Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG).....	17
2.4.2	Altfahrzeugverordnung (AltfahrzeugV).....	21
2.4.3	EU-REACH-Verordnung.....	22
2.4.4	Zusammenfassung.....	23
2.5	Fazit.....	24
3	Stand der Technik.....	27
3.1	Logistische Einheiten.....	27
3.2	Informationslogistik.....	29
3.2.1	Identifikation.....	29
3.2.2	Positionsbestimmung.....	36
3.2.3	Nachverfolgung.....	38
3.3	Laufende und abgeschlossene Forschungsarbeiten und Studien.....	42
3.3.1	Forschungsarbeiten.....	42
3.3.2	Studien.....	45
3.4	Fazit.....	49
4	Konzept eines RFID-basierten Informationssystems.....	51
4.1	Recyclingstufen.....	52
4.2	Auswahl der Komponenten.....	53
4.2.1	Identifikationskomponenten.....	54
4.2.2	Positionsbestimmung.....	55
4.2.3	Nachverfolgung.....	57
4.3	Integration und Umsetzung.....	58
4.3.1	Referenzmodell Produktionsabfallrecycling.....	61

4.3.2	Referenzmodell Recycling im Produktgebrauch.....	68
4.3.3	Referenzmodell Recycling nach Produktgebrauch.....	71
4.4	Fazit.....	75
5	Implementierung und Erprobung.....	77
5.1	Demonstrator Kunststoffrecycling.....	77
5.1.1	Aufbau des Identifikationssystems.....	78
5.1.2	Aufbau des Positionierungssystems.....	81
5.1.3	Aufbau des Packstücknachverfolgungssystems.....	82
5.1.4	Warenlager- und Umschlagsplätze.....	84
5.1.5	Testergebnisse.....	86
5.1.6	Zusammenfassung.....	88
5.2	Demonstrator Elektronikgeräterecycling.....	88
5.2.1	Auswahl von Transpondern und Lesegerät.....	89
5.2.2	Aufbau des EPC-Systems.....	90
5.2.3	Testergebnisse.....	91
5.2.4	Zusammenfassung.....	93
5.3	Fazit.....	93
6	Evaluation der Ergebnisse.....	95
6.1	Evaluation am Beispiel Kunststoffrecycling.....	95
6.1.1	Beschreibung des Ist-Wareneingangsprozesses.....	96
6.1.2	Modellierung des RFID-Anwendungsszenarios.....	97
6.1.3	Ermittlung der Kennzahlen.....	97
6.1.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	99
6.1.5	Sensitivitätsanalyse.....	103
6.1.6	Zusammenfassung.....	103
6.2	Evaluation am Beispiel Elektronikgeräterecycling.....	104
6.3	Fazit.....	107
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	109
8	Abkürzungsverzeichnis.....	113
9	Glossar.....	115
10	Literatur-, Quellen-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	117
10.1	Literaturverzeichnis.....	117
10.2	Quellenverzeichnis.....	124
10.3	Weiterführende Literatur.....	125

---

10.4	Abbildungsverzeichnis.....	129
10.5	Tabellenverzeichnis.....	132
11	Anhang.....	135
11.1	Anhang IIB KrW-/AbfG Verwertungsverfahren.....	135
11.2	Testformular Demonstrator Kunststoffrecycling.....	136
11.3	Ist-Prozesskostenrechnung.....	137
11.4	Soll-Prozesskostenrechnung.....	138
11.5	Investitionsrechnung.....	139
11.6	Umweltbelastung durch den Einsatz der RFID-Technologie.....	140

---

## Zusammenfassung und Ausblick

Unternehmen müssen sich kontinuierlich weiterentwickeln, um die umweltorientierten und wirtschaftlichen Zielstellungen in der Kreislaufwirtschaft erfüllen zu können. Aufgrund gesetzlicher oder freiwilliger Rücknahmeverpflichtungen der Hersteller entstehen zusätzlich neue Herausforderungen an die den Produkten zugeordneten Informationen.

Ein hohes Potenzial zur Lösung dieser Herausforderungen bietet dafür die RFID-Technologie, die die Informationsverfügbarkeit zum einzelnen Produkt und dem dahinter stehenden Prozess verbessern kann. Eine Umsetzung dieser Technologie findet zurzeit in Distribution statt. Ein Integrationskonzept für die Redistribution von Produkten ist in dieser Arbeit entwickelt worden.

