

cct Steglitz GmbH (Bewilligungsempfänger), Leibniz Universität Hannover  
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Coal Control Gesellschaft  
für Automation mbH

**Ressourceneffizienzsteigerung durch Entwicklung  
einer ressourcenreinen Auftrennung der Verbundwerkstoffstruktur  
von Stahlseilfördergurten als Voraussetzung des Aufbaus einer kreislaufwirt-  
schaftlichen Returnprozesskette**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 30795 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Bernd Böck<sup>1</sup>, Pieter ter Haar<sup>1</sup>, Ludger Overmeyer<sup>2</sup>,  
Stephan von Daacke<sup>2</sup> & Ronald Salzmann<sup>3</sup>

<sup>1</sup> cct Steglitz GmbH / Pyrolyx AG

<sup>2</sup> Institut für Transport- und Automatisierungstechnik

<sup>3</sup> Coal Control Gesellschaft für Automation mbH

Möckern

März 2017

**Dieser Abschlussbericht kann beim Bewilligungsempfänger bezogen werden.**

cct Steglitz GmbH (Bewilligungsempfänger), Leibniz Universität Hannover  
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Coal Control Gesellschaft  
für Automation mbH

**Ressourceneffizienzsteigerung durch Entwicklung  
einer ressourcenreinen Auftrennung der Verbundwerkstoffstruktur  
von Stahlseilfördergurten als Voraussetzung des Aufbaus einer kreislaufwirt-  
schaftlichen Returnprozesskette**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 30795 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Bernd Böck<sup>1</sup>, Pieter ter Haar<sup>1</sup>, Ludger Overmeyer<sup>2</sup>,  
Stephan von Daacke<sup>2</sup> & Ronald Salzmänn<sup>3</sup>

<sup>1</sup> cct Steglitz GmbH / Pyrolyx AG

<sup>2</sup> Institut für Transport- und Automatisierungstechnik

<sup>3</sup> Coal Control Gesellschaft für Automation mbH

Möckern

März 2017

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>30795/01</b>	Referat	<b>21/0</b>	Fördersumme	<b>389.800 €</b>
----	-----------------	---------	-------------	-------------	------------------

**Antragstitel**                      **Ressourceneffizienzsteigerung durch Entwicklung einer ressourcenreinen Auftrennung der Verbundwerkstoffstruktur von Stahlseilfördergurten als Voraussetzung des Aufbaus einer kreislaufwirtschaftlichen Returnprozesskette.**

**Stichworte**

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>21,5 Monate</b>	<b>16.03.2015</b>	<b>31.12.2016</b>	-

Zwischenberichte	09.09.2015	15.04.2016	30.09.2016
------------------	------------	------------	------------

<b>Bewilligungsempfänger</b>	cct Stegelitz GmbH Dammfeld 8, D-39291 Möckern OT Stegelitz	Tel	089/856335-54
		Fax	
		Projektleitung	Dr. Bernd Böck
		Bearbeiter	Pieter ter Haar, Stephan v. Daacke, Ronald Salzmann

**Kooperationspartner**

- Coal Control Gesellschaft für Automation mbH, Reisholzstraße 15, D-40721 Hilden
- Leibniz Universität Hannover, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, An der Universität 2, D-30823 Garbsen

***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Der Transport von Schüttgütern mit Gurtförderanlagen ist eine der wirtschaftlichsten Methoden für den Materialtransport bei der Förderung und Gewinnung von Rohstoffen. Bei Erreichen der Lebensdauer eines Fördergurtes ist dessen Aufbereitung nur zu einem begrenzten Grad durchführbar. Viele der nicht mehr durch Runderneuerung reparierbaren und somit abgereiften Gurte werden verbrannt, was eine Umweltbelastung darstellt. Die Ziele dieses Forschungsprojekts sind die Machbarkeitsstudie und die anschließende Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Auftrennung eines Stahlseilfördergurtes in seine Einzelbestandteile sowie deren Wiederverwendung mittels Rückführung des zurückgewonnenen rCBs in die Prozesskette zur Fördergurterstellung und -erneuerung. Dies soll unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Aspekte untersucht werden. Auf Grundlage der Erkenntnisse dieses Projekts soll mittelfristig auch die Überführung der bisherigen Fördergurtentsorgung in den entstandenen Recycling-Kreislauf realisiert werden. Die Projektteilnehmer möchten durch Bereitstellung einer ökonomisch und ökologisch belastbaren Alternative zur Fördergurtverbrennung die Verschwendung von Rohstoffen sowie den aus der thermischen Verwertung resultierenden CO<sub>2</sub>-Ausstoß signifikant reduzieren.

***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Es wird ein Pyrolyseprozess eingesetzt um die Rohstoffe des Altfördergurtes zurückzugewinnen. Bei der mittels eines Batch-Verfahrens durchgeführten pyrolytischen Zersetzung erfolgt die thermochemische Spaltung der Fördergurte in die einzelnen Rohstoffe recovered Carbon Black (rCB, Pyrolyseöl, Stahl und Pyrolysegas. Die dabei gewonnenen Produkte, insbesondere rCB, werden gemäß den in der konventionellen Carbon Black Industrie sowie der daraus abgeleiteten rCB-Industrie üblichen ASTM-Methoden auf die Spezifikationsanforderungen untersucht und entsprechend des Recycling-Gedankens in die Prozesskette der Fördergurterstellung zurückgeführt. Die mit Hilfe der zurückgewonnenen Ruße hergestellten Fördergurte sind in Hinblick auf ihre Eigenschaften zu untersuchen und konventionell hergestellten Fördergurten gegenüberzustellen.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Im Rahmen des Projektes ist eine Machbarkeitsstudie durchgeführt worden, welche die ökonomischen, ökologischen und technischen Aspekte der Pyrolyse von Fördergurten beinhaltet. Hierzu werden Fördergurte entsprechend pyrolysiert und erfolgreich in ihre Einzelbestandteile (Füllstoff, Stahl, Organische Komponenten) zerlegt werden. Das dabei zurückgewonnene rCB wird anschließend durch chemische, physikalische und materialwissenschaftliche Untersuchung ausführlich klassifiziert. Hierbei zeigt sich, dass in Abhängigkeit des zugeführten Fördergurtes eine gewisse Diskrepanz der Resultate bezüglich der in der Produktion verwendeten Füllstoffe und Mengenanteile aufweisen. Die Untersuchungen zeigen auch, dass man - im Vergleich zu handelsüblichen altreifenbasierten rCB - bei der Pyrolyse von Stahlseilfördergurten einen grob vergleichbaren Anteil an organischen Material (Öl & Gas), einen höheren Stahlanteil, jedoch einen um ca.  $10 \pm 2$  % niedrigeren Rohcarbonanteil, erhält. Das nach Aufarbeitung und Veredelung erhaltene perlierte fördergurtbasierte rCB ist von einer Qualität, welche mit aus Altreifen gewonnenen rCB als übereinstimmend betrachtet werden kann. Im Vergleich zu konventionell hergestellten CBs weisen die fördergurtbasierten rCBs ähnlich wie alle rCBs feedstockbedingt einen höheren Anteil an mineralischen und metallischen Komponenten auf. Positiv hervorzuheben ist jedoch der im Vergleich zu konventionell hergestellten Füllstoffen signifikant geringere Anteil an giftigen PAKs (Werte zwischen 5 und 25 %). Die entstandenen rCBs werden innerhalb der Kreislaufwirtschaft in die Produktion von Fördergurtproben zurückgeführt. Dabei werden Muster von Fördergurtcompounds hergestellt, diese aus technischer Sicht auf deren Eigenschaften geprüft und einer konventionellen Fördergurtprobe mit ausschließlicher Verwendung von CB gegenübergestellt. Bei den Untersuchungen wird der Mengenanteil an verwendeten rCB bis hin zu einem vollständigen Ersatz (100 % rCB, 0 % CB) entsprechend variiert. Es zeigt sich, dass in Bezug auf die technischen Anforderungen ein Ersatz des CBs durch rCB von bis zu 100 % für Skim Compounds möglich ist. Die Verwendung von rCB im Core Compound bzw. innerhalb des Cover Compounds ist grundlegend möglich, jedoch nur bis zu einem Mengenanteils von etwa 25 %. Es ist hier allerdings zu erwähnen, dass die Vergleichsmaterialien bewusst von äußerst hoher Leistungsfähigkeit gewählt sind und es durchaus auch weniger anspruchsvolle Core Compounds gibt, bei denen der erwartete Anteil an rCB höher sein sollte. Bezugnehmend auf die Verschleißuntersuchungen zeigt sich ein positiver Effekt unter der Verwendung des rCBs, da hierdurch die Schnittfestigkeit nur unwesentlich beeinflusst wird, wohingegen die Abrasionsbeständigkeit sogar Verbesserung gegenüber dem Verhalten konventioneller CBs aufweist. Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wird der Pyrolyseprozess zur Zersetzung von Fördergurten dem der Zersetzung von Altreifen gegenübergestellt. Hieraus ergibt sich bei der ökologischen Bilanzierung auf Basis des Energieverbrauches ein zusätzlicher Verbrauch von etwa  $20 \pm 5$  % bei der Pyrolyse von Fördergurten zur Erzeugung einer Tonne rCB. Hinsichtlich der ökonomischen Bilanzierung zeigt sich ebenfalls eine ausbaufähige Tendenz im Vergleich der beiden Ausgangsmaterialien Fördergurt und Altreifen. Hierbei zeigt sich ein niedrigerer operativer Gewinn für rCBs aus Fördergurten im Vergleich zu altreifenbasierten rCBs. Die wirtschaftliche Bilanzierung beinhaltet jedoch nicht anfallenden Entsorgungskosten der Hersteller und Anwender, welche sich innerhalb einer kreislaufwirtschaftlichen Prozesskette durch die Senkung der Beschaffungskosten des Neufördergurtes unter Verwendung von rCB bilanzieren lassen. Eine gezielte Auswahl an Fördergurten in Bezug auf deren Aufbau, wie zum Beispiel ein hoher Füllstoffanteil oder ein textiler Zugträger kann ebenfalls zu einer deutlichen Verbesserung der ökonomischen Bilanz führen.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Von Seiten des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik der Leibniz Universität Hannover ist eine zeitnahe Veröffentlichung der Ergebnisse in einem Fachjournal geplant.

## **Fazit**

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass das durch die Pyrolyse von Fördergurten gewonnene rCB aus großtechnischer Sicht erfolgreich möglich ist und durch Rückführung dieses ressourcen- und umweltschonenden Recyclingmaterials in den Fördergurtzyklus eine hervorragende Alternative zu konventionellen CBs im Bereich der Herstellung von Fördergurten darstellt. Positiv zu erwähnen ist auch, dass bei der Verwendung von rCB in der Herstellung neuer Fördergurte im Vergleich zum Einsatz konventioneller Füllstoffe keine höheren Energieeinsätze oder Kosten (z.B. durch Anpassung von Mischanlagen etc.) zu erwarten sind. Die ökonomischen und ökologischen Aspekte bei der Herstellung von rCB können durch gezielte Auswahl des verwendeten Fördergurtes als Ausgangsmaterial noch weiter positiv beeinflusst werden, wodurch die Umsetzung einer kreislaufwirtschaftlichen Returnprozesskette von Fördergurten ermöglicht wird.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	8
Verzeichnis von Begriffen, Definitionen und Formelzeichen.....	9
1 Zusammenfassung.....	11
2 Einleitung.....	12
3 Hauptteil.....	16
3.1 Analyse.....	16
3.1.1 Pyrolyse von Altfördergurten.....	16
3.1.2 Klassifizierung der Prozessprodukte.....	18
3.1.3 Erstellung des Lastenheftes.....	22
3.1.3.1 Prozessparameter.....	22
3.1.3.2 Wicklungsgeometrie.....	24
3.1.3.3 Reaktordesign.....	24
3.2 Umsetzung.....	25
3.2.1 Verwertung von Altfördergurten.....	25
3.2.1.1 Pyrolysieren von Fördergurten.....	25
3.2.1.2 Prozessprodukte aufbereiten und untersuchen.....	28
3.2.2 Herstellung von aufbereiteten Fördergurten.....	35
3.2.2.1 Einsatz der Füllstoffe aus 3.2 zur Aufbereitung und Ermittlung der Mengenmischverhältnisse.....	35
3.2.2.2 Herstellung von Prüfgurten und Probekörpern.....	36
3.3 Verifikation und Anpassung.....	36
3.3.1 Praxisnahe Eigenschaftsermittlung der Fördergurte.....	36
3.3.1.1 Ermittlung der Schnittfestigkeit.....	37
3.3.1.2 Ermittlung der Verschleißbeständigkeit.....	45
3.3.1.3 Analyse der Messergebnisse.....	48
3.3.1.4 Ermittlung der Seilausreißfestigkeit, des Eindrückrollwiderstandes und Verbindungsprüfung nach DIN 22110-3.....	49
3.3.2 Wirtschaftlichkeitsprüfung.....	49
3.3.2.1 Energiebilanzierung des Verfahrens.....	50
3.3.2.2 Kostenbilanzierung des Gesamtverfahrens.....	50
4 Fazit.....	56
Literaturverzeichnis.....	58
Anhänge.....	59

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2-1:</b> Grundaufbau eines Stahlseilfördergurtes [Kel06] .....	12
<b>Abbildung 2-2:</b> Verschleiß und Schadensursachen sowie deren Entstehungsorte [WO08] .....	13
<b>Abbildung 2-3:</b> Prozessprodukte der Altreifenpyrolyse (Sonstiges = Wasser und Schwebstoffe) .....	14
<b>Abbildung 3-1:</b> Pyrolysekörbe befüllt mit kompletten Stahlseilfördergurten. ....	26
<b>Abbildung 3-2:</b> Rohcarbon und Stahl unmittelbar nach der Pyrolyse .....	27
<b>Abbildung 3-3:</b> Pelletgrößenverteilung von P62. ....	32
<b>Abbildung 3-5:</b> Aufbau des Pendelschlagwerkes [WO08].....	37
<b>Abbildung 3-6:</b> Messkopf des Pendelschlagwerkes [WO08].....	37
<b>Abbildung 3-7:</b> Abmessungen und Messgrößen am Pendelschlagwerk [WO08].....	38
<b>Abbildung 3-8:</b> Charakteristische Verläufe ausgewählter Größen beim Schnittvorgang [WO08].....	41
<b>Abbildung 3-9:</b> Kraft-Weg-Diagramm [WO08].....	43
<b>Abbildung 3-10:</b> Reproduzierbarkeit der Untersuchungen zur Schnittfestigkeit [WO08]. ....	43
<b>Abbildung 3-11:</b> Vergleich der gemittelten Resultate der unterschiedlichen Proben typen der Serie 1. ....	45
<b>Abbildung 3-12:</b> Vergleich der gemittelten Resultate der unterschiedlichen Proben typen der Serie 2. ....	45
<b>Abbildung 3-13:</b> Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN ISO 4649 und dem Strahlverfahren für unterschiedliche Deckplattenwerkstoffe [WO08] .....	46
<b>Abbildung 3-14:</b> Versuchsaufbau zur Untersuchung des abrasiven Verschleißes mittels Strahlverfahren an Fördergurtproben [WO08].....	46
<b>Abbildung 3-15:</b> Exemplarisches Versuchsergebnis zur Untersuchung der Abrasionsbeständigkeit einer Fördergurtprobe [WO08].....	47
<b>Abbildung 3-16:</b> Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Schnittfestigkeits- und Abrasionsuntersuchung der untersuchten Proben der Serie 1 (Skim Compound). ....	48
<b>Abbildung 3-17:</b> Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Schnittfestigkeits- und Abrasionsuntersuchung der untersuchten Proben der Serie 2 (Cover Compound). ....	49
<b>Abbildung A1-1:</b> Geometrie und Befüllung eines Pyrolysekorbs (oben). Aufbau und Funktionsprinzip eines Pyrolyseofens (unten). ....	59
<b>Abbildung A2-1:</b> Kraft-Weg-Diagramm Probe „Referenz“ Serie 1. ....	60
<b>Abbildung A2-2:</b> Kraft-Weg-Diagramm Probe „17 % rCB“ Serie 1.....	60
<b>Abbildung A2-3:</b> Kraft-Weg-Diagramm Probe „33 % rCB“ Serie 1.....	61
<b>Abbildung A2-4:</b> Kraft-Weg-Diagramm Probe „66 % rCB“ Serie 1.....	61
<b>Abbildung A2-5:</b> Kraft-Weg-Diagramm Probe „100 % rCB“ Serie1. ....	62
<b>Abbildung A2-6:</b> Kraft-Weg-Diagramm „Referenz“ Serie 2. ....	62
<b>Abbildung A2-7:</b> Kraft-Weg-Diagramm „18 % rCB“ Serie 2.....	63
<b>Abbildung A2-8:</b> Kraft-Weg-Diagramm „50 % rCB“ Serie 2.....	63
<b>Abbildung A2-9:</b> Kraft-Weg-Diagramm „100 % rCB“ Serie 2.....	64

# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 3-1:</b>	<i>Ergebnisse der Laboruntersuchung einer Fördergurtprobe (250g).....</i>	<i>16</i>
<b>Tabelle 3-2:</b>	<i>Ergebnisse der Voruntersuchungen verschiedener Fördergurtqualitäten. ....</i>	<i>19</i>
<b>Tabelle 3-3:</b>	<i>Verhältnis der Ausbeuten von Rohcarbon zu Öl, Gas und Wasser. ....</i>	<i>20</i>
<b>Tabelle 3-4:</b>	<i>Metallgehalte der beiden Fördergurtmuster. ....</i>	<i>21</i>
<b>Tabelle 3-5:</b>	<i>Rohausbeuten der industriellen Fördergurtpyrolyse (P62) im Vergleich mit den Laborversuchen und der Pyrolyse von Altreifen.....</i>	<i>26</i>
<b>Tabelle 3-6:</b>	<i>Analytik von P62 (Rohcarbon).....</i>	<i>29</i>
<b>Tabelle 3-7:</b>	<i>Analytik von P62 (Fluffy). ....</i>	<i>30</i>
<b>Tabelle 3-8:</b>	<i>Analysezertifikat von P62 (Pellets).....</i>	<i>30</i>
<b>Tabelle 3-9:</b>	<i>PAK-Werte von P62 (Pellets) im Vergleich mit altreifenbasierten cct-6400 und konventionellen CB (N650).....</i>	<i>31</i>
<b>Tabelle 3-10:</b>	<i>Ausgewählte, relevante Pelletgrößenparameter von P62. ....</i>	<i>32</i>
<b>Tabelle 3-11:</b>	<i>Organische Elementanalyse und Metallgehalte von P62-Pellets im Vergleich mit altreifenbasierten rCB (cct-6400) und konventionellen CB (N660). ....</i>	<i>34</i>
<b>Tabelle 3-12:</b>	<i>Vergleich der untersuchten Compounds. ....</i>	<i>35</i>
<b>Tabelle 3-13:</b>	<i>Kenngrößen des Pendelschlagwerks bei verschiedenen Auslösehöhen [WO08]. ....</i>	<i>40</i>
<b>Tabelle 3-14:</b>	<i>Phasen des Schnittvorgangs [WO08]. ....</i>	<i>42</i>
<b>Tabelle 3-16:</b>	<i>Ergebnisse der abrasiven Untersuchungen Serie 1. ....</i>	<i>47</i>
<b>Tabelle 3-17:</b>	<i>Ergebnisse der abrasiven Untersuchungen Serie 2. ....</i>	<i>48</i>
<b>Tabelle 3-18:</b>	<i>Ausbeuten der Pyrolyse von Stahlseilfördergurten verglichen mit entsprechenden Ausbeuten einer Altreifenpyrolyse.....</i>	<i>52</i>
<b>Tabelle 3-19:</b>	<i>Erlöse bzw. Aufwendungen pro Tonne Ausgangsmaterial- bzw. Produkte. ....</i>	<i>52</i>
<b>Tabelle 3-20:</b>	<i>Generierbare Erlöse der einzelnen Produkte pro Tonne Inputmaterial. ....</i>	<i>53</i>
<b>Tabelle 3-21:</b>	<i>Massenbilanz pro erzeugter Tonne rCB. ....</i>	<i>53</i>
<b>Tabelle 3-22:</b>	<i>Bilanzierung von "Erlöse vs. Aufwendungen" pro erzeugter Tonne rCB. ....</i>	<i>53</i>



# Verzeichnis von Begriffen, Definitionen und Formelzeichen

Akronym	Bedeutung
% Tr.	Prozent Transmission
ASTM	American Society for Testing of Materials
BET	Totale spezifische Oberfläche (Bestimmung der gesamten spezifischen Oberfläche durch Stickstoffadsorption nach <u>B</u> runauer, <u>E</u> mmett und <u>T</u> eller)
CB	Carbon Black
CBFO	Carbon Black Feedstock Oil
cct	cct Stegelitz GmbH (ehemals <u>C</u> arbon <u>C</u> lean <u>T</u> ech)
cct-6400	Standard rCB aus Altreifen der Fa. cct
Compound	Gummimischung für Fördergurte
Core	Kerngummi für Stahlseilfördergurte
Cover	Deckplattengummi für Fördergurte
EBITDA	Earnings before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization (Gewinn vor Zinsen, Steuern, Abschreibungen auf Sachanlagen und Abschreibungen auf immaterielle Vermögensgegenstände)
EPA	Environmental Protection Agency (US-Umweltschutzbehörde)
EU	Europäische Union
FDA	Food and Drug Administration (US-Behörde für Lebens- und Arzneimittel)
FGH	Fördergurthersteller
Fluffy	fein gemahlene Material
Gew.-%	Gewichtsprozent
Grünpellets	pelletierte, aber noch nicht getrocknete Pellets
ITA	Institut für Transport- und Automatisierungstechnik d. Leibniz Universität Hannover
Karkasse	Kerngummi mit Stahlseilen oder Textilgewebe
Laufseite	Untere, dem Schüttgut abgewandte Seite des Fördergurtes

<b>Akronym</b>	<b>Bedeutung</b>
n/a	not applicable (nicht anwendbar)
OAN	Oil Adsorption Number (Öladsorptionszahl)
PAK	Polyaromatische Kohlenwasserstoffe
ppm	parts per million
PSA	Partikelgrößenverteilung
rCB	recovered Carbon Black
Skim	Kerngummi für Textilfördergurte
St	Stahl
STSA	Statistical thickness surface area (Bestimmung der spezifischen Oberfläche durch Stickstoffadsorption exkl. aller Poren < 2nm)
Tragseite	Obere, dem Schüttgut zugewandte Seite des Fördergurtes
Void Volume	Porenvolumen (Strukturbestimmung für Füllstoffe)

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$E_{kin}$	J	kinetische Energie
$F_R$	N	Radialkraft
$F_t$	N	Tangentialkraft
$J_0$	kgm <sup>2</sup>	Trägheitsmoment
$J_S$	kgm <sup>2</sup>	Trägheitsmoment des Schwerpunktes
$m_p$	kg	Masse des Pendels
$r$	mm	Radius des Kreisbogens
$r_{SP}$	mm	Radius des Kreisbogens des Schwerpunktes
$s$	mm	Weg
$t_s$	mm	Schnittweg
$v$	m/s	Bahngeschwindigkeit
w/w	%	Gewichtsprozent
$W_S$	J	Arbeit
$\varphi$	°	Auslenkwinkel

# 1 Zusammenfassung

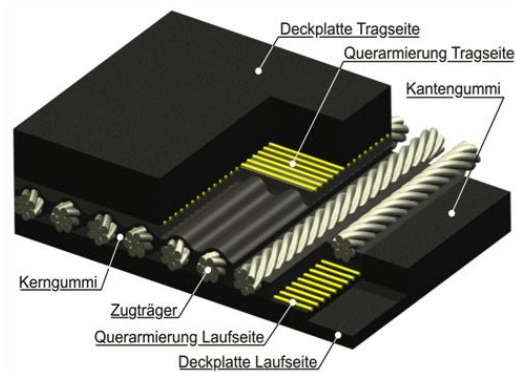
Im Rahmen der durchgeführten Machbarkeitsstudie werden Stahlseilfördergurte mittels eines Pyrolyseverfahrens thermisch zersetzt. Hierdurch soll die derzeitige umweltbelastende Verbrennung abgelegener Fördergurte und die hiermit einhergehende Verschwendung von Ressourcen vermieden werden. Die durch das Pyrolyseverfahren gewonnenen Prozessprodukte sollen in einer kreislaufwirtschaftlichen Rückführung zur Herstellung von Fördergurten genutzt werden. Die Studie umfasst die Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Aspekte, um eine lukrative Kreislaufwirtschaft für Fördergurte zu ermöglichen.

Es konnten erfolgreich Stahlseilfördergurte mittels Pyrolyse in ihre Einzelbestandteile zerlegt werden. Die zurückgewonnenen Industrieruße werden anschließend durch chemische, physikalische und materialwissenschaftliche Untersuchung ausführlich klassifiziert. Das nach Aufarbeitung und Veredelung erhaltene perlierte fördergurtbasierte rCB ist von einer Qualität, welche mit aus Altreifen gewonnenen rCB als übereinstimmend betrachtet werden kann. Positiv hervorzuheben ist der im Vergleich zu konventionell hergestellten Füllstoffen signifikant geringere Anteil an giftigen Polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAKs). Die entstandenen rCBs werden innerhalb der Kreislaufwirtschaft in die Produktion von Fördergurtproben zurückgeführt. Bei den Untersuchungen gegenüber konventionellen Fördergurtproben wird der Mengenanteil an verwendeten rCB bis hin zu einem vollständigen Ersatz entsprechend variiert. Es zeigt sich, dass in Bezug auf die technischen Anforderungen ein Ersatz des CBs durch rCB von bis zu 100 % möglich ist. Bezugnehmend auf die Verschleißuntersuchungen zeigt sich ein positiver Effekt unter der Verwendung des rCBs. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit wird der Pyrolyseprozess von Fördergurten dem der von Altreifen gegenübergestellt. Hieraus ergibt sich bei der ökologischen Bilanzierung auf Basis des Energieverbrauches ein zusätzlicher Verbrauch von etwa  $20 \pm 5$  %. Hinsichtlich der ökonomischen Bilanzierung erhält man - im Vergleich zu altreifenbasierten rCBs - einen niedrigeren operativen Gewinn für rCBs aus Fördergurten. Die ökonomischen und ökologischen Aspekte bei der Herstellung von rCB können durch gezielte Auswahl des verwendeten Fördergurtes als Ausgangsmaterial aber noch weiter positiv beeinflusst werden, wodurch die Umsetzung einer kreislaufwirtschaftlichen Returnprozesskette von Fördergurten ermöglicht werden kann.

Das Forschungsprojekt wurde in Kooperation mit dem Institut für Transport- und Automatisierungstechnik der Leibniz Universität Hannover sowie der Coal Control Gesellschaft für Automation mbH durchgeführt. In einem projektbegleitenden Ausschuss waren die Firmen RWE Power AG und die Semperit Technische Produkte Ges.m.b.H. vertreten. Das Projekt wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (AZ: 30795) gefördert.

## 2 Einleitung

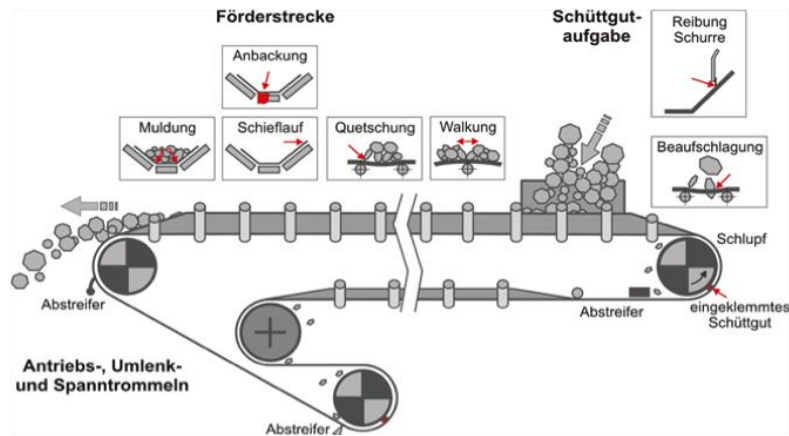
Bei der Förderung und Gewinnung von Rohstoffen sind Gurtförderanlagen eine der wirtschaftlichsten Methoden für den Materialtransport der geförderten Schüttgüter. Deshalb bevorzugen viele Bergwerksbetreiber Gurtförderanlagen, anstatt den Schüttguttransport mit Muldenkippern durchzuführen. Dabei zeigt sich in den letzten Jahren der Trend, dass - bedingt durch den steigenden Bedarf an Rohstoffen und den parallel schlechter werdenden Ertragsverhältnisse in den Abbaugebieten - die Dimensionen der Förderanlagen sowohl in ihrer Breite aber vor allem auch in der Länge ihrer Förderstrecke kontinuierlich wachsen. Die Kernkomponente einer Gurtförderanlage ist der Fördergurt, welcher als transportierendes Medium fungiert. Der grundlegende Aufbau eines solchen Stahlseilfördergurtes ist in Abbildung 2-1 dargestellt.



**Abbildung 2-1:** Grundaufbau eines Stahlseilfördergurtes [Kel06]

Die Hauptkomponenten des Fördergurtes sind die als Zugträger fungierenden Stahlseile, die Querarmierung zum Schutz der Seile vor äußeren Einflüssen, das umgebende Elastomer in Form von Kerngummi sowie die lauf- und trageitigem Deckplattengummis. Während seiner Betriebszeit unterliegt das Elastomer des Fördergurtes einem Verschleiß, der die Lebensdauer des Gurtes limitiert. Abbildung 2-2 stellt die Ursachen und Entstehungsorte für abrasive Beanspruchungen an unterschiedlichen Stellen einer Gurtförderanlage dar. Der größte Teil des abrasiven Verschleißes tritt dabei am außen liegenden Deckplattengummi auf. Der Kern des Gurtes bleibt häufig unberührt und kann somit bis zu einem gewissen Grad wiederverwendet werden. Hierzu besteht die Möglichkeit, die lauf- und trageitigen Deckplattengummis von der Karkasse abzutrennen und neuwertige Deckplatten aufzuvulkanisieren. Dies ist allerdings nur bis zu einem begrenzten Verschleißgrad des Fördergurtes möglich. Zudem kann das Kerngummi nicht beliebig oft vulkanisiert werden, da ansonsten eine Übervulkanisation eintritt, welche zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des Elastomers und zu einem unvorhersehbaren Ausfall des Fördergurtes führt. Zudem wird die Rückgewinnung der Rohstoffe von Fördergurten durch dessen Herstellungsprozess erschwert, da die als Zugträger im Fördergurt eingebetteten Stahlseile vollständig vom Elastomer durchdrungen werden, um einen Korrosionsschutz innerhalb der Stahlseile und eine Haftung zwischen den Stahlseilen und dem umgebenden Elastomer zu erzielen. Eine anschließende rein mechanische Trennung dieser beiden Komponenten ist daher bisher nicht gelungen.

Infolge der abrasiven Eigenschaften des Schüttgutes unterliegt der Fördergurt im Betrieb einem hohen Verschleiß, wodurch seine Lebensdauer limitiert ist. Durch die steigenden Dimensionen der Fördergurte entstehen somit jährlich mehrere tausend Tonnen Altfördergurte. Da die anschließende



**Abbildung 2-2:** Verschleiß und Schadensursachen sowie deren Entstehungsorte [WO08]

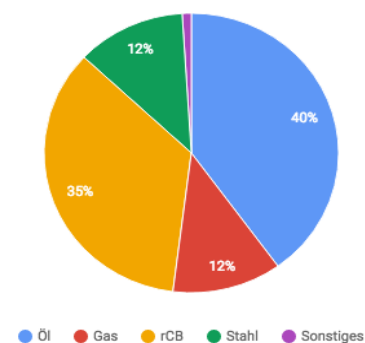
ende Aufbereitung von Fördergurten derzeit nur zu einem begrenzten Grad durchführbar ist, wurde und wird z.T. immer noch ein signifikanter Teil der weltweit angelegten und verschlissenen Fördergurte aufgrund von fehlenden Entsorgungsmöglichkeiten in den Abbaugebieten des Berg- und Tagebaus verschüttet [Bac08]. In Europa ist diese ökologisch bedenkliche Entsorgungsmethode seit Ende des Jahres 2011 gesetzlich verboten, wodurch ein dringender Handlungsbedarf bezüglich einer sachgemäßen Rohstoffrückgewinnung von verschlissenen Fördergurten besteht. Trotz der Einführung des veränderten Abfallentsorgungsgesetzes, das Fördergurte nicht weiter als bergbaulichen Abfall wertet, werden abgelegte Gurte derzeit nur zu einem geringen Prozentsatz anderweitig stofflich wiederverwendet. Beispielsweise werden sie in der Landwirtschaft als Abgrenzung eingesetzt. Der Großteil der abgelegten Gurte wird jedoch zunächst unter erheblichem Energieaufwand durch entsprechend dimensionierte Schredder in tellergroße Stücke zerkleinert um dadurch überhaupt verwendbar für die anschließende thermische Verwertung (Verbrennung) in Heizkraft- oder Zementwerken zu sein. Aufgrund einer fehlenden Kreislaufwirtschaft stellt dies jedoch einerseits eine unwirtschaftliche und andererseits vor allem eine - aufgrund von erhöhten CO<sub>2</sub>-Emissionen und Rohstoffverschwendung - ökologisch nicht akzeptable Entsorgung dar. Bei der Verwertung von Altreifen der Fahrzeugindustrie, die eine ähnliche Materialzusammensetzung wie Stahlseilfördergurte aufweisen, werden daher bereits erste Anlagen betrieben, wodurch die enthaltenen Rohstoffe zurückgewonnen bzw. in wertvolle Alternativrohstoffe umgewandelt werden können.

Zur Realisierung einer ökonomischen und ökologischen Kreislaufwirtschaft für Stahlseilfördergurte bedarf es ebenfalls eines Verfahrens, welches die Rohstoffe von abgelegten Fördergurten sowie von bei der Runderneuerung von Fördergurten abgetrennten Deckplatten voneinander separiert. Die somit zurückgewonnenen Rohstoffe sollen im Anschluss wieder innerhalb der Fördergurterstellung bzw. der Runderneuerung von Fördergurten Verwendung finden. Weiterer Forschungsbedarf besteht bezüglich

der möglichen Handhabung, dem Transport und der Verarbeitung der abgelegten Fördergurte. Diese sollten möglichst im Ablegezustand verarbeitet werden können, um eine zusätzliche energieaufwändige Zerkleinerung zu vermeiden. Das Verfahren soll daher bevorzugt in der Lage sein, ganze Fördergurtwickel aufzutrennen und deren Rohstoffe nutzbar zu machen.

Das zu erforschende Verfahren zur Rückgewinnung der Fördergurtrohstoffe erfolgt unter Anwendung der Pyrolyse, da diese für das bereits erwähnte entsprechende Recycling von Altreifen bereits großtechnisch etabliert ist. Die Übertragbarkeit dieses Verfahrens auf das Recycling von Altfördergurten ist realistisch, jedoch auch mit nicht zu vernachlässigenden Risiken verbunden. So ist es z.B. möglich, dass das in Fördergurten enthaltene Metall sich nicht in der bestehenden Anlage von dem erhaltenen Rohcarbon trennen lässt und somit Schäden in der Anlage verursacht. Durch solche Schäden können erhebliche Kosten entstehen und auch einen Ausfall der Produktion verursachen. Bei der Pyrolyse handelt es sich generell um ein thermochemisches Verfahren, welches unter Ausschluss von Sauerstoff eine Zersetzung des zugeführten Materials hervorruft. Der Prozess erfolgt diskontinuierlich in einem sogenannten Batchreaktor. Dabei sind die Prozessparameter dem jeweiligen Fördergurtmaterial anzupassen, um eine homogene und vollständige Depolymerisation der organischen Bestandteile zu gewährleisten. Die entstehenden Prozessprodukte sind die Spaltprodukte des Elastomeres (Gas und Öl) sowie die Feststoffe bestehend aus den anorganischen Füllstoffen (rCB= recovered Carbon Black [AST15]) sowie den Stahlseilen. Die Qualität der Prozessprodukte kann über die Prozessparameter gesteuert werden. Die heißen Pyrolysedämpfe gelangen in ein Quenchsystem zur Kondensation und Kühlung. Hierbei entstehen ein gasförmiges und ein flüssiges Produkt. Das Gas bietet sich unter Verwendung geeigneter Technologien als Brennstoff zur anlagenseitigen Energieerzeugung an (Heizwert ca. 7 kWh/kg). Das Öl wird von Schwebstoffen und Wasserresten befreit und kann sowohl energetisch (Heizwert ca. 10 kWh/kg) als auch stofflich (z. B. als Rohstoff zur Synthesegaserzeugung) genutzt werden. Abbildung 2-3 zeigt typische prozentuale Gewichtsanteile der Prozessprodukte für die Pyrolyse von Fahrzeugreifen, welche den zu erwartenden Prozessprodukten des Fördergurtes ähnelt.

Bei der durchgeführten pyrolytischen Zersetzung des Fördergurtes sollen die einzelnen Rohstoffe v.a. Industrieruß (rCB) und Stahl zurückgewonnen werden können. Dabei wird das zurückgewonnene rCB entsprechend des Recycling-Gedankens im Anschluss in die Prozesskette der Fördergurtherstellung zurückgeführt. Dabei sollen die bei der Pyrolyse von Fördergurten entstandenen Feststoffe (Rohcarbon und Stahl) zunächst in



**Abbildung 2-3:** Prozessprodukte der Altreifenpyrolyse (Sonstiges = Wasser und Schwebstoffe)

metallische und nichtmetallische Stoffe getrennt werden. Das nichtmetallische, koksartige Rohcarbon wird durch weitere mechanische und thermische Verfahrensstufen, wie Vermahlung, Pelletierung und Trocknung, zu einem perlierten, marktgerechten Endprodukt veredelt. Vergleichbare Endprodukte werden bereits als Füllstoff bei der Gummi- und Kunststoffherstellung eingesetzt und können daher höchstwahrscheinlich sowohl bei der Neugurtherstellung als auch bei der Runderneuerung von Fördergurten Verwendung finden. Die Stahlseile können den etablierten Recyclingsystemen für Stahlschrott zugeführt werden.

Die mit Hilfe der zurückgewonnenen Ruße hergestellten Fördergurte sind in Hinblick auf ihre material-, anwendungs- und umwelttechnischen Eigenschaften zu untersuchen und konventionell hergestellten Fördergurten gegenüberzustellen. Unter anderem muss untersucht werden, ob die Qualität der entstehenden Rohstoffe eine erneute Verwendung innerhalb der Fördergurtherstellung ermöglicht, d.h. ihre Qualität gegenüber konventionell hergestellten Fördergurten nicht bzw. nur minimal vermindert wird. Dazu sollen umfassende Analysen in Bezug auf die Eigenschaften der mit den zurückgewonnenen rCB hergestellten Elastomere durchgeführt werden um Aussagen über die Güte des Verbundes zwischen Elastomer und Stahlseil und den Energieverbrauch einer Förderanlage treffen zu können.

Eine mögliche Fortführung wurde bereits vor Projektbeginn in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern sowie dem projektbegleitenden Ausschuss diskutiert. Dabei stehen die Fertigung von Neugurten, die Qualitätskonstanz bei mehrfach recycelten Fördergurten sowie die Optimierung der Energieeffizienz des gesamten Prozesses im Fokus. Dies ist Voraussetzung um das Verfahren für (zukünftige) Kunden attraktiv zu gestalten und somit die Marktakzeptanz zu erhöhen. Die cct bzw. die Konzernmutter Pyrolyx AG ist weltweit führend in der großindustriellen Herstellung von hochwertigem rCB und besitzt daher bereits ein sehr gutes Vertriebsnetzwerk um die erhaltenen Produkte seinen bestehenden und neuen Partner zum Kauf anbieten zu können.

Die Ziele dieses Forschungsprojekts sind die Machbarkeitsstudie und die anschließende Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Auftrennung eines Stahlseilfördergurtes in seine Einzelbestandteile sowie deren Wiederverwendung mittels Rückführung des zurückgewonnenen rCBs in die Prozesskette zur Fördergurtherstellung und -erneuerung. Dies soll unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Aspekte untersucht werden. Auf Grundlage der Erkenntnisse dieses Projekts soll mittelfristig auch die Überführung der bisherigen Fördergurtenentsorgung in den entstandenen Recycling-Kreislauf realisiert werden. Die Projektteilnehmer möchten durch Bereitstellung einer ökonomisch und ökologisch belastbaren Alternative zur Fördergurtverbrennung die Verschwendung von Rohstoffen sowie den aus der thermischen Verwertung resultierenden CO<sub>2</sub>-Ausstoß signifikant reduzieren.

## 3 Hauptteil

### 3.1 Analyse

#### 3.1.1 Pyrolyse von Altfördergurten

Bevor Technikums- und großtechnische Betriebsversuche durchgeführt werden können, werden Vorversuche im Labormaßstab an ausgewählten Fördergurten durchgeführt und die Ergebnisse bezüglich Homogenität und Vergleichbarkeit mit bisherigen rCB-Produkten untersucht.

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde bereits eine Stahlseilfördergurtprobe (250g), welche durch das ITA bereitgestellt worden ist, in der Industrieanlage der Firma cct im laufenden Betrieb zu einem Produktionsbatch des Altreifenrecyclings hinzugefügt. Um die Verunreinigung der Probe durch das umgebende Reifenmaterial zu vermeiden, wird ein separates Behältnis zur Aufnahme der Probe verwendet. Anschließend wird der Batchreaktor mit verschiedenen Spülgasen bestückt und entsprechend dem Standardtemperaturprogramm zur Verwertung von Altreifen für eine bestimmte Zeit unter Ausschluss von Sauerstoff erhitzt. Das erhaltene Rohcarbon wird anschließend im Labor der cct hinsichtlich der Zusammensetzung untersucht.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchung sind in Tabelle 3-1 aufgelistet.

Parameter	Einheit	Testmethode	Messwert	Vergleichswert Rohcarbon (Altreifen <sup>1</sup> ) (min - max)	
BET	m <sup>2</sup> /g	ASTM D6556	74,2	ca. 55 - 70 <sup>2</sup>	
STSA	m <sup>2</sup> /g	ASTM D6556	63,0	ca. 40 – 60 <sup>2</sup>	
Void Volume	cm <sup>3</sup> /100g	ASTM D6086	94,2	ca. 87 – 90 <sup>2</sup>	
Asche	% w/w	ASTM D1506	11,8	16	24
pH-Wert	-	ASTM D1512	8,9	7,5	9,5

**Tabelle 3-1:** Ergebnisse der Laboruntersuchung einer Fördergurtprobe (250g).

Die analytischen Ergebnisse der Voruntersuchungen zeigen, dass das Pyrolyseverfahren der Firma cct für die Verwertung von Fördergurten als sehr geeignet erscheint. Die Voruntersuchung zeigt vergleichbare bzw. zum Teil sogar bessere Ergebnisse verglichen mit der Pyrolyse von Altreifen. Der erhaltene Rohstoff kann hiernach potenziell für eine Wiederverwendung in der Gummiindustrie genutzt werden. Die erhaltenen

<sup>1</sup> PKW-Altreifen aus Deutschland.

<sup>2</sup> Es handelt sich hierbei um typische Werte, da diese Parameter für Rohcarbon nicht spezifiziert sind.



Oberflächenwerte (BET und STSA-Wert) zeigen, dass die hierbei erzeugten Rohcarbonen eine leicht vergrößerte Oberfläche als entsprechende altreifenbasierten Rohcarbonen aufweisen. Die BET- und STSA-Werte geben die spezifische Oberfläche des Rohcarbons wieder und damit prinzipiell die theoretisch maximal zur Verfügung stehende Kontaktfläche zur Wechselwirkung zwischen Füllstoff und Polymer. Dabei beschreibt die BET-Methode die gesamte spezifische Oberfläche inkl. aller Mikroporen<sup>3</sup> während die STSA-Messung lediglich die spezifische Oberfläche abzüglich der durch Mikroporen zustande kommenden Oberfläche offenlegt. Nur Letztere steht dem Polymer aufgrund dessen Abmessungen zur Wechselwirkung mit dem Füllstoff zur Verfügung, weshalb ein hoher STSA-Wert in der Regel ein Indikator für einen besser verstärkenden Füllstoff mit einer kleinen Primärpartikelgröße ist. Beide Parameter sind signifikant von der Primärpartikel und der Aggregatsgröße abhängig. Diese Parameter sind beim Rohcarbon von der Größenverteilung der Primärpartikel der ursprünglich enthaltenen CBs und der sich durch die Pyrolyse gebildeten Agglomerate abhängig. Vor allem Letztere sind im Rohcarbon noch deutlich größer, als dies im fertigen (gemahlene und verperlte) Material (rCB) der Fall ist, weshalb - auf der Stufe des Rohcarbons - nur ein Teil der eigentlich verfügbaren Oberfläche gemessen werden kann.