Hierfür wurde ein RFID-gestütztes Informationssystem konzipiert und entwickelt, das die Informationsverfügbarkeit zu den in der Rückführung befindlichen Gütern erhöht. Die in Kapitel 2 definierten Herausforderungen haben eine besondere Berücksichtigung gefunden. Diese waren im Einzelnen verbunden mit

- der Annahme, Kennzeichnung, Lagerung, Aufbereitung und dem Versand von Recyclinggütern, auch in schütt-, riesel- und fließfähiger Form,
- der Sortenreinheit von Recyclinggütern,
- dem Handling von Gefahrstoffen,
- unbekanntem Mengenströmen,
- unzureichenden Recycling- und Lagerkapazitäten,
- einer hohen Variantenvielfalt von Material, Behältern, Lagerungs- und Transportsystemen,
- der Erfassung von Mengenströmen zur Erfüllung von gesetzlichen Vorgaben wie dem ElektroG und der AltfahrzeugV sowie
- der Veröffentlichung von Produktinhaltsstoffen und Recyclinginformationen nach der EU-REACH-VO, dem ElektroG und der AltfahrzeugV.

Am Beispiel des Kunststoff-, und Elektronikgeräterecyclings wurden die Potenziale des Systems dargestellt und erprobt. Hierfür wurde unter anderem ein EPC-gestütztes Informationssystem verwendet.

---

Neu ist die schnittstellenoptimierte Integration aller Akteure im Rahmen des Rückführungsprozesses über ein Konzept, das Software, Hardware und Geschäftsprozesse auf Grundlage der RFID-Technik in einzelne Prozessschritte bündelt. Inkompatibilitäten werden dadurch minimiert und eine Integration in bestehende Systeme erleichtert. Durch die Betrachtung des gesamten Produktlebens, das heißt Herstellung, Gebrauch und Entsorgung, und daran gekoppelte Recyclingsysteme, konnte ein tragfähiges Konzept für die Redistributionslogistik ausgearbeitet werden. Dieses berücksichtigt auch Phasen, in denen das einzelne Produkt nicht mehr identifiziert werden kann (zum Beispiel nach dem Vermahlen zu Kunststoffmahlgut).

Durch den prozessorientierten Aufbau lässt sich das in dieser Arbeit entwickelte Modell flexibel an verschiedene Anwendungsbereiche in der Recyclingwirtschaft anpassen. Anhand der Demonstratoren konnte deren Funktionalität nachgewiesen werden.

Neben der technischen Machbarkeit muss auch die Wirtschaftlichkeit in der Betrachtung von RFID-Systemlösungen in der Redistributionslogistik untersucht werden. Deswegen wurde in dieser Arbeit ein Bewertungskonzept für RFID-Systemlösungen entwickelt, mit dem die Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit des Kunststoff- und Elektronikgeräterecyclings überprüft werden kann. Aus den daraus erhaltenen Ergebnissen konnte abgeleitet werden, dass bei den derzeitigen Logistikkosten eine erhöhte Wirtschaftlichkeit in der Redistributionslogistik realisierbar ist, wenn das Potenzial der RFID-Technologie ausgenutzt wird.

Wird das in dieser Arbeit entwickelte Informationssystem in die Unternehmensprozesse integriert, kann dieses in der Zukunft zu noch kostengünstigeren RFID-Anwendungen und einer nachhaltigeren Redistributionslogistik über standardisierte Geschäftsprozesse führen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich neuer Geschäftsmodelle, die sich über das in dieser Arbeit entwickelte Konzept bilden lassen. Produzierende Unternehmen dürfen sich nicht allein darauf beschränken, ein Produkt wirtschaftlich zu fertigen. Sie müssen auch über die Produktentstehungsphase hinaus, das heißt in der Nutzungs- und letztendlich auch Entsorgungsphase, zusätzliche Serviceleistungen mit anbieten, um konkurrenzfähig zu bleiben. Gesetzliche Anforderungen erweitern zusätzlich noch den Verantwortungsbereich der Unternehmen über die reine Entstehungsphase hinaus. Unternehmen müssen dieses als Chance verstehen und dafür die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten am Markt nutzen. Auf diese Weise können sich auch neue Geschäftsmodelle entwickeln. Ein Beispiel dafür ist der in dieser Arbeit genannte Logistikdienstleister, der unternehmensübergreifend über einheitliche Schnittstellen die Rückführprozesse kontrollieren und steuern kann. Hierdurch lassen sich auch Systeme wirtschaftlich realisieren, die einen Beitrag zum Umweltschutz darstellen können (Beispiel kombinierter Verkehr, siehe Abbildung 29).