Aus der Differenz von BET und STSA-Wert lassen sich dennoch Rückschlüsse über die Qualität des Ausgangsprodukts ziehen. Je größer die Differenz ist, desto mikroporöser ist der Füllstoff. Wie bereits erwähnt, bringt ist der Anteil mikroporöser spezifischer Oberfläche allerdings keinen Beitrag zur Wechselwirkung und damit zur Verstärkungswirkung des Füllstoffs im fertigen Gummi bzw. Fördergurt.

Des Weiteren erhält man für dieses fördergurtbasierte Rohcarbon einen deutlich niedrigeren Ascheanteil als bei entsprechenden altreifenbasierten Rohcarbon. Der Ascheanteil erlaubt Rückschlüsse über die anorganischen, nicht kohlenstoffbasierten Bestandteile der Gummimischung des Fördergurts. Ein wesentlicher Bestandteil hierbei ist der Füllstoff Silica (Siliciumdioxid). Silica weist häufig eine sehr hohe spezifische Oberfläche auf und wird in der Gummiindustrie analog zu CB als verstärkender Füllstoff eingesetzt. Zusätzlich kann durch Silica-Zugabe der Rollwiderstand reduziert werden.

Ein geringerer Ascheanteil bedeutet nun folglich auch einen geringeren Silicaanteil. Da aber im fördergurtbasierten Rohcarbon dennoch eine hohe spezifische Oberfläche ermittelt werden kann, liegt der Schluss nahe, dass die im analysierten Fördergurt verwendeten CBs sehr hochwertiger Natur waren. Hochwertig in diesem Kontext bedeutet CBs mit - im Vergleich zu CBs in Altreifen - kleineren Primärpartikeln, da nur diese eine entsprechende hohe spezifische Oberfläche aufweisen.

---

<sup>3</sup> Mikroporen definieren sich als Poren mit einem Durchmesser von < 2 nm.

Die beschriebenen Beobachtungen würden - wenn diese im Verlauf des weiteren Projekts verifiziert werden können-, eine - im Vergleich zu altreifenbasierten rCB - bessere verstärkende Wirkung von fördergurtbasierten rCB implizieren und sich so positiv für die Wiederverwendung bei der Herstellung neuer Fördergurte auswirken.

Um all dies jedoch zu verifizieren, müssen weitere Untersuchungen zu dessen Verhalten in einer Polymermatrix durchgeführt werden und auch die Reproduzierbarkeit von verschiedenen Fördergurtepyrolysen gut untersucht werden. Des Weiteren muss ein detaillierter Aufarbeitungsprozess entwickelt werden um die Reinheit des Produkts weiter zu erhöhen und somit das Einsatzgebiet des fördergurtbasierten rCBs innerhalb der Industrie steigern zu können. Zudem muss der Pyrolyseprozess auf die unterschiedliche Kautschukmischung der Fördergurte eingestellt werden, um eine möglichst hochqualitative Pyrolyse durchführen zu können. Nur so kann gewährleistet werden, dass der erhaltene Ruß genügend Aktivität besitzt mit der Polymermatrix interagieren zu können.

### **3.1.2 Klassifizierung der Prozessprodukte**

Im nächsten Schritt werden neuwertige Stahlseilfördergurtproben von zwei renommierten Herstellern in einem Technikumsversuch pyrolysiert um detaillierte Informationen über Ausbeuten und Qualität der zurückgewonnenen Stoffe zu erhalten.

Hierzu werden die Massenbilanz der Pyrolyse berechnet und grundlegende Analysen des erhaltenen Rohcarbons durchgeführt (Aschegehalt, spez. Oberflächen, Strukturmessungen<sup>4</sup>, pH-Wert und Toluolverfärbung). Ziel hierbei ist es Informationen über mögliche Schwankungen im rCB-Anteil und im Gehalt der Asche bei verschiedenen Fördergurten zu erhalten. Da auch innerhalb eines Fördergurtes mehrere verschiedene Gummimischungen enthalten sind (Laufseite, Karkasse, Tragseite) werden die einzelnen Schichten der jeweiligen Fördergurte per Hand abgelöst und ebenfalls separat pyrolysiert und analysiert. Da Lauf- und Tragseite bezüglich der Zusammensetzung bei den meisten Fördergurten identisch sind, sind keine wesentlichen Unterschiede bei der Massenbilanz und den Rohcarbonanalysen zu erwarten. Die Analysen der einzelnen Fördergurtschichten darüber hinaus auch einen guten Hinweis geben, wie die Massenbilanz und die Zusammensetzung von rCB vom Abnutzungsgrad (= Abrieb) der Fördergurten abhängt.

Tabelle 3-2 zeigt die Ergebnisse der Analysen der verschiedenen Fördergurtproben:

---

<sup>4</sup> Via Bestimmung des Void Volumes gem. ASTM D6086.

Lif. Nummer	Fördergurt Hersteller (FGH)	Schicht	Ausbeute/Methode			Toluolverfärbung	Ascheanteil	BET	STSA	Void Volume	pH-Wert
			Methode (ASTM) →			D 1618	D 1506	D 1618	D 5665	D 6086	D 1512
			Ausbeute [% w/w] ↓								
			St	rCB	Gas Öl Wasser	% Tr.	% w/w	m <sup>2</sup> /g	m <sup>2</sup> /g	cm <sup>3</sup> /100g	-
Referenz	Rohcarbon (Altreifen)	-				> 80	16 - 24	ca. 55 - 70	ca. 40 - 60	ca. 87 - 90	7,5 - 9,5
1	FGH 1	Tragseite	0	34,8	65,2	97	6,6	102	85	99	8,3
2	FGH 1	Karkasse	63	16,7	20,5	97	21,4	77	58	89	8,8
3	FGH 1	Laufseite	0	33,8	66,2	98	8,5	87	72	100	8,6
4	FGH 1	Komplett	36	26,5	37,1	98	12,7	84	71	99	8,7
5	FGH 2	Tragseite	0	39,7	60,3	97	4,7	83	68	104	8,4
6	FGH 2	Karkasse	62	16,3	21,5	98	37,2	62	47	72	8,7
7	FGH 2	Laufseite	0	46,8	53,2	98	7,6	76	61	89	8,1
8	FGH 2	Komplett	38	24,2	37,9	96	16,8	82	62	86	8,6
1+2+3	FGH 1	Berechnet	37	24,6	38,5	97	12,2	89	72	96	8,6
5+6+7	FGH 2	Berechnet	40	25,4	34,4	98	16,5	73	59	88	8,4

**Tabelle 3-2:** Ergebnisse der Voruntersuchungen verschiedener Fördergurtqualitäten.

Ein - auch zur wirtschaftlichen Bewertung - bedeutender Parameter ist die Ausbeute der zurückgewonnenen Materialien Rohcarbon, Stahl, Öl und Gas. Hierbei ist zu sehen, dass bei vergleichbaren Fördergurttypen verschiedener Hersteller nur geringe Unterschiede in den Ausbeuten sichtbar sind. Der wichtigste Parameter ist die Ausbeute an Rohcarbon, welche bei beiden Fördergurttypen bei rund 25 Gew.-% liegt. Bei aus Deutschland bezogenen Altreifen liegt dieser Wert bei rund 35 Gew.-%. Für diese Reduzierung können prinzipiell zwei Gründe verantwortlich sein. Zunächst kann aufgrund des vergleichsweise hohen Stahlseilanteils der relative Gummianteil (= Füllstoff + Polymer) in Fördergurten niedriger sein als in Altreifen. Dadurch ergibt sich folgerichtig

auch ein geringerer Gesamtanteil von eingesetzten und zur Rückgewinnung zur Verfügung stehenden CB. Ein weiterer Grund für die niedrigere Rohcarbonausbeute kann ein geringerer Anteil CB im Gummi selbst sein. Dies geht allerdings häufig mit dem Einsatz anderer Füllstoffe auf mineralischer Basis (u.a. Silica, Kalk) einher, welche dann in einem im Vergleich zu altreifenbasierten Rohcarbon erhöhten Aschegehalt sichtbar sein müssten. Da aber der Aschegehalt in den untersuchten Rohcarbonen sogar geringer ist, als in altreifenbasierten Rohcarbon, ist dieser Grund sehr unwahrscheinlich.

Um Aufschlüsse über die Zusammensetzung des ursprünglichen Fördergurtgummis zu bekommen werden die Verhältnisse der Ausbeuten von Rohcarbon zu Öl, Gas & Wasser verglichen.

Material	Rohcarbon : Öl, Gas & Wasser
FGH 1 (komplett)	1:1,40
FGH 2 (komplett)	1:1,56
FGH 1 (Fördergurtschichten berechnet)	1: 1,64
FGH 2 (Fördergurtschichten berechnet)	1: 1,35
Mittelwert Fördergurte	1:1,49 ±0,12
Altreifen-Rohcarbon <sup>5</sup>	1: 1,51

**Tabelle 3-3:** Verhältnis der Ausbeuten von Rohcarbon zu Öl, Gas und Wasser.

Wie man Tabelle 3-3 entnehmen kann, sind die Verhältnisse von Rohcarbon zur Summe der Anteile von Öl, Gas und Wasser als vergleichbar mit dem aus Altreifen berechneten Verhältnis betrachten. Dies kann als nützlichen Indikator für die Ermittlung der ursprüngliche Zusammensetzung der Altgummimaterialien verwendet werden. Demnach ist - basierend auf den bisherigen Ergebnissen - von Fördergurten mit vergleichbaren Verhältnis von Füllstoff zu Elastomer auszugehen. Bezüglich der Produktqualität lassen sich aus Tabelle 3-3 folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die gemessenen fördergurtbasierten Rohcarbone weisen mit ca. 12 - 17 % einen niedrigeren Aschegehalt als altreifenbasiertes Rohcarbon<sup>6</sup> auf (ca. 21%). Diese Aschereduzierung ist unterschiedlich stark ausgeprägt, jedoch immer noch deutlich höher als der minimale Ascheanteil von konventionellen CB (0,19%).
- Höhere spezifische Oberflächen bei Fördergurt-Rohcarbonen im Vergleich zu Altreifen-Rohcarbon. Dabei ist die Gesamtoberfläche (BET) innerhalb der Fördergurt-Rohcarbone vergleichbar, während es signifikante Unterschiede bei der externen

<sup>5</sup> Hergestellt aus deutschen PKW-Altireifenshreds.

<sup>6</sup> Aussage ist bezogen auf PKW-Altireifenshreds aus Deutschland.

Oberfläche (STSA) gibt. Dies lässt auf eine unterschiedliche Mikroporosität der beiden analysierten Muster schließen.

- Vergleichbare bis etwas höhere Struktur als in Altreifen-Rohcarbon, v.a. Lauf- und Tragflächen (Karkassen haben jeweils die geringste Struktur)
- Die Toluolverfärbung<sup>7</sup> und der pH-Wert<sup>8</sup> aller Rohcarbone stimmen sehr gut überein.

Wie erwähnt, ist der Aschegehalt des Rohcarbons der zwei untersuchten Fördergurtmuster unterschiedlich. Um dieser Erkenntnis näher auf den Grund zu gehen, werden die Aschen der beiden Fördergurte genauer qualifiziert und quantifiziert. Tabelle 3-4 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung:

Element	Einheit	Messwert FGH 1	Messwert FGH 2	Messwert rCB (Altreifen)	Vergleichs- wert CB N660
Si	% w/w	2,74	1,38	5,30	0,00053
Zn	% w/w	2,23	6,89	4,59	0,00014
Al	mg/kg	600	600	1800	1,3
Ca	mg/kg	300	1900	8900	2,0
Co	mg/kg	900	1000	148	≤ 0,1
Cr	mg/kg	1	3	4	0,3
Cu	mg/kg	3	25	209	< 0,1
Fe	mg/kg	74	316	1700	14,1
K	mg/kg	800	1000	1100	589
Mg	mg/kg	1100	400	504	1,3
Mn	mg/kg	3	8	14	0,2
Na	mg/kg	1000	1000	1100	263
Ni	mg/kg	4	3	5	0,4
Pb	mg/kg	200	300	33	1,2
Sn	mg/kg	0,2	1	1	1,0
Ti	mg/kg	0,03	8	10	≤ 0,1
Cd	mg/kg	1	6	2	≤ 0,1
Hg	mg/kg	< 1	< 1	<1	≤ 0,1

**Tabelle 3-4:** Metallgehalte der beiden Fördergurtmuster.

<sup>7</sup> Maß für die Verunreinigung von (r)CB mit organischen Substanzen.

<sup>8</sup> Bedeutender Parameter bei der Vulkanisation von Gummiartikeln.

Aus Tabelle 3-4 lassen sich folgende Informationen ableiten:

- Allgemein ist der Metallgehalt bei allen recycelten Rohcarbonen deutlich höher als bei konventionellen CB. Diese Unterschiede beruhen auf den unterschiedlichen Ausgangsmaterialien der beiden Materialien<sup>9</sup>. Ausnahmen bei den Metallgehalten sind allerdings die Alkalimetalle Natrium und besonders Kalium welche in ungefähr vergleichbarer Menge enthalten sind. Grund hierfür ist der produktionsbedingte Einsatz von Salzen dieser Alkalimetalle bei der Herstellung von CB [DBW93].
- Im Vergleich mit altreifenbasierten Rohcarbonen besitzen die fördergurtbasierten Rohcarbone einen geringeren Anteil an Silicium.
- Signifikante Unterschiede im Zinkgehalt innerhalb der fördergurtbasierten Rohcarbone. Ein Grund hierfür können unterschiedlich aktive Zinkoxide<sup>10</sup> aufgrund unterschiedliche Anforderungen beim Vulkanisationsprozess sein.
- Beide fördergurtbasierten Rohcarbone haben einen signifikant höheren Anteil an Blei und Cobalt im Vergleich zu altreifenbasierten Rohcarbon. Der Unterschied zu konventionellen CB ist noch deutlicher. Begründen lässt sich dies mit den in Stahlseilfördergurten verwendeten Haftklebern, welche auf Basis von Cobalt und Bleisalzen hergestellt werden.

Die Unterschiede zwischen dem konventionellen CB und den beiden fördergurtbasierten Rohcarbonen sind mit unterschiedlichen Herstellungsprozessen zu erklären. Die Unterschiede zwischen altreifen- und fördergurtbasierten Rohcarbon ergeben sich aus den Unterschieden der eingesetzten Altgummimaterialien und die Abweichungen zwischen den beiden analysierten Stahlseilfördergurten lassen sich schließlich mit der nicht identischen Fördergurttypen begründen.

Zur weiteren Umsetzung von Fördergurten im industriellen Maßstab müssen zunächst die Prozessparameter, das Reaktordesign und die Wicklungsgeometrie festgelegt werden.

### **3.1.3 Erstellung des Lastenheftes**

#### **3.1.3.1 Prozessparameter**

Die Verarbeitung der Fördergurte in ein verkaufsgerechtes Produkt umfasst unter Standardbedingungen zwei große Abschnitte, die Pyrolyse und den sich anschließenden Feststoffteil. In der Pyrolyse findet die Entgasung statt, in welcher die (organi-

---

<sup>9</sup> So wird für die Synthese von konventionellen CB im Wesentlichen fast ausschließlich ein speziell vorbehandeltes Erdölderivat (CBFO) eingesetzt, während rCB aus kompletten Altgummiderivaten inkl. aller Zusatzkomponenten zurückgewonnen wird.

<sup>10</sup> Zinkoxide werden als Aktivatoren bei der Vulkanisation von Fördergurten eingesetzt.

schen) Kohlenwasserstoffe wie Elastomer, Weichmacher etc. von den (anorganischen) Feststoffen rCB und Stahl getrennt werden. Im Feststoffteil wird das so entstandene Rohcarbon vom Stahl befreit und nach Kundenspezifikation in verkaufsgerechte Pellets konfektioniert. Dies geschieht über eine Mühle, einen Perlierer sowie einen Trockner. cct beherrscht diese Prozesse und ist in der Lage, bei Abweichungen im Prozessverlauf unter Standardbedingungen, gezielt Rückschlüsse auf die Ursache zu ziehen. Aus diesem Grund werden zunächst die sich als geeignet herausgestellten Betriebsanweisungen auch auf neue Input-Materialien wie z.B. Fördergurte angewendet und - die Prozesse erst in einem zweiten Schritt, wenn nötig, angepasst. Diese Herangehensweise wird auch in dem vorliegenden Fall angewendet. Die Standardbedingungen in der Pyrolyse sehen vor, dass der Ofen nach einer erfolgreichen Inertisierung mittels einer definierten Aufheizkurve auf die gewünschte Haltetemperatur gebracht wird. Nach dem Erreichen bestimmter Abbruchkriterien wird der Prozess als abgeschlossen definiert, der Innenraum bis zu einer definierten Temperatur gekühlt und der Ofen danach geöffnet.

Während der Verarbeitung der Fördergurte zeigt der Pyrolyseprozess die typischen Charakteristika hinsichtlich des Temperatur- und Druckverlaufes. Der Gasfluss entsteht ebenfalls bei der erwarteten Temperatur und im erwarteten Ausmaß. Die Abbruchkriterien wurden früher als normal erreicht, der Prozess des Kühlens verhält sich im erwarteten Rahmen. Insgesamt ist für den Pyrolyseprozess zu bemerken, dass keine Auffälligkeiten vorliegen. Die etwas kürzere Prozessdauer ist auf die geringere Masse des Inputmaterials im Vergleich zu Standardbedingungen zurückzuführen.

Im Feststoffteil des Gesamtprozesses werden die Bedingungen an das zu herzustellende Produkt angepasst. Für jedes Produkt bestehen Einstellparameter, welche eine stabile Fahrweise ermöglichen, um die Produktspezifikationen einzuhalten. In der Mühle werden entsprechende Parameter zu Druck und Drehzahl und somit der Massenfluss und die Partikelgröße festgelegt. Die Perlierung erzeugt durch die Vorgabe von Durchfluss, Befeuchtung und Drehzahl spezifikationsgerechtes Produkt, welches in einem Trockner über die Vorgabe von Temperatur, Drehzahl und Druck veredelt wird. Das Rohcarbon der Fördergurte kann im Feststoffteil verarbeitet werden. Aufgrund der begrenzten Produktmenge können nur Indizien zur Prozessstabilität, aber noch keine abschließbar belastbaren Aussagen über das Verhalten des Prozesses und der angewendeten Einstellparameter getroffen werden. Hinsichtlich der Prozessparameter für die Fertigung von Fördergurtcompounds aus rCB, ist es von höchster Relevanz, dass bei der Verwendung von rCB so gut wie keine Änderung der Mischparameter im Vergleich zur Verwendung von CB erforderlich ist. Wesentliche Mischparameter sind hierbei:

- Mischzeit: Die typische Mischzeit für Fördergurtcompounds liegt im Bereich von drei bis zehn Minuten. Dabei kann der Prozess ein- oder mehrstufig sein.
- Mischtemperatur: Hinsichtlich der Temperatur im Mischprozess können je nach Compound-Typ Temperaturen von 100°C bis 160°C relevant sein.

### **3.1.3.2 Wicklungsgeometrie**

Im Werk Stegelitz der Firma cct wird im Normalfall geschreddertes Input-Material aus Altreifen verwendet. Es zeichnet sich gegenüber ungeschredderten Altreifen durch höhere Homogenität, einfacheres Handling in der halbautomatischen Beschickung sowie höhere Effizienz bei der Beladung der Öfen aus. Nicht geschredderte Altreifen besitzen hierbei nur den Vorteil der geringen Einkaufskosten, welche jedoch die Nachteile nicht aufwiegen können.

Im Projektverlauf der Verarbeitung der Fördergurte hat es sich jedoch gezeigt, dass ein Zerkleinern der Fördergurte nicht notwendig ist, um hochwertiges rCB zu gewinnen. Ungeachtet der erzeugten Qualität muss der Handling-Prozess angepasst werden. In der halbautomatischen Verarbeitung hinsichtlich Beschickung und Entleerung der Pyrolyseöfen sowie der Trennung von Stahl ist das Equipment der cct derzeit nur eingeschränkt geeignet, nicht geschredderte, komplette Fördergurte wirtschaftlich in großindustriellen Mengen zu verarbeiten.

### **3.1.3.3 Reaktordesign**

Das derzeitige Design der Batch-Öfen ist das Ergebnis von diversen Optimierungsentwicklungen. Die jetzige Generation der Öfen und die inzwischen geplante nächste Generation der Körbe sind damit auf die Nutzung von ungefähr handflächengroßen Shreds optimiert. Dies äußert sich in der Anzahl und Beschaffenheit der Ebenen der Körbe sowie in dem Abstand der Ebenen untereinander (vgl. Anhang 1). Um dieses System auf die Verarbeitung von Fördergurten umzurüsten sind verschiedene Anpassungen vorstellbar. Unter der Prämisse aufgewickelte Fördergurte verarbeiten zu wollen, kann das aktuelle Ofendesign übernommen werden; Einschränkungen bestehen bei der Breite der zu verarbeitenden Gurte. Die Körbe sowie das gesamte Korbhandling (Bestückung und Entleerung) muss verändert werden. Die Korbgeometrie kann derart verändert werden. Einschränkungen bestehen dabei aber bei der Breite der zu verarbeitenden Gurte. Es ist auch vorstellbar das die Korbgeometrie derart verändert wird, dass eine Bestückung von der Seite her, z.B. mit einem Gabelstapler möglich ist. Alternativ könnten je nach Wicklungsumfang mehrere übereinander gestapelte Fördergurtwickel je Batch verarbeitet werden, wenn man auf die bisherigen Korbebenen verzichtet. Die Körbe besäßen dann ggf. eine nicht symmetrische Form, was bei der Entleerung beachtet werden müsste.



Die Trennung von Rohcarbon und Stahl stellt sich nicht einfach dar. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist eine sehr reine Trennung notwendig; hier ist die Ausbeute an Rohcarbon und die Reinheit des Stahls entscheidend. Mit der Trennung wird der Prozess verstetigt, aus der diskontinuierlichen Batch-Pyrolyse wird eine kontinuierliche Veredelung. Damit ergibt sich eine möglichst automatische Handhabung dieses Prozessabschnittes. Es ist eine Trennungsapparat zu entwickeln, welcher das Rohcarbon auf Transportequipment befördert, ggf. unter Staubentwicklung fallen lässt, dabei die Stahlseile zurückhält und abklopft bzw. reinigt. Die Korbgeometrie ist hier so zu bestimmen, dass eine Fehleranfälligkeit vermieden, bzw. gering gehalten wird.

## **3.2 Umsetzung**

### **3.2.1 Verwertung von Altfördergurten**

Um die Übertragbarkeit der Labortests auf industrielle Maßstäbe unter Einbeziehung der vorstehend beschriebenen Parameter Prozessparameter, Wicklungsgeometrie und Reaktordesign zu verifizieren, sollen komplette besonders abriebfeste, neuwertige Fördergurte eines renommierten Herstellers großtechnisch pyrolysiert, vermahlen und pelletiert werden.

#### **3.2.1.1 Pyrolysieren von Fördergurten**

Wie unter Punkt 3.1.3 bereits angedeutet, wird aus ökonomischen Gründen zunächst auf eine Vorzerkleinerung der Fördergurte zu verzichtet um die Ergebnisse einer Pyrolyse von vollständigen Fördergurten zu bewerten. Folgende Fördergurte werden daher großtechnisch in der industriellen Anlage der cct pyrolysiert:

- Fördergurtmodell: „St 2500 20:8 N“ (Baujahr 2011)
- Startgewicht Fördergurte: 4 x 200 kg,
- Anzahl Fördergurte: 4
- Betriebsversuchsnummer: P62

Die Zugfestigkeit der Gurte beträgt 2500 N/mm bei einer Gurtbreite von 400 mm und einer Gurtdicke von 32 mm. Die tragseitige Deckplatte war 20 mm dick, die laufseitige Deckplatte 8 mm und die Stahlseile hatten einen Einzeldurchmesser von ca. 8 mm. Tragseitig war eine Querarmierung eingearbeitet. Die Qualität entspricht der Normalgüte. Die folgenden Bilder geben einen Eindruck der Beschickung der industriellen Pyrolysereaktoren bzw. deren Körbe mit den beschriebenen Fördergurten:



**Abbildung 3-1:** Pyrolysekörbe befüllt mit kompletten Stahlseilfördergurten.

Die Pyrolyse verläuft vergleichbar mit der Pyrolyse von Altreifen (vgl. Punkt 3.1.3). Die Pyrolysedauer ist etwas kürzer als eine vergleichbare Pyrolyse von Altreifenshreds, was aber v.a. daran liegt, dass der Reaktor aufgrund der Abmessungen und der Wicklungsgeometrie des Inputmaterials nicht vollständig beschickt werden kann. Das Rohcarbon direkt nach der Pyrolyse ist allerdings deutlich feiner und daher staubiger, so dass bei der Handhabung ein nicht unwesentlicher Verlust zu verzeichnen ist, da etwas Rohcarbon im Pyrolysekorb bzw. Reaktor verblieben ist. Ansonsten konnten keine weiteren besonderen Vorkommnisse im Vergleich zur etablierten Altreifenpyrolyse festgestellt werden.

Die Ausbeuten des industriellen Versuchs (Versuchsnummer = P62) im Vergleich zu den Voruntersuchungen im Labor und typischen Ausbeuten bei Pyrolyse von Altreifen zeigt Tabelle 3-5:

Produkt	Ausbeute [% w/w]			
	Altreifenpyrolyse	P62	Laborversuch FGH 1 <sup>11</sup>	Laborversuch FGH 2 <sup>11</sup>
Rohcarbon	35	23	27	24
Öl/Gas	52	56	36	37
Stahl	12	20	36	38
Sonstiges <sup>12</sup>	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1
Verhältnis "Rohcarbon" zu "Öl/Gas"	1: 1,49	1: 2,43	1:1,33	1: 1,54

**Tabelle 3-5:** Rohausbeuten der industriellen Fördergurtpyrolyse (P62) im Vergleich mit den Laborversuchen und der Pyrolyse von Altreifen.

<sup>11</sup> Gemessene Werte des kompletten Fördergurts.

<sup>12</sup> Besteht im Wesentlichen aus Wasser und Schwebstoffen.

Im Vergleich zu handelsüblichen altreifenbasierten rCB erhält man bei der industriellen Pyrolyse von Stahlseilfördergurten einen vergleichbaren Anteil an organischen Material (Öl & Gas) jedoch einen niedrigeren Rohcarbonanteil sowie einen entsprechend höheren Stahlanteil. Begründen lässt sich diese Beobachtung mit der Tatsache, dass der Stahlanteil in Stahlseilfördergurten deutlich höher ist als der Selbige in Autoreifen. Entsprechend invers verhält es sich mit den Anteilen von Carbon Black. Vergleicht man die Ausbeuten von P62 mit denen der beiden Laborversuche ist die rCB-Ausbeute von P62 als vergleichbar zu betrachten, allerdings entsteht bei P62 mehr Öl/Gas und weniger Stahl als beim Laborversuch (vgl. Punkt 3.1).

Diese Unterschiede lassen sich wahrscheinlich dadurch erklären, dass es sich beim industriellen Testlauf und bei den Labortests nicht um die identischen Fördergurttypen handelte. Das Verhältnis der bei der ursprünglichen Fördergurtherstellung eingesetzten Komponenten Polymer und Füllstoff wird durch das Verhältnis von Öl und Gas zu Rohcarbon wiedergegeben. Wie man sieht, ist das Verhältnis bei P62 mit 1:2,4 signifikant abweichend von den Verhältnissen der beiden Laborversuche ( $1:1,4 \pm 0,1$ ), welche ja vergleichbar mit dem Verhältnis bei der Pyrolyse von Altreifen (1:1,5) sind. Die genauen Ausbeutenverhältnisse von den aus Fördergurten zurückgewonnenen Materialien müssen in Zukunft noch intensiver untersucht werden. Dies ist nur durch eine statistisch relevante Anzahl von industriellen Versuchen zu erreichen, was den Umfang dieses Projekts überschreiten würde und daher Gegenstand eines Folgeprojekts werden kann. Die folgenden Bilder zeigen die pyrolysierten Fördergurte unmittelbar nach Beendigung der Pyrolyse bzw. nach dem Abkühlen der Pyrolysekörbe:



**Abbildung 3-2:** Rohcarbon und Stahl unmittelbar nach der Pyrolyse

### 3.2.1.2 Prozessprodukte aufbereiten und untersuchen

Um wettbewerbsfähiges Produkt zu erhalten, muss das erhaltene Rohcarbon weiter veredelt werden. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um drei Prozessschritte, welche im Gegensatz zur chargenweisen Pyrolyse in einem kontinuierlichen Prozess ablaufen:

- Vermahlung
- Pelletierung
- Trocknung

Bei der Vermahlung wird das zuvor vom Stahl befreite Rohcarbon feinst vermahlen und homogenisiert. Dies ist zwingend notwendig um überhaupt einen rückführbaren Werkstoff zu generieren, da das Rohcarbon eine - sowohl bezüglich der chemischen Zusammensetzung als auch der physikalischen Dimensionen - sehr inhomogenes Material darstellt (Größenverteilung zwischen wenigen Mikrometern und mehreren Zentimetern).

Erst durch die feine Vermahlung werden die rCB-Agglomerate soweit zerkleinert, dass Sie eine entsprechend hohe spezifische Oberfläche aufweisen, um eine signifikante Wechselwirkung zwischen Füllstoff und Polymer zu entwickeln. Dabei müssen die per Laserbeugung detektierten Partikelgrößenverteilungen (PSA)<sup>13</sup> mindestens einen Wert von 30 µm unterschreiten<sup>14</sup>.

Bei der auf die Vermahlung folgenden Pelletierung wird das extrem feine und äußerst schlecht zu handhabende rCB-Material (Fachterminus: "Fluffy") in die - aus der konventionellen CB-Herstellung bekannte - physikalische Darreichungsform "Pellets" umgewandelt. Dies geschieht durch eine Nasspelletierung mit Wasser ohne Zusatz weiterer Bindemittel. Die Herausforderung in diesem Prozessschritt ist, die Pellets einerseits stabil genug für den Transport bzw. die Förderung zu machen, sie jedoch andererseits weich genug für die Einbringung (Mastikation & Dispergierung) zu produzieren. Die beiden zentralen Parameter hierbei sind:

- die Einzelperlhärte, welche angibt welche Kraft nötig ist um ein Pellet zum Brechen zu bringen
- der Feinanteil, welcher angibt wie hoch der abrasive Anteil der Pellets kleiner 125 µm nach einer Klopffammersiebung ist.

Im Anschluss daran werden die noch feuchten Pellets (sog. "Grünpellets") in einem Drehrohrtrockner kontinuierlich bis auf eine Restfeuchte von höchstens 1,2 Gew.-% getrocknet. Durch die Pelletierung kann rCB leichter zum Kunden transportiert und dort auch leichter verarbeitet werden. Die Größenordnung der Pellets liegt üblicherweise

<sup>13</sup> Gemessen in wässriger Suspension gem. ISO 13320.

<sup>14</sup> Bezogen auf  $d^{97}$  (d.h. mind. 97% w/w aller Teilchen haben einen Durchmesser von max. 30 µm oder kleiner).

bei einem Durchmesser von ca. 0,1 bis 2 mm mit Modalwerten je nach Anwendungsbereich [AST12].

Im Folgenden wird die Analyse der erhaltenen Produkte der großtechnischen Pyrolyse und Veredelung von Fördergurtbasierten rCB vorgestellt:

Parameter	Einheit	Testmethode	Messwerte			Spezifikation <sup>15</sup> (min - max)	
			Ø	min	max		
BET	m <sup>2</sup> /g	ASTM D6556	73,8	73,1	74,6	ca. 55 – 70 <sup>16</sup>	
STSA	m <sup>2</sup> /g	ASTM D6556	62,5	61,7	63,4	ca. 40 – 60 <sup>16</sup>	
Void Volume	cm <sup>3</sup> /100g	ASTM D6086	94,2	93,1	95,4	ca. 87 – 90 <sup>16</sup>	
Restfeuchte	% w/w	ASTM D1509	0,91	0,89	0,93	n/a	1,2
Asche	% w/w	ASTM D1506	27,3 <sup>17</sup>	14,4	48,0	16	24
pH-Wert	-	ASTM D1512	8,4	8,3	8,5	7,5	9,5
Toluolverfärbung	% Tr.	ASTM D1618	95	94	96	80	n/a

**Tabelle 3-6:** Analytik von P62 (Rohcarbon).

Um einen ersten Eindruck über die zu erwartende Qualität des (pelletierten) rCBs zu erhalten wird das - von Stahldrähten befreite Rohcarbon bereits so weit möglich analysiert. Daraus ergeben sich bezüglich der spezifischen Oberfläche (BET bzw. STSA-Wert) und Struktur (Void-Volume) etwas höhere Werte als dies bei entsprechenden altreifenbasierten rCB der Fall ist. Der im Vergleich entsprechenden altreifenbasierten rCB höhere Aschegehalt ist beim Rohcarbon sehr breit gestreut und nur bedingt aussagekräftig, da das Rohcarbon aufgrund der unterschiedlichen Füllstoffmischungen innerhalb eines Stahlseilfördergurtes sehr inhomogen bezüglich der chemischen Zusammensetzung ist. Die restlichen Parameter (Restfeuchte, pH-Wert, Toluolverfärbung) sind vergleichbar mit den bei entsprechenden altreifenbasierten Material zu erwartenden Werten.

<sup>15</sup> PKW-Altireifen aus Deutschland.

<sup>16</sup> Es handelt sich hierbei um typische Werte, da diese Parameter für Rohcarbon nicht spezifiziert sind.

<sup>17</sup> Rohcarbon ist sehr inhomogen. Einzelwerte [% w/w]: 16,2; 16,8; 14,4 (Rohcarbon gemischt); 48,0 (innere Schicht); 21,6 (Stahlummanteltes Material in der Mitte), 46,9 (äußere Schicht).

Parameter	Einheit	Testmethode	Messwerte			Spezifikation <sup>18</sup> (min - max)	
			Ø	min	max		
BET	m <sup>2</sup> /g	ASTM D6556	82,8	78,7	95,1	75	91
STSA	m <sup>2</sup> /g	ASTM D6556	69,6	65,1	79,5	61	77
Void Volume	cm <sup>3</sup> /100g	ASTM D6086	64,4	64,3	64,7	56	68
Asche	% w/w	ASTM D1506	20,3	19,8	20,6	16	24
Toluolverfärbung	% Tr.	ASTM D1618	94	94	95	96	n/a
PSA (d <sup>97</sup> )	µm	ISO 13320	9,09	8,30	9,96	7	13
pH-Wert	-	ASTM D1512	8,3	8,2	8,5	7,5	9,5
Restfeuchte	% w/w	ASTM D1509	0,98	0,84	1,09	n/a	1,2
OAN	cm <sup>3</sup> /100g	ASTM D2414	106,1	103,7	108,5	76	105

**Tabelle 3-7: Analytik von P62 (Fluffy).**

Parameter	Einheit	Testmethode	Messwerte			Spezifikation <sup>28</sup> (min - max)	
			Ø	min	max		
BET	m <sup>2</sup> /g	ASTM D6556	81,0	74,2	87,4	75	91
STSA	m <sup>2</sup> /g	ASTM D6556	67,0	61,4	70,1	61	77
Void Volume	cm <sup>3</sup> /100g	ASTM D6086	66,8	65,9	67,7	56	68
Restfeuchte	% w/w	ASTM D1509	0,69	0,72	0,65	n/a	1,2
Asche	% w/w	ASTM D1506	21,2	20,8	21,5	16	24
Nasssiebrückstand	ppm	ASTM D1514	10	9	11	n/a	20
pH-Wert	-	ASTM D1512	8,6	8,5	8,6	7,5	9,5
Einzelperlhärte (mv, n = 20)	cN	ASTM D5230	36,6	33,4	39,8	25	45
Einzelperlhärte (mv, n = 5 hardest)	cN	ASTM D5230	60,5	53,5	71,9	n/a	70
Feinanteil	% w/w	ASTM D1508	16,6	10,3	22,9	n/a	10
Abrieb	% w/w	ASTM D1508	2,6	1,9	3,3	n/a	4,0
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D1513	440	426	454	450	490
Toluolverfärbung	% Tr.	ASTM D1618	97	97	97	96	n/a
OAN	cm <sup>3</sup> /100g	ASTM D2414	97,9	97,5	99,2	76	105

**Tabelle 3-8: Analysezertifikat von P62 (Pellets).**

Wie aus Tabellen 3-7 und 3-8 ersichtlich, ist sowohl das vermahlene als auch das pelletierte fördergurtbasierte rCB (P62) fast vollständig innerhalb des sich für typische,

<sup>18</sup> Spezifikation altreifenbasiertes rCB "cct-6400" zum Vergleich.

industriell bewährte Altreifen-rCBs vorgegebenen Spezifikationsbereichs. Lediglich eine erhöhter Feinanteil und eine minimal geringere Schüttdichte weichen von der Spezifikation ab. Während letzteres ohne Auswirkungen für potentielle Anwendungen bleibt ist der erhöhte Feinanteil zwar kritisch für viele technische Anwendungen, jedoch liegt dies nicht an den Fördergurten, sondern vielmehr an den Produktionsbedingungen (wie z.B. nicht vollständig beschickte Reaktoren, Einzelabfüllung in kleine Säcke etc.). Die Erfahrung aus der Altreifenpyrolyse zeigt, dass diese Abweichung jedoch problemlos beim Umsatz größerer Mengen behoben werden können. Neben einer standardmäßigen rCB-Zertifikatsanalyse wird auch eine ausführliche Analyse der chemischen Zusammensetzung sowie der toxikologisch bedenklichen Polyaromatischen Kohlenwasserstoffe (PAKs) durchgeführt.

PAK	Einheit	Messwert P62	Messwert cct-6400 (rCB aus Altreifen)	Messwert CB N650
Benz[a]anthracen	[mg/kg]	0,69	0,35	< 0,1
Chrysen	[mg/kg]	0,71	0,31	0,23
Benzo[b]fluoranthen	[mg/kg]	0,19	0,16	0,96
Benzo[j]fluoranthen	[mg/kg]	0,08	0,07	0,39
Benzo[k]fluoranthen	[mg/kg]	0,07	0,05	0,17
Benzo[e]pyren	[mg/kg]	0,25	0,22	4,29
Benzo[a]pyren	[mg/kg]	0,35	0,27	3,46
Dibenz[a,h]anthracen/ Dibenz[a,c]anthracen	[mg/kg]	0,07	0,06	< 0,1
<b>Summe EU-8 PAK<sup>19</sup></b>	<b>[mg/kg]</b>	<b>2,41</b>	<b>1,49</b>	<b>9,49</b>
<b>Summe EPA-16 PAK<sup>20</sup></b>	<b>[mg/kg]</b>	<b>9,57</b>	<b>5,22</b>	<b>172,41</b>
<b>Summe FDA-22 PAK<sup>21</sup></b>	<b>[mg/kg]</b>	<b>10,55</b>	<b>5,58</b>	<b>223,68</b>

**Tabelle 3-9:** PAK-Werte von P62 (Pellets) im Vergleich mit altreifenbasierten cct-6400 und konventionellen CB (N650)<sup>22</sup>.

Der Vergleich der PAK-Werte belegt eindeutig einen großen umwelttechnischen Vorteil von rCB. So ist der PAK-Gehalt der beiden rCBs bis zu vierzig Mal niedriger als der entsprechende Wert von konventionell produzierten CB (N650). Bezogen auf N650

<sup>19</sup> Relevante PAKs innerhalb der EU gemäß REACH-Verordnung.

<sup>20</sup> Relevante PAKs innerhalb der USA gemäß Umweltschutzbehörde (EPA).

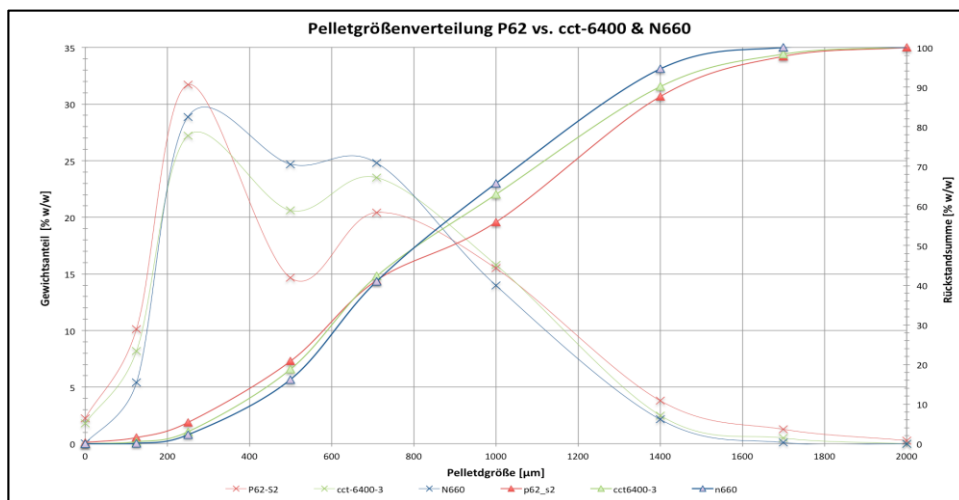
<sup>21</sup> Relevante PAKs innerhalb der USA gemäß Lebens- und Arzneimittelbehörde (FDA).

<sup>22</sup> Gem. ISO/IEC 17025 akkreditierte Messmethode MAS\_PA017 (Soxhlet-Extraktion mit Toluol unter Stickstoff und anschließender HRGC/LRMS-Detektion inkl. deuterierten internen Standards).

als Referenz erhält man -abhängig von der betrachteten PAK-Gruppe - Werte zwischen 5 und 25 % für P62 und sogar Werte zwischen 2 - 16% für altreifenbasiertes rCB („cct-6400“).

### Pelletgrößenverteilung

Die Größenverteilung der produzierten Pellets hat - neben anderen Parametern - Einfluss auf die Dispergierbarkeit des Materials z.B. bei der Wiederverwendung in einer Fördergurtgummimischung. Daneben wirkt sich die Größe der Pellets auch wirtschaftlich aus da Transportvolumen und Förderfähigkeit ebenfalls von der Größe der Pellets abhängen. Abbildung 3-3 zeigt die Pelletgrößenverteilung von P62 im Vergleich zu cct-6400 (altreifenbasiertes rCB) und N660 (konventionelles Carbon Black).



**Abbildung 3-3:** Pelletgrößenverteilung von P62.

Material	d <sub>10</sub> [mm]	d <sub>50</sub> [mm]	d <sub>90</sub> [mm]	d <sub>97</sub> [mm]	d <sub>99</sub> [mm]
P62	0,580	0,894	1,660	1,445	1,790
cct-6400	0,590	0,809	1,620	1,400	1,750
N660	0,607	0,807	1,460	1,320	1,550

**Tabelle 3-10:** Ausgewählte, relevante Pelletgrößenparameter von P62.

Die beiden vorstehenden Abbildungen lassen erkennen, dass die Pelletgrößenverteilung von P62 vergleichbar, wenn auch nicht identisch mit denen von cct-6400 bzw. N660 ist. Hierzu muss man wissen, dass die Reproduzierbarkeit dieser Art von Messungen methodenbedingt nicht besonders gut ist (Abweichungen bis zu 60% der Messwerte sind möglich [AST12]) und die Werte daher mehr als typische denn als spezifizierte Werte zu betrachten sind. Unter diesen Gesichtspunkten betrachtet kann



festgehalten werden, dass keine wesentlichen Unterschiede zwischen den verglichenen Materialien festgestellt werden können. Abbildung 3-4 zeigt ein Bild des pelletierten P62:



**Abbildung 3-4:** Pellets von P62.

### Chemische Zusammensetzung

Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung werden die P62-Pellets detailliert via Elementaranalyse untersucht<sup>23</sup>:

Element	Einheit	Messwert P62	Messwert rCB (Altreifen)	Messwerte CB N660
C	% w/w	73,35	75,85	97,45
H	% w/w	0,20	1,18	0,95
N	% w/w	1,23	<0,10	<0,10
S	% w/w	2,14	2,27	0,51
Si	% w/w	4,35	5,30	$0,53 \times 10^{-3}$
Zn	% w/w	6,73	4,59	$0,14 \times 10^{-3}$
Al	mg/kg	1700	1800	1,3
Ca	mg/kg	4400	8900	2,0
Co	mg/kg	1100	148	< 0,1
Cr	mg/kg	11	4	0,3
Cu	mg/kg	74	209	< 0,1
Fe	mg/kg	570	1700	14,1
K	mg/kg	760	1100	589
Mg	mg/kg	95	504	1,3
Mn	mg/kg	8	14	0,2
Na	mg/kg	1100	1100	263
Ni	mg/kg	4	5	0,4

<sup>23</sup> Testmethoden ASTM D5291 (für CHN), ASTM D3177 (für S), ISO 11885 (für alle Metalle).

Pb	mg/kg	3200	33	1,2
Sn	mg/kg	<2	1	1,0
Ti	mg/kg	320	10	< 0,1
Cd	mg/kg	<0,5	2	< 0,1
Hg	mg/kg	<0,5	<1	< 0,1

**Tabelle 3-11:** Organische Elementanalyse und Metallgehalte von P62-Pellets im Vergleich mit altreifenbasierten rCB (cct-6400) und konventionellen CB (N660).