Eine Weiterentwicklung zu der in dieser Arbeit vorgestellten Systemumgebung sind hybride Systeme, die die Möglichkeit einer Kopplung individueller, physischer logistischer Einheiten mit digitalen Repräsentationen in entsprechenden Informationssystemen bieten. Dieses erlaubt die Verwirklichung einer „Hybriden Welt“, in der reale und virtuelle Objekte zur Optimierung von Prozessen entlang des Produktlebenszyklus sowie zur Gestaltung von produkterweiternden Diensten herangezogen werden können (siehe Beispiel in Abbildung 53).

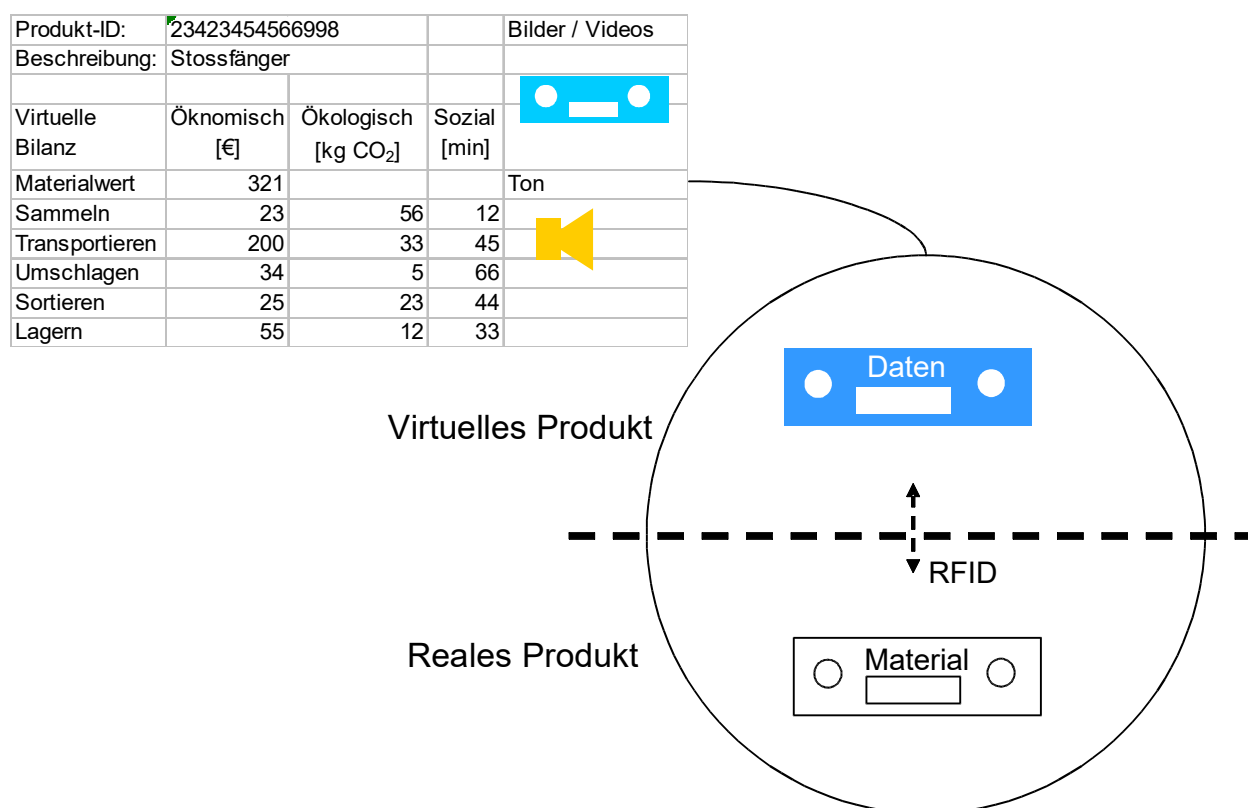


Abbildung 53: Virtuelle und reale Repräsentation von Produkten

Neben einer Abbildung herkömmlicher Produktinformationen, wie zum Beispiel Baupläne und Stücklisten, sind für das Konzept der hybriden Welt eine möglichst zeitnahe, detailreiche Erfassung von objektrelevanten Kontextinformationen von Bedeutung. Zu diesem Zweck können diese logistischen Einheiten mit entsprechender Sensorik ausgestattet werden, um Informationen bezüglich ihres Zustandes sowie ihrer Umgebung zu erfassen. Auf dieser Weise wird eine genaue, zeitnahe digitale Repräsentation realisiert (Hans, Hribernik, Schnatmeyer, Thoben 2006, S. 33).