Die Daten zeigen, dass Fördergurt-rCB (P62) bezüglich des Kohlenstoff- und Schwefelgehalts mit Altreifen-rCB vergleichbar ist, jedoch eine signifikant andere Zusammensetzung als konventionelles CB aufweist. Dies liegt in den unterschiedlichen Herstellungsprozess von konventionellen CB und rCB begründet. So wird konventionelles CB aus einem fast ausschließlich aus reinen Kohlenwasserstoffen bestehenden speziellen Öl (CBFO) gewonnen, während rCB via Pyrolyse von Altgummimaterialien wie Fördergurte oder Altreifen gewonnen wird.

Im Vergleich der Metallgehalte zwischen dem bereits etablierten altreifenbasierten rCB und dem innovativem, fördergurtbasierten rCB lässt sich folgendes feststellen:

- höherer Schwermetallgehalt bei P62. Dies wird besonders deutlich beim Vergleich der Bleigehalte. Dieser liegt bei P62 mit 3200 ppm fast hundertfach so hoch wie bei cct-6400. Auch die Werte für Kobalt, Zink und Titan sind signifikant erhöht. Eine Ausnahme hierbei bilden hier Eisen und Kupfer die in P62 jeweils um den Faktor drei niedrigere Anteile aufweisen als cct-6400.
- geringerer Leicht- bzw. Halbmetallgehalt bei P62. So sind der Silicium- und Erdalkaligehalt von P62 merklich niedriger als in cct-6400.

Im Vergleich zwischen den Metallgehalten der beiden rCBs und dem von konventionellen CB (N660) lässt sich folgendes feststellen:

- Deutlich niedrigeren Aschegehalt bei konventionellen CB (0,19% vs. ca. 21 %)
- Sämtliche Metallgehalte sind bei konventionellen CB niedriger als bei rCB.
- Innerhalb der CB-Metallgehalte nehmen die beiden Alkalimetalle Natrium und v.a. Kalium mit Abstand den größten Anteil ein und sind im Falle des Kaliums auch mit den Werten des fördergurtbasierten rCBs vergleichbar. Grund hierfür ist der produktionsbedingte Einsatz von Alkalimetallen bei der Herstellung von CB<sup>24</sup>.

Diese z.T. unterschiedliche Zusammensetzung der beiden rCBs beruht auf der Tatsache, dass hier Produkte, basierend auf zwei grundverschiedenen Gummiprodukten,

<sup>24</sup> Durch Zusatz von Alkalisalzen wie z.B. Kaliumcarbonat oder Natriumhydroxid während der Produktion lässt sich die Struktur von konventionellen CBs kontrollieren.

verglichen werden. Die Abweichungen zwischen den rCBs und N660 sind - wie bereits erläutert - mit den komplett unterschiedlichen Herstellungsprozessen zu erklären.

### 3.2.2 Herstellung von aufbereiteten Fördergurten

#### 3.2.2.1 Einsatz der Füllstoffe aus 3.2 zur Aufbereitung und Ermittlung der Mengemischverhältnisse

Für die Herstellung von aufbereiteten Fördergurten werden vier Compounds ausgewählt, um diese mit unterschiedlichen Anteilen an rCB zu testen. Die ausgewählten Compounds sind:

- 1) Compound für eine Förderbanddecke, Klasse X, hohe Festigkeit, gute Abriebeigenschaften (Cover Compound)
- 2) Haftmischung zu Stahlseilen (Core Compound)
- 3) Haftmischung zu Textilgeweben, mittlere Performance (Skim-Compound)
- 4) Haftmischung zu Textilgeweben, hohe Performance (Skim-Compound)

In der folgenden Tabelle 3-12 findet sich ein Vergleich der vier genannten Compounds zum jeweiligen Referenzcompound, welche keinen Anteil an rCB enthalten.

rCB [% w/w]	Skim Compound							
	Referenz CB N550 (3)				Referenz CB N375 (4)			
	0	17	50	100	0	20	50	100
Zugfestigkeit [%]	100,0	103,4	102,2	89,8	100,0	100,6	99,1	89,7
Reißdehnung [%]	100,0	119,7	125,4	123,2	100,0	102,0	99,1	106,6
Härte Sh A [%]	100,0	96,4	96,4	94,6	100,0	98,3	95,0	95,0
Haftung zum Cover <sup>25</sup> [%]	100,0	92,9	95,2	111,3	100,0	88,1	100,5	104,4
Haftung zwischen den Gewebeschichten [%]	100,0	87,1	93,5	98,7	100,0	81,5	87,1	85,7

rCB [% w/w]	Core Compound				Cover Compound			
	Referenz CB N339 (2)				Referenz CB N375 (1)			
	0	25	50	100	0	18	50	100
Zugfestigkeit [%]	100,0	100,5	96,1	73,8	100,0	98,9	96,6	86,7
Reißdehnung [%]	100,0	107,8	97,1	105,3	100,0	99,4	101,1	99,3
Härte Sh A [%]	100,0	101,4	100,0	95,7	100,0	103,4	94,8	86,2
Außreißfestigkeit [%]	100,0	95,8	106,0	95,1	n/a			
Außreißfestigkeit nach Alterung [%]	100,0	103,4	85,0	79,7				
Abrieb, nicht rotierend [%]	n/a				100,0	102,6	113,3	151,0

**Tabelle 3-12:** Vergleich der untersuchten Compounds.

<sup>25</sup> Angegeben ist jeweils nur der Niedrigste der gemessenen Werte.

Grün unterlegte Felder der obigen Tabelle bedeuten, dass die Werte mindestens die Spezifikation der Referenz erfüllen. Gelb unterlegte Felder bedeuten, dass die Eigenschaften auf Basis der derzeitigen Datenlage nicht gesichert erreicht werden können. Einzelne Prüfwerte sind hier zu gering. Rot unterlegte Felder bedeuten, dass die Eigenschaften mit diesem Anteil an rCB nicht erreicht werden können.

Wie aus der Tabelle 3-12 ersichtlich ist, können unterschiedliche Anteile an rCB eingesetzt werden. Für die Förderbanddecke der Klasse X (Compound Nr.1), sind voraussichtlich bis zu 50 % an rCB möglich. Das ist insofern bemerkenswert, da für Förderbanddecken auch die optische Qualität von besonderer Relevanz ist. Für die Haftmischung zu Stahlseilen (Compound Nr.2) kann aus aktueller Sicht immerhin ein Anteil von 25% eingesetzt werden. Hierbei ist zu erwähnen, dass bei dem hier geprüften Compound höchste Haftungen zu Stahlseilen erreicht werden müssen. Andere Haftmischungen für Stahlseile mit geringeren Anforderungen werden voraussichtlich höhere Anteile an rCB möglich machen. Für die Haftmischungen zu Textilgeweben (Compound Nr.3 und 4) ist ein vollständiger Ersatz der bislang eingesetzten Ruße aus aktueller Sicht möglich.

Vergleichsprüfungen wurden mit rCB hergestellt aus Reifen durchgeführt. Die Performance bei der Verwendung von rCB aus Förderbändern ist dazu vergleichbar.

### **3.2.2.2 Herstellung von Prüfgurten und Probekörpern**

Prüfgurte im Produktionsmaßstab werden im Verlauf dieses Projekts nicht hergestellt. Die verfügbare technologische Laborausstattung ermöglicht es aber Prototypen herzustellen, welche die Eigenschaften von Prüfgurten aus der Produktion praktisch identisch abbilden. Die Prüfergebnisse dieser Laborprototypen sind in bereits erwähnter Tabelle 3-12 dargestellt.

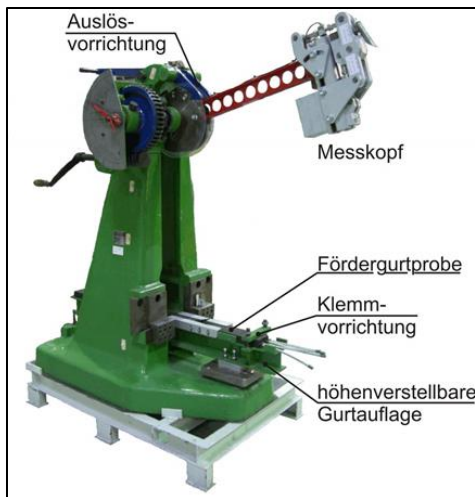
## **3.3 Verifikation und Anpassung**

### **3.3.1 Praxisnahe Eigenschaftsermittlung der Fördergurte**

Zur Ermittlung der technischen Eigenschaften der Laborprototypen werden praxisnahe Untersuchungen durchgeführt. Hierbei werden die zuvor beschriebenen Funktionsmuster der unterschiedlichen Compounds in Bezug auf deren Schnittfestigkeit und deren Abrasionsbeständigkeit getestet, um somit den Einfluss des Anteils an rCB zu untersuchen. Im Folgenden werden die beiden Prüfverfahren sowie die Messergebnisse vorgestellt.

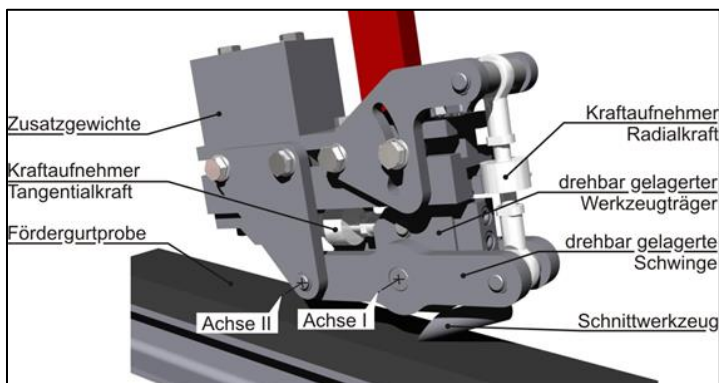
### 3.3.1.1 Ermittlung der Schnittfestigkeit

Bei einem anwendungsnahen Prüfverfahren zur Bestimmung der Schnittfestigkeit besteht die Forderung nach einer einfachen Auswertbarkeit, nach einer guten Reproduzierbarkeit sowie nach kurzen Versuchszeiten und einer praxisnahen Beanspruchung. Durch eine am ITA entwickelte Prüfeinrichtung können Fördergurtproben unter definierten und der realen Kinetik nahe kommenden Bedingungen beansprucht werden. Der Aufbau des verwendeten Pendelschlagwerkes ist in Abbildung 3-5 dargestellt.



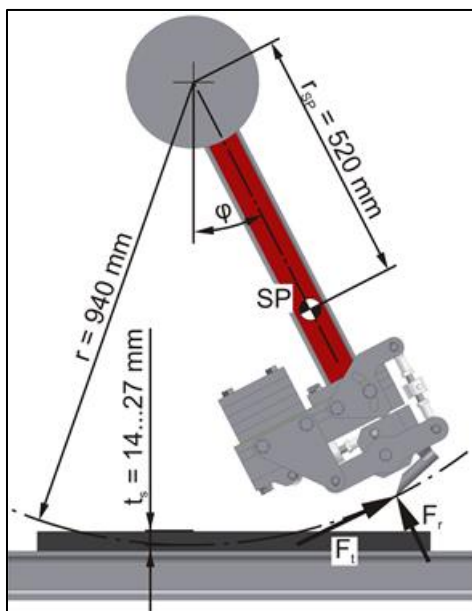
**Abbildung 3-5:** Aufbau des Pendelschlagwerkes [WO08].

Am äußeren Ende des drehbar gelagerten Pendelarms befindet sich ein mit Kraftaufnehmern versehener Kopf, an dessen Unterseite sich das in den Fördergurt eindringende Schnittwerkzeug befindet. Die Fördergurtproben können mittels einer Klemmvorrichtung eingespannt und über eine verstellbare Auflage in der Höhe ausgerichtet werden. Die Energie des Pendels kann zum einen über vier verschiedene Höhen eingestellt werden, aus denen das Pendel ausgelöst werden kann, zum anderen kann die Masse des Messkopfes über Zusatzgewichte vergrößert werden. Abbildung 3-6 zeigt den Aufbau des Messkopfes.



**Abbildung 3-6:** Messkopf des Pendelschlagwerkes [WO08].

Im Zentrum der Messeinrichtung befindet sich ein über Kugellager doppelt drehbar gelagerter Werkzeugträger, an dem das in den Fördergurt eindringende Schnittwerkzeug befestigt ist. Die Drehung des Werkzeugträgers und damit auch des Schnittwerkzeuges um die Achse I wird durch die mechanische Verbindung zu dem innen liegenden Kraftaufnehmer verhindert und somit die Messung der Tangentialkraft ermöglicht. Die Drehung der Schwinde um die Achse II, in der der Werkzeugträger mit dem Schnittwerkzeug montiert ist, wird durch den Kraftaufnehmer zur Messung der Radialkraft verhindert und somit deren Messung ermöglicht. Um die gesamte Anordnung zur Messung der Kräfte in tangentialer und radialer Richtung exakt zum durchlaufenen Kreisbogen ausrichten zu können, sind die mechanischen Komponenten, mit denen sie am Messkopf befestigt sind, so konstruiert, dass sie relativ zum Messkopf verschiebbar und zum Teil auch drehbar sind. Die wichtigsten Abmessungen sowie die messtechnisch erfassten Größen sind in Abbildung 3-7 dargestellt. Die äußere Kante des verwendeten Schnittwerkzeuges durchläuft bei der Bewegung des Pendelarms einen Kreisbogen mit dem Radius  $r = 940 \text{ mm}$ . Die Schnitttiefe liegt je nach der Dicke der tragseitigen Deckplatte zwischen  $14 \text{ mm}$  und  $27 \text{ mm}$ . Der Schwerpunkt aller drehenden Komponenten durchläuft einen Kreisbogen mit einem Radius von  $r_{SP} = 520 \text{ mm}$ . Unter Berücksichtigung der vorliegenden Hebellängen werden von den Kraftaufnehmern die an der Spitze des Werkzeuges wirkenden Kräfte in tangentialer sowie in radialer Richtung zum Kreisbogen gemessen. Zusätzlich wird der Drehwinkel des Pendelarms über ein an der Drehachse befestigtes Potentiometer gemessen.



**Abbildung 3-7:** Abmessungen und Messgrößen am Pendelschlagwerk [WO08].

Als Schnittwerkzeug wird ein Rohr aus Vergütungsstahl verwendet, das einen Außendurchmesser von  $25 \text{ mm}$  besitzt und dessen schneidendes Ende unter einem Winkel von  $30^\circ$  angeschnitten ist. Um die Reibung zwischen dem Schnittwerkzeug und dem

umgebenden Gummi zu minimieren, ist das Schnittwerkzeug gegenüber der kreisförmigen Bahnkurve um  $15^\circ$  geneigt, so dass zwischen Schnittwerkzeug und dem geschnittenen Gummi ein entsprechender Freiwinkel entsteht.

In Analogie zu einem Pendel kann die Kinetik des Pendelschlagwerkes beschrieben werden. Ein Pendel, das aus seiner vertikalen Ruhelage ausgelenkt wird, schwingt unter dem Einfluss der Fallbeschleunigung zurück. Im Gegensatz zu einem idealisierten mathematischen Pendel, bei dem die gesamte Masse des Pendels als Punktmasse betrachtet wird, muss das Pendelschlagwerk als physikalisches Pendel behandelt werden. Die kinetische Energie  $E_{kin}$  des Pendels errechnet sich nach der Beziehung:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J_0 \cdot \varphi^2$$

Da die Drehachse des Pendels nicht durch den Schwerpunkt verläuft, muss bei der Berechnung des Trägheitsmomentes der Steiner-Anteil berücksichtigt werden. Das Trägheitsmoment  $J_0$  errechnet sich demnach zu:

$$J_0 = J_S + m_p \cdot r_{SP}^2$$

Mit der Masse des Pendels  $m_p = 62,15$  kg sowie dem aus den Konstruktionsdaten bekannten Trägheitsmoment durch den Schwerpunkt  $J_S = 7,67$  kgm<sup>2</sup> berechnet sich das Trägheitsmoment  $J_0$  mit dem Schwerpunktabstand  $r_{SP}$  gemäß der vorhergehenden Gleichung zu 24,5 kgm<sup>2</sup>.

Die kinetische Energie des Pendels wird demnach über die durch das Drehpotentiometer gemessene Winkelgeschwindigkeit und das errechnete Trägheitsmoment  $J_0$  berechnet. Die während des Schnittvorgangs verrichtete Arbeit entspricht unter idealen Bedingungen der kinetischen Energie des Pendels und errechnet sich aus der Integration der in Schnittrichtung wirkenden Tangentialkraft  $F_t$  über den zurückgelegten Weg des Schnittwerkzeuges zu:

$$W_S = \int_0^s F_t \cdot ds$$

Die so ermittelbare Arbeit ist unter idealen Bedingungen mit der kinetischen Energie des Pendels vergleichbar. Entsprechend der vier verschiedenen Höhen, aus denen das Pendel ausgelöst werden kann, ergeben sich die in Tabelle 3-13 dargestellten Energien und Kenngrößen.

Auslösehöhe	H1	H2	H3	H4
Auslenkwinkel $\varphi$ in °	42	69,5	108	161,3
kinetische Energie $E_{kin}$ in J	54	170	384	618
max. Winkelgeschwindigkeit in 1/s	2,1	3,7	5,6	7,1
Bahngeschwindigkeit <sup>26</sup> $v$ in m/s	1,98	3,5	5,2	6,6

**Tabelle 3-13:** Kenngrößen des Pendelschlagwerks bei verschiedenen Auslösehöhen [WO08].

### Charakteristik des Schnittvorgangs

Unabhängig von der kinetischen Energie des Pendels, vom zu untersuchenden Deckplattenwerkstoff sowie dessen Temperatur ergibt sich für alle Messungen ein charakteristischer Verlauf der gemessenen sowie daraus berechneten Größen. Dieser Verlauf ist in Abbildung 3-8 beispielhaft für einen Versuch dargestellt. Der gesamte Schnittvorgang ist in mehrere Phasen eingeteilt, eine Kennzeichnung der einzelnen Phasen ist anhand der Nummerierung in den jeweiligen Verläufen zu erkennen.

<sup>26</sup> Gemessen an der äußeren Kante des Schnittwerkzeuges.



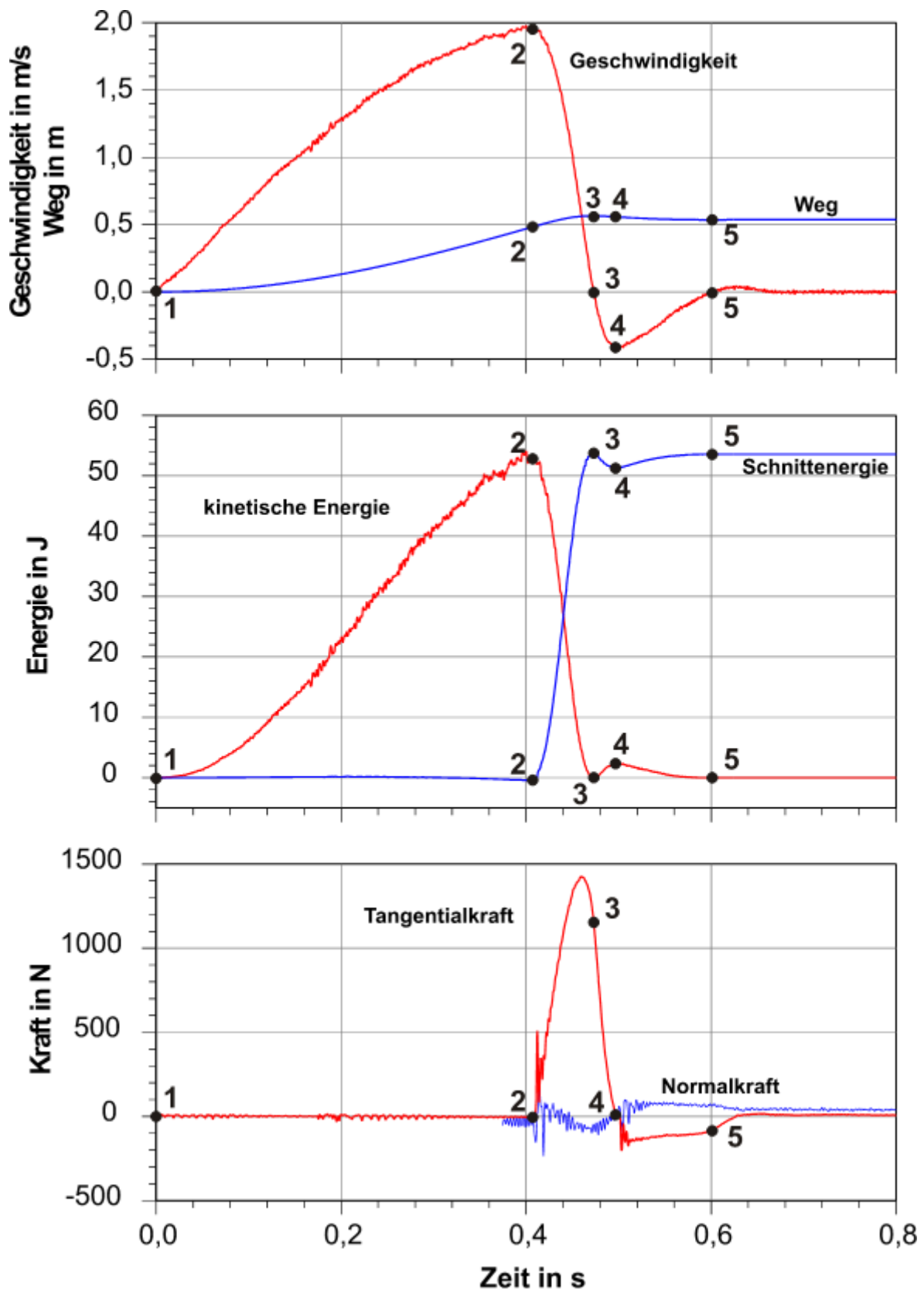
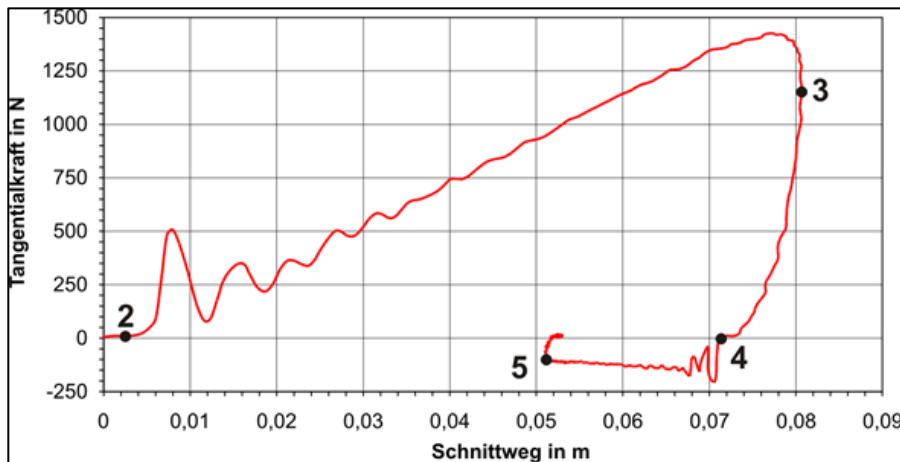


Abbildung 3-8: Charakteristische Verläufe ausgewählter Größen beim Schnittvorgang [WO08].

Phase	Kennzeichnung	Beschreibung
I	1 nach 2	<b>Beschleunigung</b> Über die Auslösevorrichtung wird die Arretierung des Pendels gelöst, so dass dieses unter dem Einfluss der Fallbeschleunigung bis zum Kontakt des Prüfwerkzeuges mit der Fördergurtprobe beschleunigt wird.
II	2 nach 3	<b>Schnittvorgang</b> Das Prüfwerkzeug trifft auf die Fördergurtprobe und schneidet und verformt die tragseitige Deckplatte. Der größte Anteil der kinetischen Energie wird dabei in Schnittenergie umgewandelt, diese nimmt entsprechend der Abnahme der kinetischen Energie stetig zu. Ein deutlich kleinerer Anteil der eingebrachten kinetischen Energie wird zur elastischen Deformation der Deckplatte genutzt und verbleibt als potentielle Energie im System. Die Tangentialkraft nimmt nach dem Durchlaufen eines kurzen Einschwingvorgangs stetig zu und durchläuft einen Maximalwert.
III	3 nach 4	<b>Rückwärts gerichtete Beschleunigung</b> Aufgrund der potentiellen Energie, die in der elastischen Verformung der Deckplatte gespeichert ist, wird das Pendel entgegen der ursprünglichen Bewegungsrichtung beschleunigt und bewegt. Am Ende dieser Phase, in den Diagrammen mit 4 gekennzeichnet, ist die elastische Verformung der Deckplatte vollständig abgebaut. Die kinetische Energie des Pendels erreicht ein Zwischenmaximum, die Tangentialkraft nimmt ab und erreicht den Wert Null.
IV	4 nach 5	<b>Rückwärts gerichtete Bewegung</b> Aufgrund der in Phase III erfolgten Beschleunigung entgegen der ursprünglichen Bewegungsrichtung wird das Schnittwerkzeug wieder aus dem Schnittbereich des Deckplattenwerkstoffes herausgezogen. Die Tangentialkraft nimmt dabei negative Werte an. Die Geschwindigkeit und damit auch die kinetische Energie gehen bis auf den Wert Null zurück.

**Tabelle 3-14:** Phasen des Schnittvorgangs [WO08].

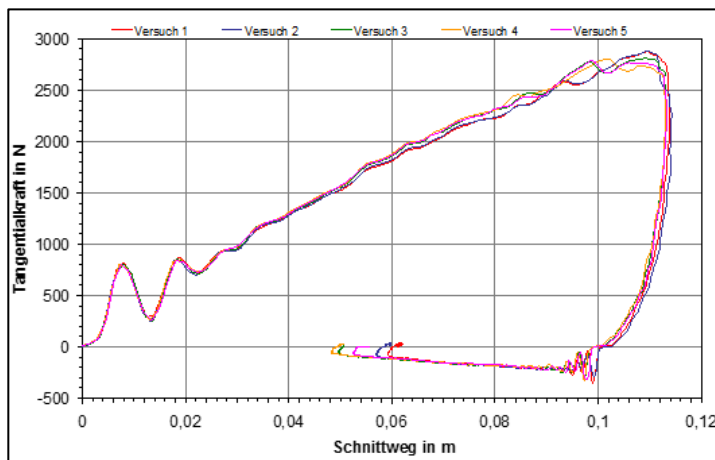
Für eine vergleichende Bewertung verschiedener Deckplattenwerkstoffe eignet sich besonders die Darstellung der Tangentialkraft in Abhängigkeit vom Weg des Schnittwerkzeuges. Um verschiedene Versuche besser miteinander vergleichen zu können, werden alle Wegmesswerte so verschoben, dass der Nullpunkt des Weges mit dem Punkt der ersten Berührung des Schnittwerkzeuges mit der tragseitigen Deckplatte des Fördergurtes übereinstimmt. Diese Art der Darstellung, die in Abbildung 3-9 exemplarisch für den zuvor bereits erläuterten Versuch gezeigt ist, bietet den Vorteil, dass die die Schnittfestigkeit beschreibende maximale Tangentialkraft sowie die Schnittlänge bei verschiedenen Deckplattenwerkstoffen direkt miteinander verglichen werden können.



**Abbildung 3-9:** Kraft-Weg-Diagramm [WO08].

### Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse

Auch bei der Ermittlung der Schnittfestigkeit ist die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse bei gleichen Randbedingungen eine Grundvoraussetzung für die Durchführung von vergleichenden Untersuchungen. Abbildung 3-10 zeigt die Kraft-Weg-Diagramme von fünf Versuchen, die an derselben Fördergurtprobe bei einer Temperatur von 20 °C und der Auslösehöhe H2 ermittelt worden sind.



**Abbildung 3-10:** Reproduzierbarkeit der Untersuchungen zur Schnittfestigkeit [WO08].

Es wird deutlich, dass die Kraft-Weg-Verläufe der verschiedenen Versuche nahezu identisch sind. Für die dargestellten Verläufe konnte ein Mittelwert der jeweils maximalen Tangentialkraft von 2832 N ermittelt werden. Die auf diesen Mittelwert bezogene Spannweite über die jeweils gemessenen maximalen Tangentialkräfte beträgt 3 %, die mittlere Abweichung vom Mittelwert beträgt 1 %.

Der Mittelwert der jeweils maximal gemessenen Schnittwege beträgt 0,114 m. Die Spannweite über alle Einzelmessungen beträgt 1,1 %, die mittlere Abweichung vom Mittelwert beträgt 0,4 %. Diese Werte bestätigen die gute Reproduzierbarkeit der

Messwerte unter gleichen Randbedingungen, so dass das Prüfverfahren zur vergleichenden Beurteilung der Schnitffestigkeit von Deckplatten für Fördergurte herangezogen werden kann.

### Prüfparameter

Die Ermittlung der Schnitffestigkeit erfolgt unter den folgenden Randbedingungen:

- Auftreffenergie ~ 54 J (H1)
- Auftreffgeschwindigkeit: ~ 1,98 m/s
- Probentemperatur: Raumtemperatur, ~ 20 °C
- Schnitttiefe: Serie 1: 8 mm; Serie 2: 5 mm

Die Nomenklatur der Proben lautet wie folgt:

Serie 1 (Skim Compound):

- Referenz
- 17 % rCB
- 33 % rCB
- 66 % rCB
- 100 % rCB

Es werden von jedem Probentyp zwei Proben mit den Abmessungen (B x L x H) 60 mm x 210 mm x 10 mm hergestellt, wobei je Probe jeweils zwei Versuche durchgeführt werden konnten.

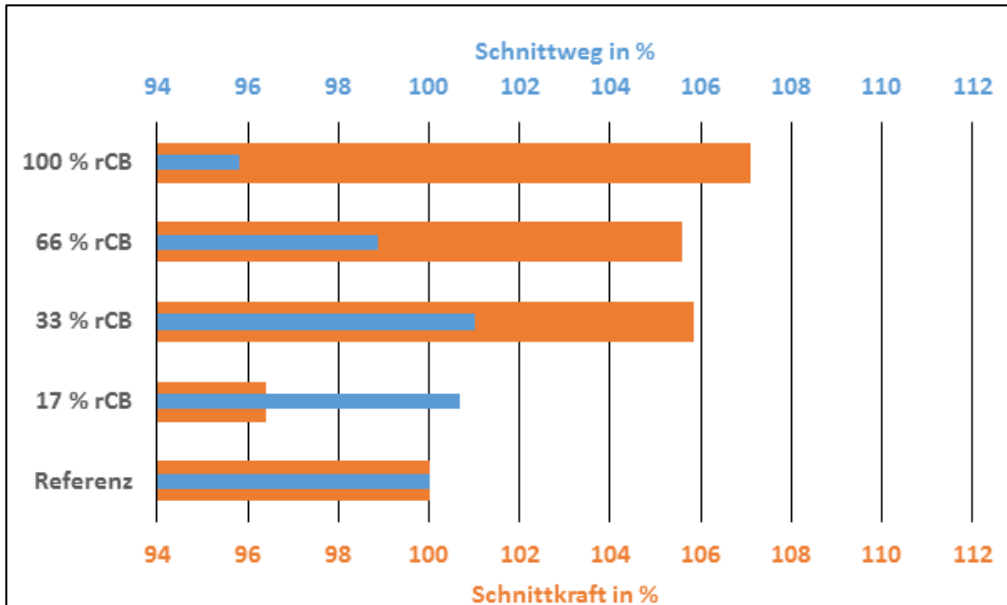
Serie 2 (Cover Compound):

- Referenz
- 18 % rCB
- 50 % rCB
- 100 % rCB

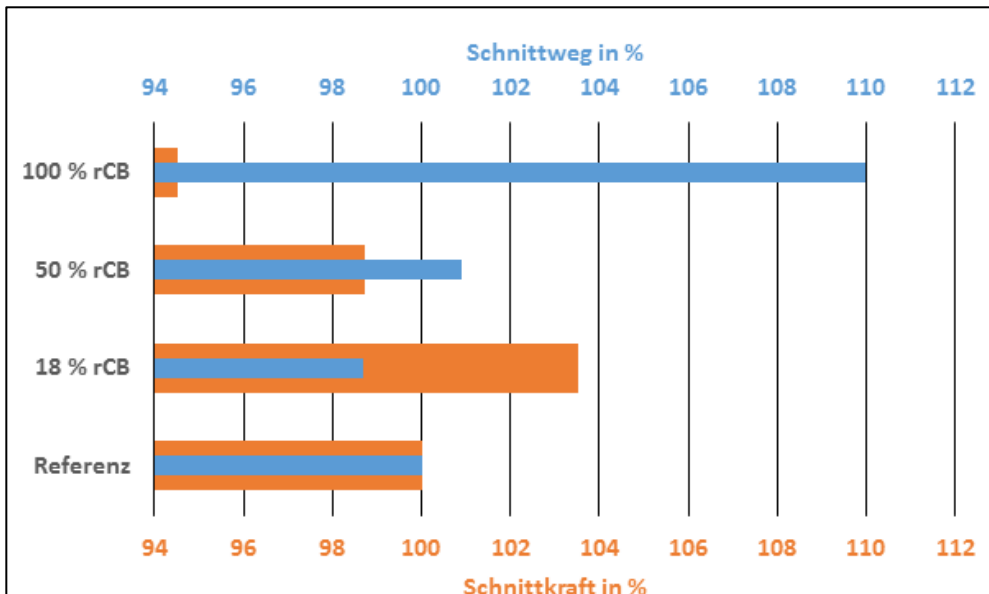
Es wird von jedem Probentyp eine Probe mit den Abmessungen (B x L x H) 60 mm x 300 mm x 6 mm hergestellt, wobei je Probe zwei Versuche durchgeführt werden konnten.

### Messergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse als Gegenüberstellung der gemittelten Werte der Tangentialkräfte sowie der Schnittlänge der Probentypen gezeigt.



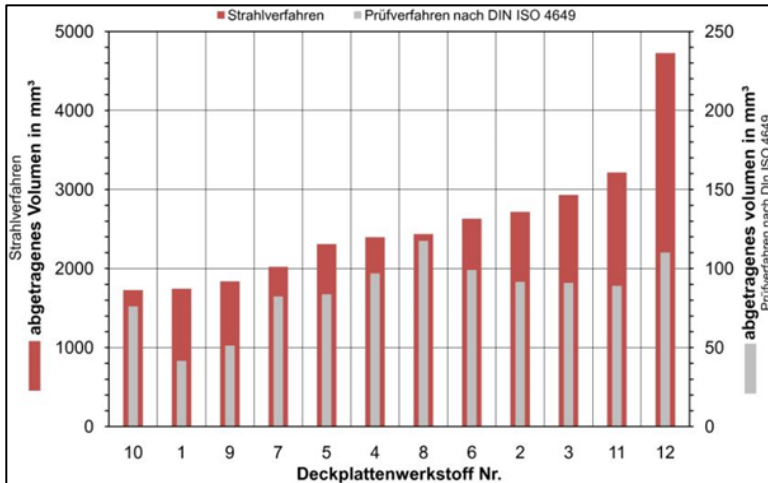
**Abbildung 3-11:** Vergleich der gemittelten Resultate der unterschiedlichen Probentypen der Serie 1.



**Abbildung 3-12:** Vergleich der gemittelten Resultate der unterschiedlichen Probentypen der Serie 2.

### 3.3.1.2 Ermittlung der Verschleißbeständigkeit

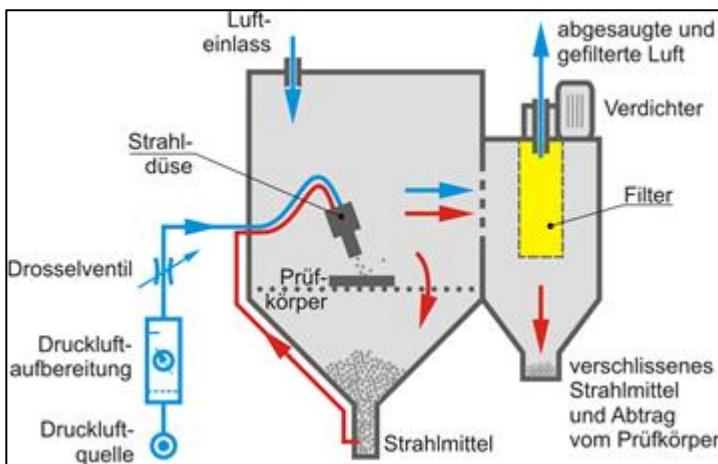
Bei dem in DIN ISO 4649 [DIN14] festgelegten Verfahren zur Bestimmung des Abriebwiderstandes von Elastomeren ist zu beachten, dass die Abnutzungsverhältnisse und Verschleißmechanismen teilweise nur schlecht mit den im Betrieb auftretenden Bedingungen übereinstimmen. Bei Förderanlagen, an denen abrasiver Verschleiß durch den Transport von Schüttgütern auftritt, bietet eine Strahlverschleißprüfung mittels Abrasivmaterialien eine bessere Korrelation mit der Praxis. In Abbildung 3-13 ist die Gegenüberstellung der beiden genannten Verfahren dargestellt, wobei die Ergebnisse durch das Strahlverfahren im Rahmen von Feldmessungen an Förderanlagen verifiziert werden konnten.



**Abbildung 3-13:** Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN ISO 4649 und dem Strahlverfahren für unterschiedliche Deckplattenwerkstoffe [WO08].

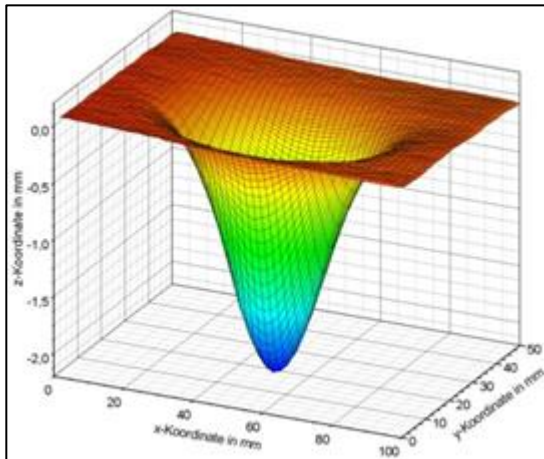
### Prüfstand

Der Prüfstand zur Untersuchung der Abrasionsbeständigkeit von Fördergurtproben mittels Strahlverfahren ist in Abbildung 3-14 schematisch dargestellt. Hierbei wird eine Sandstrahlkabine verwendet, in welcher der Probekörper durch eine spezielle Aufnahme lagegetreu fixiert wird. Anschließend wird die Probe mit einem Strahlmittel unter konstanten Bedingungen bezüglich Abstand zwischen Düse und Probe, Strahlwinkel, Strahldruck und Prüfdauer abrasiv beansprucht.



**Abbildung 3-14:** Versuchsaufbau zur Untersuchung des abrasiven Verschleißes mittels Strahlverfahren an Fördergurtproben [WO08].

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung wird das abgetragene Volumen mittels 3D-Scantechnologie ermittelt. Die folgende Abbildung 3-15 zeigt ein exemplarisches Ergebnis.



**Abbildung 3-15:** Exemplarisches Versuchsergebnis zur Untersuchung der Abrasionsbeständigkeit einer Fördergurtprobe [WO08].

### Prüfparameter

Die Ermittlung der Abrasionsbeständigkeit erfolgt unter den folgenden Randbedingungen:

- Strahlmittel: Korund F16
- Strahlwinkel: 30 °
- Strahlabstand: 70 mm
- Strahldruck: 2,5 bar
- Massestrom: 3 kg/min
- Prüfdauer: 216 min

Die Nomenklatur der Proben ist mit denen der Schnitffestigkeit identisch.

### Messergebnisse

	abgetragenes Volumen in %	Härte (Sh A) in %
Referenz	100	100
17 % rCB	53	125
33 % rCB	95	109
66 % rCB	67	129
100 % rCB	111	109

**Tabelle 3-16:** Ergebnisse der abrasiven Untersuchungen Serie 1.

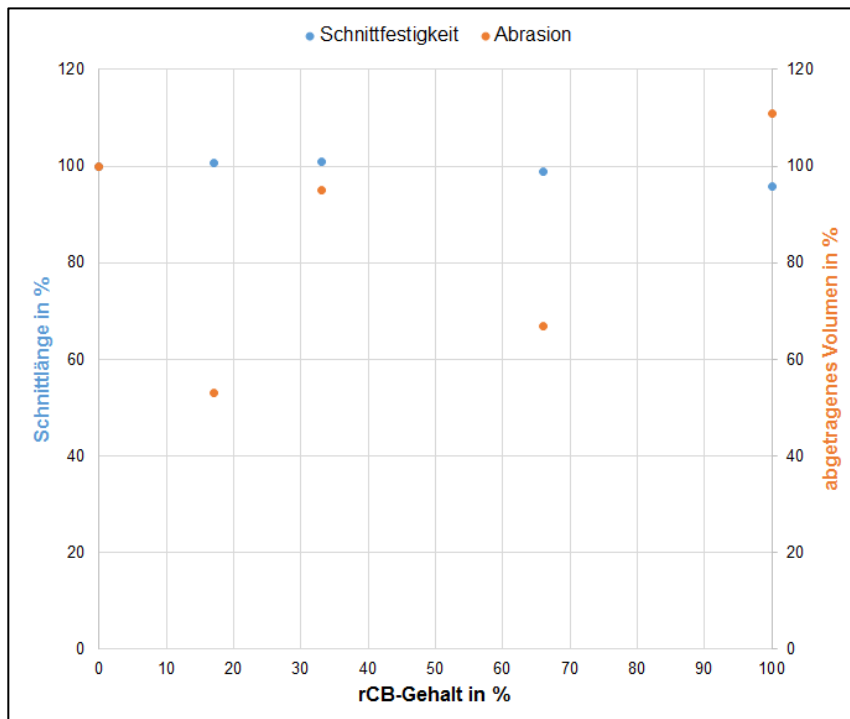
	abgetragenes Volumen in %	Härte (Sh A) in %
Referenz	100	100
18 % rCB	65	103
50 % rCB	37	100
100 % rCB	50	95

**Tabelle 3-17:** Ergebnisse der abrasiven Untersuchungen Serie 2.

### 3.3.1.3 Analyse der Messergebnisse

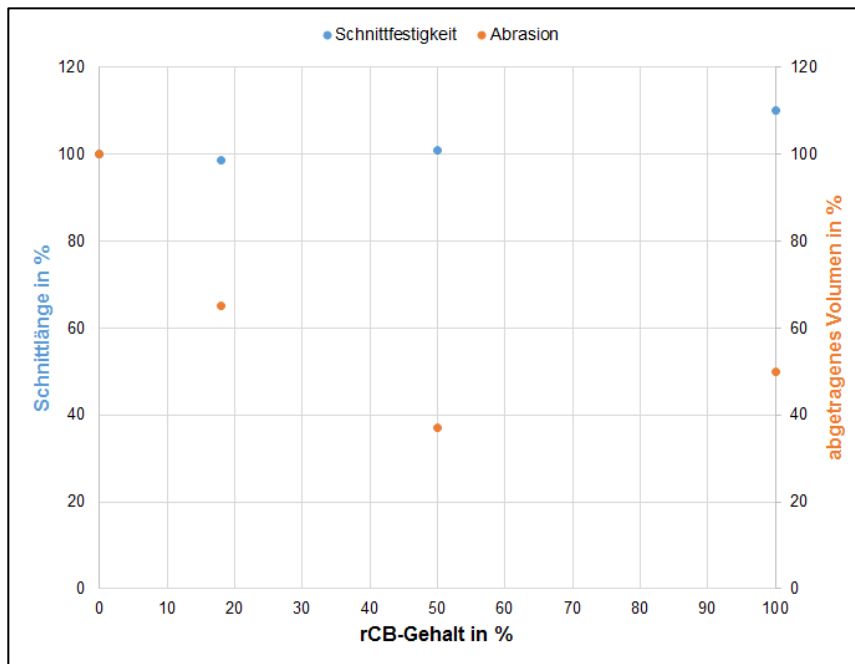
Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass eine sehr starke Schwankung hinsichtlich der Härte der Proben, gerade im Hinblick auf Serie 1 festgestellt werden kann. Hierdurch werden auch die Ergebnisse des abgetragenen Volumens durch die abrasive Beanspruchung sowie der Schnittfestigkeitsuntersuchungen deutlich beeinflusst.

In den folgenden Abbildungen 3-16 und 3-17 sind die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen bezüglich des Materialverschleißes der Proben der Serien 1 und 2 gegenübergestellt.



**Abbildung 3-16:** Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Schnittfestigkeits- und Abrasionsuntersuchung der untersuchten Proben der Serie 1 (Skim Compound).





**Abbildung 3-17:** Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Schnittfestigkeits- und Abrasionsuntersuchung der untersuchten Proben der Serie 2 (Cover Compound).

Anhand der Ergebnisse kann grundlegend abgeleitet werden, dass die abrasive Beständigkeit im Vergleich zum Referenzcompound mit zunehmendem rCB-Gehalt gesteigert wird. In Bezug auf die Schnittfestigkeit zeigt sich keine wesentliche Beeinflussung durch die Verwendung des rCBs.

### 3.3.1.4 Ermittlung der Seilausreißfestigkeit, des Eindrückrollwiderstandes und Verbindungsprüfung nach DIN 22110-3

Die Ermittlung der Seilausreißfestigkeit an Stahlseilfördergurtproben wird im Rahmen des Projektes nicht weiter verfolgt, da zunächst die technischen Eigenschaften des Elastomers untersucht werden sollen. Die Ermittlung des Eindrückrollwiderstandes eines Fördergurtes kann im Rahmen des Projektes nicht umgesetzt werden, da hierzu ein Fördergurtmuster im vergrößerten Maßstab notwendig ist. Die hierzu benötigte sehr große Menge an rCB auf Basis pyrolysierten Fördergurtes zur Herstellung dieser Probenkörper kann im Rahmen dieses Projektes nicht produziert werden. Selbiges gilt für die Ermittlung der Verbindungsfestigkeit eines mit rCB hergestellten Fördergurtes, aufgrund der Dimensionen des Probenkörpers.

### 3.3.2 Wirtschaftlichkeitsprüfung

Um eine gute Wirtschaftlichkeitsprüfung durchzuführen, wird das aus den Fördergurten erhaltene rCB bzw. das Herstellungsverfahren mit dem von altreifenbasierten rCB verglichen.

### 3.3.2.1 Energiebilanzierung des Verfahrens

Hauptverbraucher von Energie während des Gesamtprozesses von Fördergurten zu rCB sind die Pyrolyseöfen, welche mit Erdgas beheizt werden. Dabei ist festzustellen, dass sich der Energieverbrauch hauptsächlich von der eingesetzten Inputmenge abhängt, während die Zusammensetzung des Materials (Altreifen oder Fördergurt) kaum Einfluss zu haben scheint. Aufgrund der leicht schwankenden Mengenbeladung der Körbe, der unterschiedlichen Porositäten in den jeweiligen Schüttungen sowie der nicht vollständig kontrollierbaren Zusammensetzung der Schüttung aus z.T. inhomogenem Inputmaterial, variiert die aufzuwendende Energie in einer gewissen Bandbreite bezogen auf die eingesetzte Menge.

Bezogen auf die gesamte Returnprozesskette<sup>27</sup> kann bei der Verarbeitung von Fördergurten - mit den bis dato erarbeiteten Daten - kein messbar höherer Energieverbrauch im Vergleich zur Verarbeitung von Altreifen festgestellt werden. Das könnte eventuell aber auch an der, für industrielle Verhältnisse vergleichsweise kleinen verarbeiteten Menge, sowie an der o.g. normalen Schwankungsbandsbreite liegen. Allerdings verändern sich die auf die Produkte bezogenen Energieverbräuche in der Pyrolyse bei unterschiedlichen Ausgangsmaterialien entsprechend mit den veränderten Massenanteilen (Ausbeuten). So ergibt sich, bezogen auf die Produktion von einer Tonne rCB aus Fördergurten, aufgrund der im Vergleich zur Altreifen-rCB ein um ca.  $10\pm 2\%$  geringeren Rohcarbon-Ausbeute bei der Pyrolyse, ein Gesamtenergieverbrauch von ca. 7,6 - 8,1 MWh/t rCB. Bei der Verarbeitung von Altreifen werden lediglich ca. 6,5 MWh/t rCB benötigt. Daraus errechnet sich ein um ca.  $20\pm 5\%$  höherer Gesamtenergieverbrauch pro erzeugter Tonne rCB. Nicht berücksichtigt hierbei ist der Energieverbrauch für die Zerkleinerung der Fördergurte in Shreds der Abmessung 200 mm x 200 mm. Dieser kann grob mit ca. 6 kWh/t Stahlseilfördergurt bzw. umgerechnet auf eine Tonne rCB mit ca. 24 kWh/ t rCB angegeben werden<sup>28</sup>. Positiv zu erwähnen ist, dass bei der Verwendung von rCB in der Herstellung neuer Fördergurte im Vergleich zum Einsatz konventioneller Füllstoffe keine höheren Energieeinsätze oder Kosten (z.B. durch Anpassung von Mischanlagen etc.) zu erwarten sind.

### 3.3.2.2 Kostenbilanzierung des Gesamtverfahrens

Die Kosten des Produktes verteilen sich auf die Teilprozesse Inputbeschaffung, Pyrolyse und Nachveredelung sowie in einen Fixanteil und einen variablen (flexiblen) Teil. Die fixen Kosten sind abhängig vom Jahresdurchsatz im Allgemeinen. Bei gleichem

---

<sup>27</sup> D.h. auf die Verarbeitung einer definierten Menge an Inputmaterial zu rCB, Pyrolyseöl, Pyrolysegas & Stahl.

<sup>28</sup> Berechnet auf Grundlage der halbautomatischen Schneidvorrichtung WACO-CUT. Dieser Wert ist nur als sehr grober Anhaltspunkt zu verstehen, da bei einem großindustriellen Schredder-Prozess aus wirtschaftlichen Gründen eine vollautomatische Schredderanlage mit einer anderen Technologie eingesetzt werden sollte.

Durchsatz und Aufwand kann eine Vergleichbarkeit zum Standardprozess der Altreifenverarbeitung ermöglicht werden. Zunächst wird für den fixen Teil (u.a. Personalkosten) angenommen, dass sich das Produkt aus Fördergurten entsprechend der Massenanteile gegenüber dem altreifenbasierten Produkt verhält, also ca. 50% höhere Personalkosten zu verzeichnen sind. Weitergehende Aussagen können erst nach längerer Produktionsdauer getroffen werden, welche den Rahmen dieses Forschungsvorhabens überschreiten würden und Gegenstand eines Folgeprojekts werden können. Der flexible Anteil lässt sich einfacher berechnen, hängt allerdings von vielen Faktoren ab, welche alle erfasst werden müssen. Die Ermittlung der Herstellungskosten beruht weiterhin auf den aktuellen Verkaufs- bzw. Entsorgungskosten sämtlicher Nebenprodukte.

Einen Verkaufswert besitzen die folgenden Produkte:

- rCB als Hauptprodukt
- Pyrolyseöl als Nebenprodukt
- Stahl als Nebenprodukt
- Pyrolysegas in der Substitution von Erdgas als Brenngas<sup>29</sup>

Flexible Kosten werden hauptsächlich durch die folgenden Blöcke verursacht:

- Beschickung der Körbe mit (unüblichem) Material
- Energiekosten Pyrolyseteil
- Kosten Inertgas (Stickstoff)
- Energiekosten Rohcarbon-Stahl-Trennung
- Energiekosten Feststoffteil: Vermahlung, Pelletierung und Trocknung
- Kosten Altgummishreds
- Entsorgungskosten schlammiges Abwasser.
- Kosten für Wartung und Instandhaltung

Es ist zu beachten, dass es sich bei allen Versuchen innerhalb dieses Projekts um Forschungsversuche handelt und darüber hinaus der Pyrolysereaktor aufgrund der Abmessungen und der Wicklungsgeometrie des Inputmaterials nicht vollständig beschickt werden kann. Deshalb sind die abgeleiteten Kosten v.a. für den Teilprozess Pyrolyse aber in abgeschwächter Form auch für den Teilprozess Nachveredelung nur als grobe Anhaltspunkte zu betrachten. Um dennoch eine möglichst realitätsnahe vergleichende Kostenanalyse durchführen zu können wird diese Wirtschaftlichkeitsanalyse unter der Annahme von geschredderten Fördergurten durchgeführt, da so die Beschickungsgrade der Pyrolysereaktoren beider Inputmaterialien vergleichbar ist.

---

<sup>29</sup> Wird momentan noch nicht genutzt und ist deshalb in den nachfolgenden Kalkulationen nicht berücksichtigt.

Was sich jedoch zweifelsohne feststellen lässt ist, dass die Pyrolyse - abgesehen von den veränderten Ausbeuten- vergleichbar mit der Pyrolyse mit Altreifenshreds verläuft. Da auch bei der Nachveredelung keine signifikanten Unterschiede zur Nachveredelung von altreifenbasierten Material auftreten, kann man daraus schließen, dass sich die Energiekosten für Vermahlung, Perlierung und Trockner sehr wahrscheinlich bei einer kommerziellen Rückgewinnung von rCB aus Fördergurten nicht signifikant von den bereits etablierten Rückgewinnung von rCB aus Altreifen unterscheiden wird. Aus den Laborversuchen (FGH 1 & 2) und dem industriellen Testlauf (P62) lassen sich folgende Berechnungen durchführen:

Material	Ausbeute [% w/w]			
	rCB (Altreifen)	rCB (P62)	Laborversuch FGH 1 <sup>30</sup>	Laborversuch FGH 2 <sup>31</sup>
rCB	35	23	27 <sup>32</sup>	24 <sup>32</sup>
Pyrolyseöl	40	43	27	28
Pyrolysegas	12	13	9	9
Stahldraht	12	20	36	38
Sonstiges <sup>33</sup>	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1

**Tabelle 3-18:** Ausbeuten der Pyrolyse von Stahlseilfördergurten verglichen mit entsprechenden Ausbeuten einer Altreifenpyrolyse.

Die Werte aus Tabelle 3-18 können verrechnet werden mit den Materialwerten sowie den Beschaffungs- bzw. Entsorgungskosten für die diversen zurückgewonnenen bzw. verbrauchten Materialien. In Tabelle 3-19 sind typische Preise für die genannten Güter gelistet.<sup>34</sup>

Material	Materialwert, Beschaffungs- bzw. Entsorgungskosten [€ /t]
rCB	750
Pyrolyseöl	250
Stahldraht	120
Sonstiges	-300
Input: Altreifenshreds <sup>35</sup>	-30
Input: Fördergurtshreds	-68

**Tabelle 3-19:** Erlöse bzw. Aufwendungen pro Tonne Ausgangsmaterial- bzw. Produkte.

Aus den beiden vorgenannten Tabellen ergeben sich folgende zu erwartende Erlöse pro Tonne Inputmaterial:

<sup>30</sup> Gemessene Werte des kompletten Fördergurts von Hersteller 1.

<sup>31</sup> Gemessene Werte des kompletten Fördergurts von Hersteller 2.

<sup>32</sup> Rohcarbon

<sup>33</sup> Besteht im Wesentlichen aus Wasser und Schwebstoffen.

<sup>34</sup> Diese Preise sind abgerundet und basieren auf Preisen für 2015/2016.

<sup>35</sup> Preis bezieht sich auf deutsche PKW-Altreifenshreds.

Einnahmen pro t Inputmaterial [€]	rCB (Altreifen)	rCB (P62)	Laborversuch FGH 1	Laborversuch FGH 2
rCB	262,50	172,50	202,50	180
Pyrolyseöl	100	108	68	70
Pyrolysegas <sup>36</sup>	-	-	-	-
Stahldraht	18	30	54	57
Summe Erlös	381	310	324	307

**Tabelle 3-20:** Generierbare Erlöse der einzelnen Produkte pro Tonne Inputmaterial.

Um eine bessere Aussage über die Wirtschaftlichkeit treffen zu können, muss der Umsatz und die Kosten pro Tonne rCB berechnet werden. In Tabelle 3-21 ist hierfür eine Massenbilanz aufgestellt, aus dieser in Tabelle 3-22 die Kostenbilanz berechnet wird.

Massenbilanz in kg pro t rCB	rCB (Altreifen)	rCB (P62)	Laborversuch FGH 1	Laborversuch FGH 2
<i>Ausgangsmaterial</i>				
Altgummi	2857	4348	3704	4167
<i>Produkte</i>				
Pyrolyseöl	1143	1229	771	800
Pyrolysegas <sup>36</sup>	343	371	257	257
Stahldraht	343	571	1029	1086
Sonstiges	29	29	29	29

**Tabelle 3-21:** Massenbilanz pro erzeugter Tonne rCB.

Bilanz "Erlöse vs. Aufwendungen" pro t rCB [€]	rCB (Altreifen)	rCB (P62)	Laborversuch FGH 1	Laborversuch FGH 2
Altgummi	- 85,71	-293,48-	-250,00	-281,25
rCB	750	750	750	750
Pyrolyseöl	285,71	307,14	192,86	200,00
Stahldraht	51,43	85,71	154,29	162,86
Pyrolysegas <sup>36</sup>	-	-	-	-
Sonstiges	- 8,57	- 8,57	- 8,57	- 8,57
Produktionskosten <sup>37</sup>	-609	-874	-765	-847
∑ Erlöse	1087	1143	1097	1113
∑ Aufwendungen	-703	-1176	-1023	-1137
<b>EBITDA<sup>38</sup> [€]</b>	<b>+384</b>	<b>-34</b>	<b>74</b>	<b>-24</b>

**Tabelle 3-22:** Bilanzierung von "Erlöse vs. Aufwendungen" pro erzeugter Tonne rCB.

<sup>36</sup> Wird momentan noch nicht genutzt und ist deshalb in den Kalkulationen nicht berücksichtigt.

<sup>37</sup> Kalkulation bestehend im Wesentlichen aus Energie-, Inertgas- und Personalkosten sowie sonstigen Fixkosten.

<sup>38</sup> Nicht berücksichtigt sind hierbei weitere Kosten wie z.B. Verpackungs-, Versand- und Anlagenfinanzierungskosten.

Es ist erkennbar, dass der operative Gewinn (= EBITDA) für rCB aus Fördergurten deutlich niedriger als bei Altreifenbasierten rCB ausfällt. Im Falle des großindustriellen Versuchs ergibt sich dabei sogar ein negativer Wert, was bedeutet, dass bereits vor Abzug weiteren anfallender Aufwendungen nicht mehr von einem ökonomischen Nutzen gesprochen werden kann. Weitere zu erwartenden Kosten die entstehen können, sind die - aufgrund des höheren Stahlanteils in Fördergurtbasierten rCB höheren Verschleiß- und Wartungskosten bei der Stahl-Rohcarbon-Trennung. Der genaue Mehrkostenaufwand kann erst nach einer längeren Produktionsdauer beziffert werden und ist innerhalb dieser Berechnung damit nicht berücksichtigt.

Daraus jedoch der Thematik "Fördergurtrecycling" generell den ökonomischen Nutzen abzusprechen, entspricht dennoch nicht der Wahrheit. Die Gründe hierfür sind wie folgt:

- Nichtberücksichtigung der enormen Entsorgungskosten, welche dem Herstellern und Anwendern von Fördergurten jährlich entstehen. Diese liegen bei ca. 200 – 300 €/t Fördergurt<sup>39</sup>, würden bei einer kreislaufwirtschaftlichen Prozesskette (Fördergurt → Altfördergurt → Fördergurt-rCB → Neufördergurt etc.) nicht anfallen und könnten sich so entsprechend positiv auf die Beschaffungskosten auswirken.
- Signifikante Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei Rückführung von Fördergurten mit einem höheren Füllstoffanteil, da hierdurch die Ausbeute an wertvollen rCB steigt.
- Analog verhält es sich mit Fördergurten, welche Textilfasern anstelle von Stahldrähten beinhalten, da hierbei die Inputkosten deutlich geringer sind und - begünstigt durch die erhöhte Ölausbeute - der Gesamterlös aller Produkte höher liegt als der Gesamterlös entsprechender Stahlseilfördergurten.

Alternativ bzw. additiv trägt natürlich eine Erhöhung des an die entsprechenden Weltmarktpreise gekoppelten Verkaufspreises von Pyrolyseöl und Stahl ebenfalls zur Verbesserung der ökonomischen Bilanz bei. Ein möglicher Ersatz von Erdgas durch Pyrolysegas ist dagegen wirtschaftlich nur bedingt sinnvoll, da dies bei hohen Investitionskosten nur geringfügig erhöhte Einnahmen bringen würde.

Zusammenfassend lässt sich daher sagen, dass durch das bisherige Recycling von Stahlseilfördergurten vergleichbare bis etwas höhere Erlöse erzielt werden können, als dies beim Recycling von Altreifen der Fall ist. Aufgrund der höheren Herstellungskosten ist allerdings für eine ökonomisch sinnvolle Rückgewinnung von Fördergurt-rCB ein Aufpreis im Vergleich zu bereits am Markt etablierten Altreifen-rCB nötig ist.

---

<sup>39</sup> Entsorgungskosten für Altfördergurte der RWE Power AG (ca. 20% der Altfördergurte werden entsorgt).

Gründe hierfür sind vor allem die geringere rCB-Ausbeute und die daraus resultierenden erhöhten Personalkosten zur Produktion von einer Tonne rCB sowie der höhere Beschaffungspreis für das geschredderte Inputmaterial.

Werden diese jedoch die o.g. Aspekte mit berücksichtigt, so kann sich auch für den Aufbau einer kreislaufwirtschaftlichen Returnprozesskette ein ökonomisch rentables Bild ergeben.

## 4 Fazit

Im Rahmen des Projektes sind die ökonomischen, ökologischen und technischen Aspekte der Pyrolyse von Fördergurten zum Zwecke der Rückführung der Einzelbestandteile in die Fördergurtherstellungskette erforscht worden. Hierzu werden Fördergurte entsprechend pyrolysiert und erfolgreich in ihre Einzelbestandteile (Füllstoff, Stahl, Organische Komponenten) zerlegt. Die zurückgewonnenen Industrieruße werden anschließend ausführlich klassifiziert. Hierbei zeigt sich, dass in Abhängigkeit des zugeführten Fördergurtes eine gewisse Diskrepanz der Resultate bezüglich der chemischen Zusammensetzung auftritt, da die Fördergurte je nach Anforderung deutliche Abweichungen bezüglich der in der Produktion verwendeten Füllstoffe und Mengenanteile aufweisen. Die Untersuchungen zeigen auch, dass man - im Vergleich zu handelsüblichen altreifenbasierten rCB - bei der Pyrolyse von Stahlseilfördergurten einen grob vergleichbaren Anteil an organischen Material (Öl & Gas), einen höheren Stahlanteil, jedoch einen um ca.  $10 \pm 2$  % niedrigeren Rohcarbonanteil, erhält. Das nach Aufarbeitung und Veredelung erhaltene perlierte fördergurtbasierte rCB (P62) ist von einer Qualität, welche mit aus Altreifen gewonnenen rCB als übereinstimmend betrachtet werden kann.

Im Vergleich zu konventionell hergestellten CBs weisen die fördergurtbasierten rCBs ähnlich wie alle rCBs feedstockbedingt einen höheren Anteil an mineralischen und metallischen Komponenten auf. Positiv hervorzuheben ist jedoch der im Vergleich zu konventionell hergestellten Füllstoffen signifikant geringere Anteil an giftigen PAKs (Werte zwischen 5 und 25 %).

Die entstandenen rCBs werden innerhalb der Kreislaufwirtschaft in die Produktion von Fördergurtproben zurückgeführt. Dabei werden Muster von Fördergurtcompounds hergestellt, diese aus technischer Sicht auf deren Eigenschaften geprüft und einer konventionellen Fördergurtprobe mit ausschließlicher Verwendung von CB gegenübergestellt. Bei den Untersuchungen wird der Mengenanteil an verwendeten rCB bis hin zu einem vollständigen Ersatz (100 % rCB, 0 % CB) entsprechend variiert. Es zeigt sich, dass in Bezug auf die technischen Anforderungen ein Ersatz des CBs durch rCB von bis zu 100 % für Skim Compounds möglich ist. Die Verwendung von rCB im Core Compound bzw. innerhalb des Cover Compounds ist grundlegend möglich, jedoch nur bis zu einem gewissen Mengenanteils von etwa 25 %. Es ist hier allerdings zu erwähnen, dass die Vergleichsmaterialien bewusst von äußerst hoher Leistungsfähigkeit gewählt sind und es durchaus auch etwas weniger anspruchsvolle Core Compounds gibt, bei denen der erwartete Anteil an rCB höher sein sollte. Bezugnehmend auf die Verschleißuntersuchungen zeigt sich ein positiver Effekt unter der Verwendung des rCBs, da hierdurch die Schnitffestigkeit nur unwesentlich beeinflusst wird, wohingegen die



Abrasionsbeständigkeit sogar Verbesserung gegenüber dem Verhalten konventioneller CBs aufweist.

Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wird der Pyrolyseprozess zur Zersetzung von Fördergurten dem der Zersetzung von Altreifen gegenübergestellt. Hieraus ergibt sich bei der ökologischen Bilanzierung auf Basis des Energieverbrauches ein zusätzlicher Verbrauch von etwa  $20 \pm 5$  % bei der Pyrolyse von Fördergurten zur Erzeugung einer Tonne rCB. Hinsichtlich der ökonomischen Bilanzierung zeigt sich ebenfalls eine ausbaufähige Tendenz im Vergleich der beiden Ausgangsmaterialien Fördergurt und Altreifen. Hierbei zeigt sich ein niedrigerer operativer Gewinn für rCBs aus Fördergurten im Vergleich zu altreifenbasierten rCBs. Die wirtschaftliche Bilanzierung beinhaltet jedoch nicht die anfallenden Entsorgungskosten der Hersteller und Anwender, welche sich innerhalb einer kreislaufwirtschaftlichen Prozesskette bei Verwendung von rCB in der Fördergurtherstellung durch die Senkung der Beschaffungskosten des Altfördergurtes bilanzieren lassen. Eine gezielte Auswahl an Fördergurten in Bezug auf deren Aufbau, wie zum Beispiel ein hoher Füllstoffanteil oder ein textiler Zugträger kann ebenfalls zu einer deutlichen Verbesserung der ökonomischen Bilanz führen.

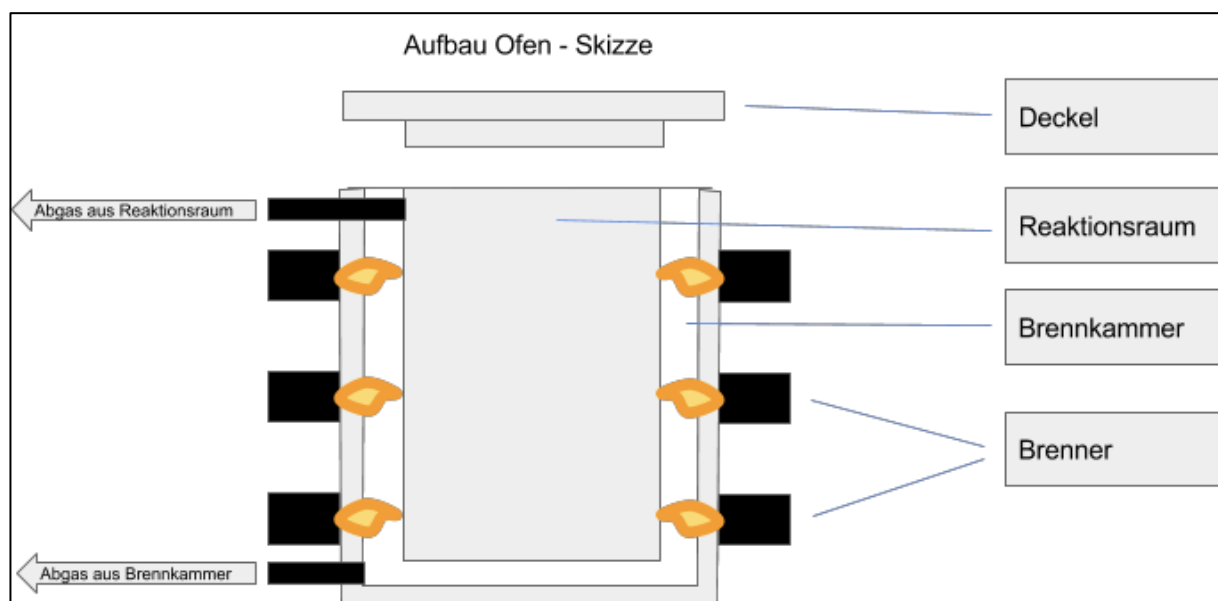
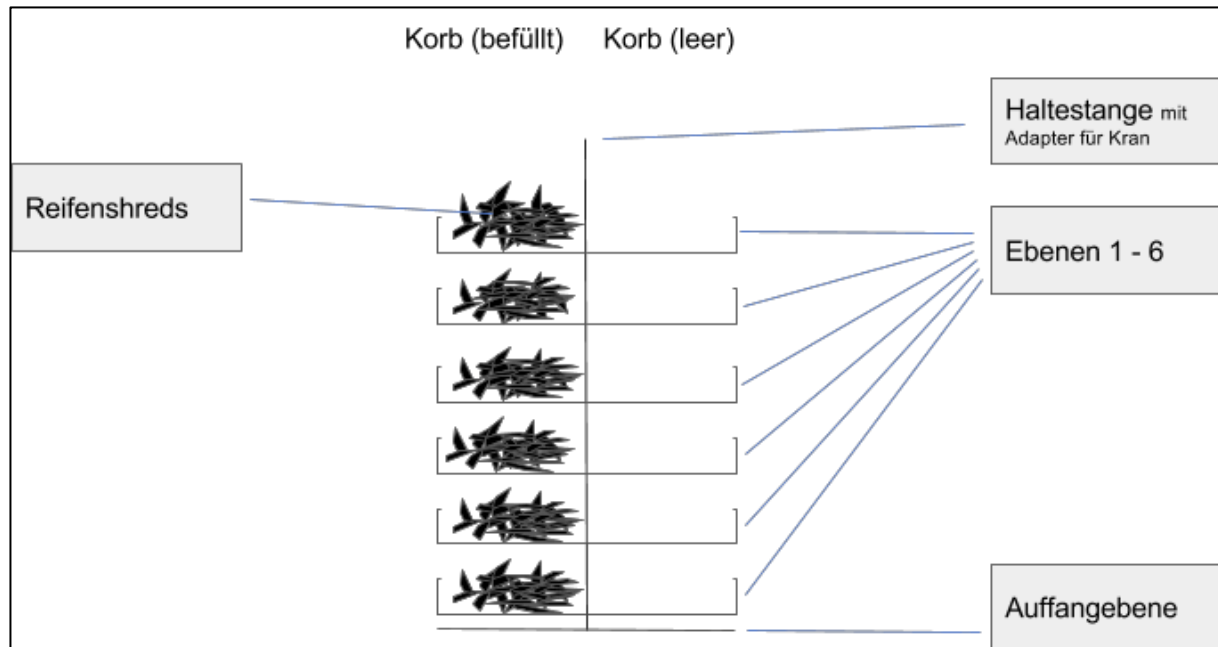
Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass das durch die Pyrolyse von Fördergurten gewonnene rCB aus großtechnischer Sicht erfolgreich möglich ist und durch Rückführung dieses ressourcen- und umweltschonenden Recyclingmaterials in den Fördergurtzyklus eine hervorragende Alternative zu konventionellen CBs im Bereich der Herstellung von Fördergurten darstellt. Die ökonomischen und ökologischen Aspekte können noch weiter positiv beeinflusst werden, wodurch die Umsetzung einer kreislaufwirtschaftlichen Returnprozesskette von Fördergurten möglich wird.

## Literaturverzeichnis

- [AST15] ASTM D3053-15, Standard Terminology Relating to Carbon Black, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [AST12] ASTM D1511-12, *Standard Test Method for Carbon Black—Pellet Size Distribution*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [Bac08] J. BACH: Verwertung von Altreifen und Gummi unter Beachtung der veränderten abfallwirtschaftlichen Situation in Deutschland; Diplomarbeit, Hochschule Magdeburg-Stendal (FH).
- [DBW93] J.P. DONNET, R. C. BANSAL, M.-J. WANG: *Carbon Black Science and Technology*. Marcel Dekker Inc, 2. Auflage, 1993.
- [DIN14] DIN ISO 4649, *Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Bestimmung des Abriebwiderstandes mit einem Gerät mit rotierender Zylindertrommel*, Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2014
- [Kel06] M. KELLER: *Wartung und Instandhaltung von Fördergurten an Beispielen aus der Praxis*, Haus der Technik e.V., Essen, 2006
- [WO08] T. WENNEKAMP, L. OVERMEYER: *Tribologische und rheologische Eigenschaften von Fördergurten*, Berichte aus dem ITA. Garbsen: PZH – Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2008

# Anhänge

## Anhang A1:



**Abbildung A1-1:** Geometrie und Befüllung eines Pyrolysekorbs (oben). Aufbau und Funktionsprinzip eines Pyrolyseofens (unten).

Anhang A2: Messergebnisse der Schnittfestigkeitsuntersuchungen:

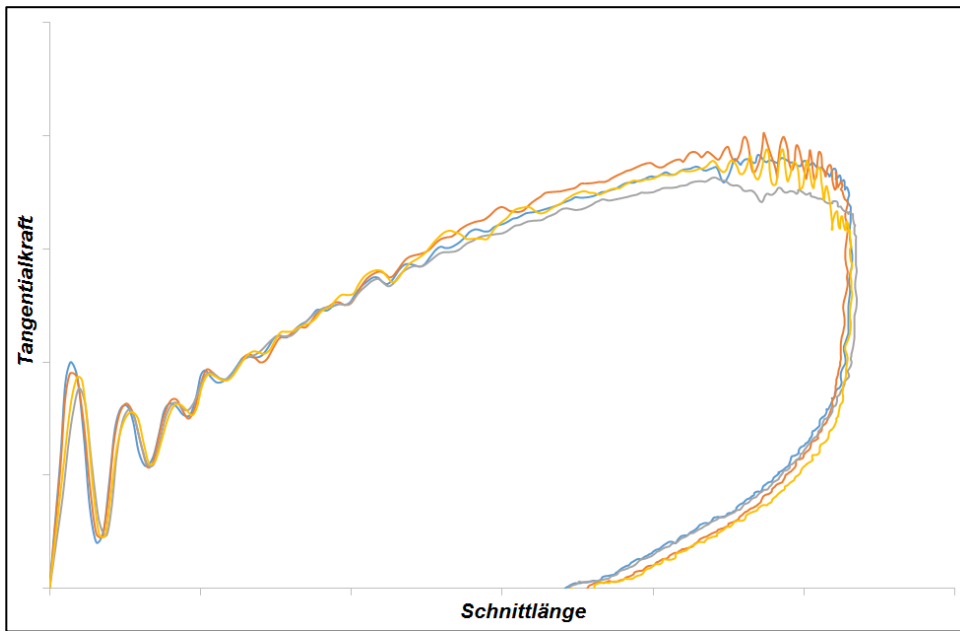


Abbildung A2-1: Kraft-Weg-Diagramm Probe „Referenz“ Serie 1.

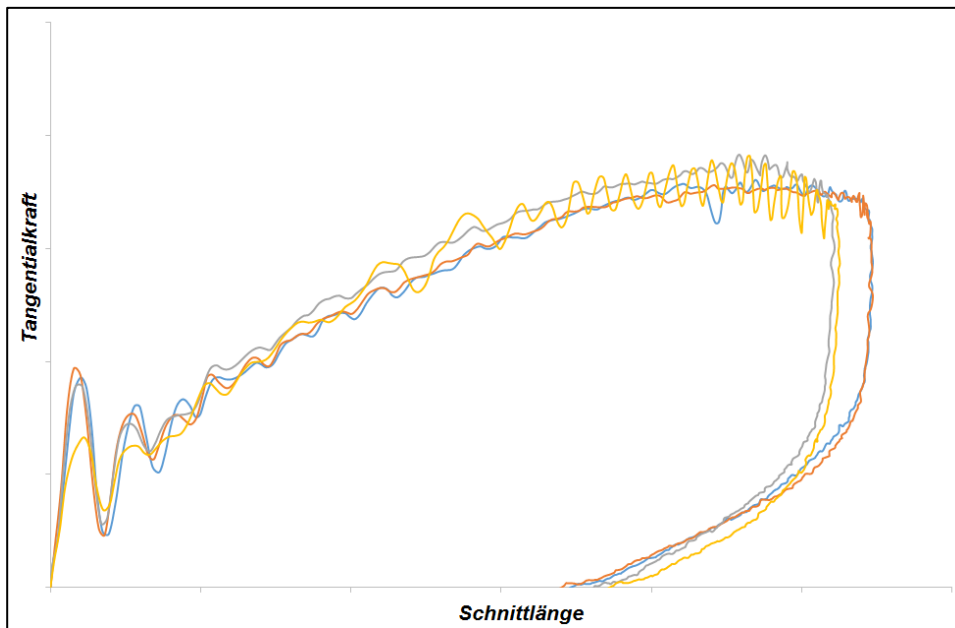
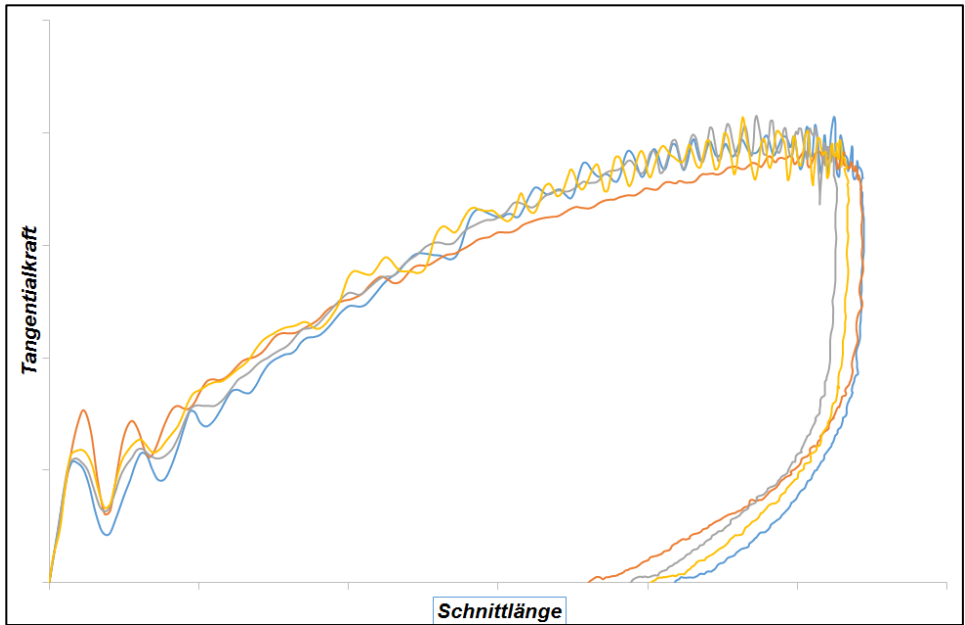
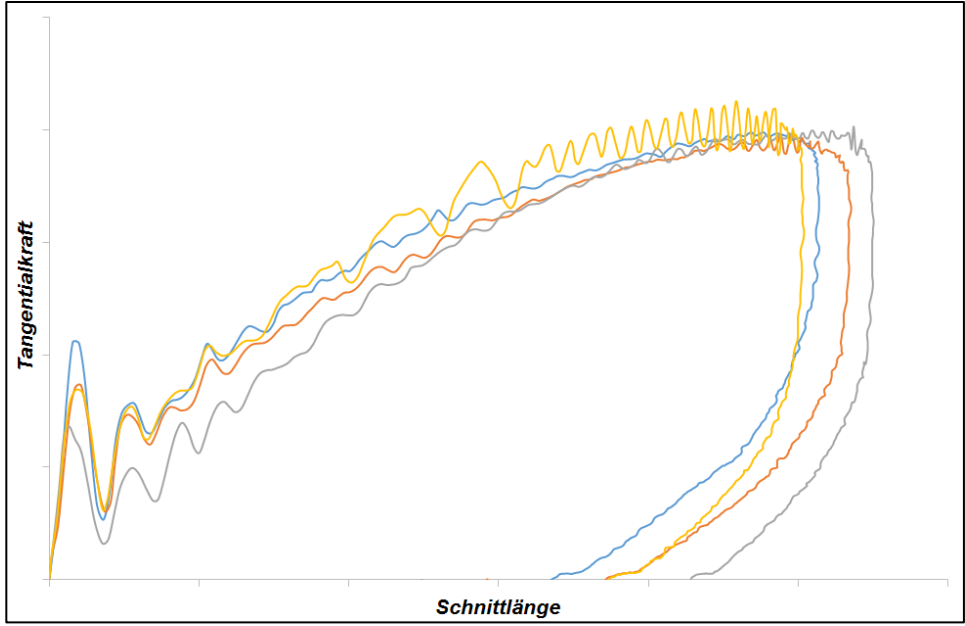


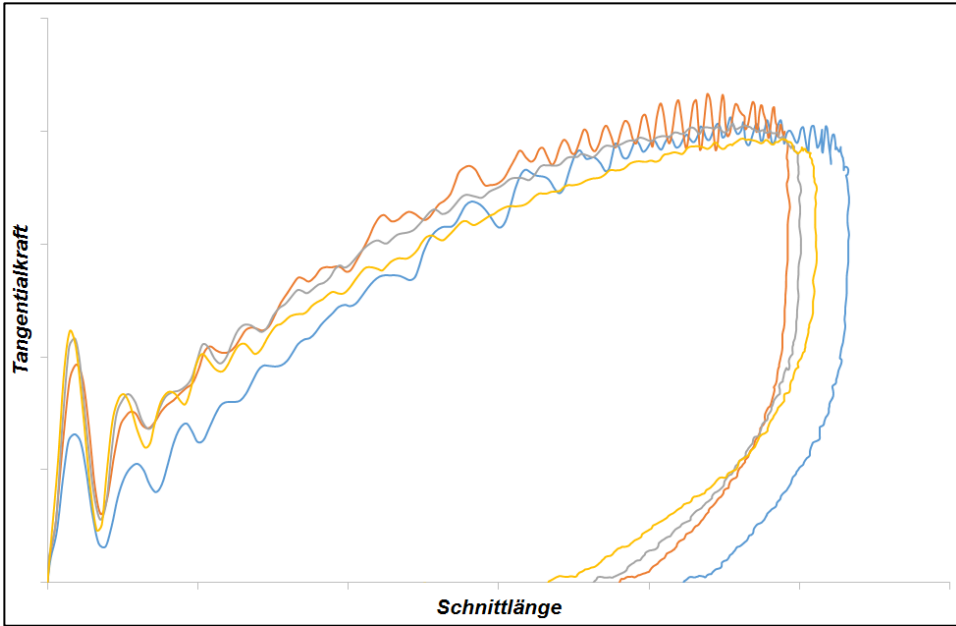
Abbildung A2-2: Kraft-Weg-Diagramm Probe „17 % rCB“ Serie 1.



**Abbildung A2-3:** Kraft-Weg-Diagramm Probe „33 % rCB“ Serie 1.



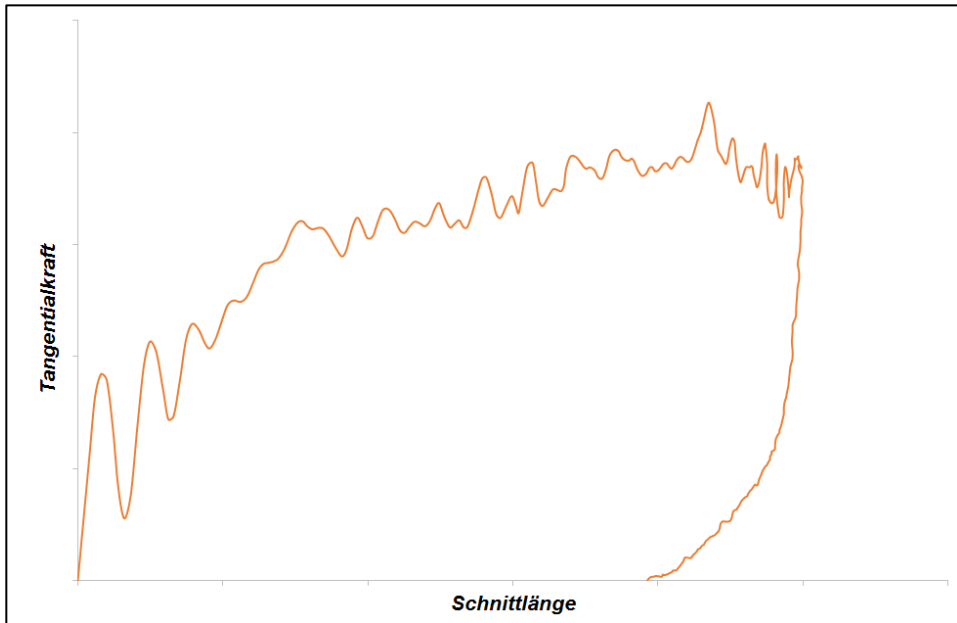
**Abbildung A2-4:** Kraft-Weg-Diagramm Probe „66 % rCB“ Serie 1.



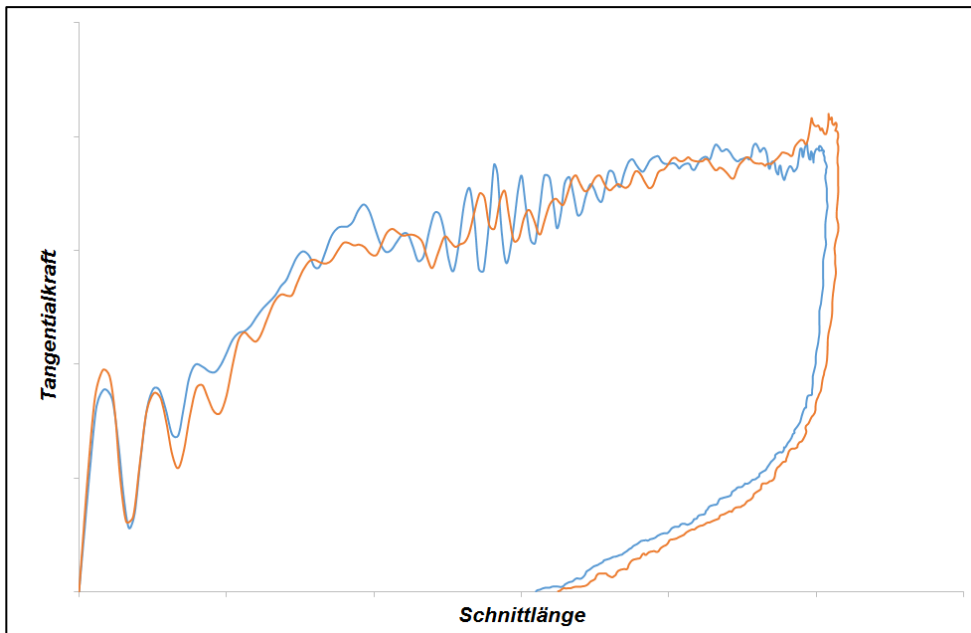
**Abbildung A2-5:** Kraft-Weg-Diagramm Probe „100 % rCB“ Serie 1.



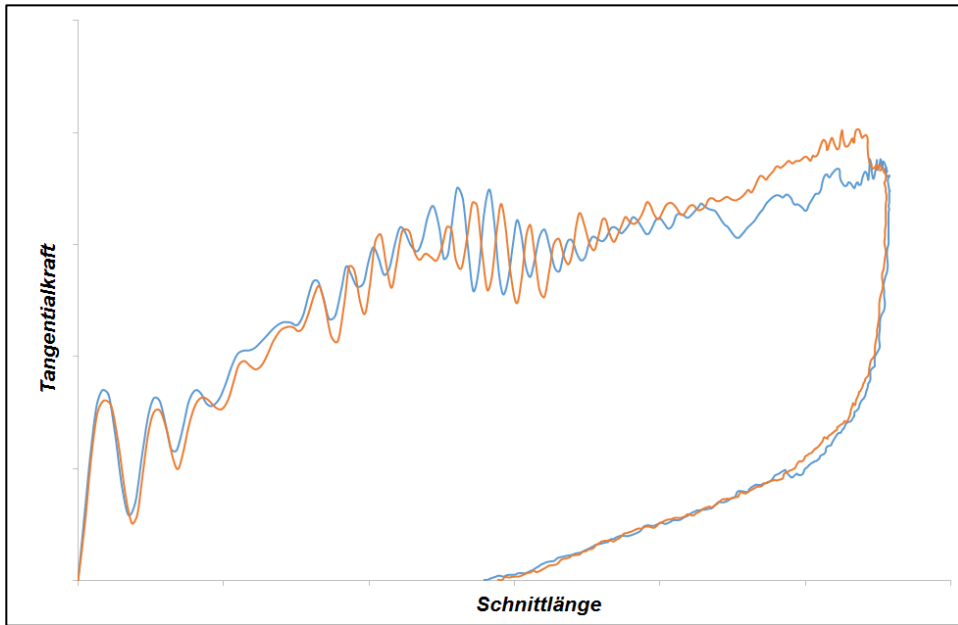
**Abbildung A2-6:** Kraft-Weg-Diagramm „Referenz“ Serie 2.



**Abbildung A2-7:** Kraft-Weg-Diagramm „18 % rCB“ Serie 2.



**Abbildung A2-8:** Kraft-Weg-Diagramm „50 % rCB“ Serie 2.



**Abbildung A2-9:** Kraft-Weg-Diagramm „100 % rCB“ Serie 2.