

## 9 Produkt-Ökobilanz der Glanzveredelung

fallkreislauf zum Recycling. Die Beschichtungsbestandteile werden im Deinking-Prozess von dem Zellstoff getrennt<sup>226</sup> und zur Energierückgewinnung thermisch verwertet. Die end-of-life Phase für die Rückstände der Kaschierfolie und des Kaschierklebers ist in der Ökobilanz-Studie entsprechend kalkuliert.

### 9.1.2 UV lackierte Faltschachtelverpackung

Ein Glanzlackauftrag wird nach dem Druckprozess inline (über das Lackwerk einer Druckmaschine) oder offline (durch eine Lackiermaschine) aufgebracht, um Glanzeffekte zu erzeugen. Im Segment der transparenten Glanzlacke unterscheidet man: (a) Öldrucklacke, (b) Wasserlacke und (c) UV Lacke (vgl. Kap. 7.2, S. 52 ff.). Je nach Produktionsbedingungen, wie z.B. Applikationsverfahren (inline/offline), Schichtdicke und Lackart, lassen sich unterschiedliche Glanzgrade erreichen. In der Ökobilanz-Studie ist die (radikalisch trocknende) UV Lackierung untersucht, welche mit einem Inline-Lackwerk offline auf einer UV bedruckten<sup>227</sup> Faltschachtelverpackung aufgetragen ist.

#### 9.1.2.1 UV Lack

Der unter ultravioletter Strahlung härtende Lack besteht üblicherweise aus Kunstharzen mit eingebettetem Fotoinitiator. Komponenten sind Acrylatmonomere und -oligomere (Prepolymere). Je nach Anwendungsgebiet können Polyester-, Epoxid-, Urethan- und Siliconacrylate eingesetzt werden. Für Papierbeschichtungen eignen sich aufgrund ihrer Elastizität z.B. Polyesteracrylate.<sup>228</sup> Monomere dienen als Reaktivverdünner. Mono- bzw. bifunktionelle Arten, z.B. Isodecylacrylate, bilden lineare bzw. gering verästelte Molekülketten und schaffen somit flexible Lackfilme wie sie z.B. auch bei Papierbeschichtungen nötig sind.<sup>229</sup> Fotoinitiatoren unterstützen die Aushärtung durch die Erzeugung von Radikalen. Üblich sind  $\alpha$ -Spalter wie  $\alpha$ -Hydroxyketone (= Acetophenon)<sup>230</sup>, welche

<sup>226</sup> Müller et al. (2014, S. 6 f.)

<sup>227</sup> Die Druckfarbe ist eine Hybridfarbe, welche sowohl physikalisch trocknende Anteile als auch UV Anteile beinhalten. Der UV Lack besteht vollständig aus UV härtenden Bestandteilen. Dennoch wird zusätzlich der IR Trockner genutzt.

<sup>228</sup> Nanetti (2012, S. 123 ff.); Kleeberg (2007, S. 18)

<sup>229</sup> Nanetti (2012, S. 125)

<sup>230</sup> Nanetti (2012, S. 122); Müller and Poth (2009, S. 243 f.); Mischke (2007, S. 174)

durch die UV Strahlung direkt zerfallen und Radikale ausbilden, oder Benzophenon als Wasserstoffabstraktor-Donator-System, welches - anders als die  $\alpha$ -Spalter - für die Radikalbildung (tertiäre) Amine oder aminmodifizierte Acrylate als Synergisten benötigt.<sup>231</sup> Diese Arten der Fotoinitiatoren lassen sich in den UV Lack gut eindispersieren. Der Unterschied zwischen Wasserstoffabstraktor-Donator-Systemen und  $\alpha$ -Spaltern liegt in der unterschiedlichen Oberflächen- bzw. Tiefenhärtung, wobei erstere die Oberflächenhärtung fördern und zweite eine bessere Tiefenhärtung aufweisen.<sup>232</sup> Eine Mischung von verschiedenen Fotoinitiatoren-Systemen ist somit nicht ungewöhnlich. Dies ermöglicht eine verbesserte Ausnutzung des Strahlerspektrums.<sup>233</sup>

Anhand des Sicherheitsdatenblattes und der angegebenen Literaturhinweise sind die In- und Outputs für den UV Lack kalkuliert. Das Sicherheitsdatenblatt definiert ausschließlich Anteile der Monomere. Aufgrund der zuvorgenannten Fakten im Zusammenhang mit UV Lacken ist bekannt, dass Fotoinitiatoren für die Polymerisationsreaktion benötigt werden. Diese haben ebenfalls eine Umweltrelevanz. Dennoch sind diese durch den Hersteller nicht im Sicherheitsdatenblatt angegeben, da der Anteil am Gesamtvolumen unter der Grenze zur Dokumentationspflicht in Sicherheitsdatenblättern liegt.

Die Kalkulation des Herstellungsprozesses des UV Lackes erfolgt über den Herstellungsprozess acrylbasierter Lacke.<sup>234</sup> Die Rohstoffkomponenten des Lackes sind entsprechend ausgetauscht. Die genannten Inhaltsstoffe der Sicherheitsdatenblätter sind dazu den Sachbilanzdaten der ECOINVENT Datenbank zugeordnet (vgl. Tab. 9-3, S. 90).

### 9.1.2.2 Lackform

Die Übertragung des Lackes auf den Bedruckstoff wird durch ein  $1,95 \pm 0,03 \text{ mm}$ <sup>235</sup> starkes Gummi-Lacktuch mit Gewebeträger durchgeführt. Die Verwendung eines Gummituchs ist üblich und gegenüber einer photopolymeren

<sup>231</sup>Kleeberg (2007, S. 17); Müller and Poth (2009, S. 243); Goldschmidt and Streitberger (2002, S. 73/188); Nanetti (2012, S. 122); Brock et al. (2009, S. 214)

<sup>232</sup>Mischke (2007, S. 175)

<sup>233</sup>Mischke (2007, S. 175)

<sup>234</sup>Althaus et al. (2007, Teil I, S. 807)

<sup>235</sup>Information des Herstellers; Röthemeyer and Sommer (2001, S. 946)

**Tab. 9-3:** Sachbilanzdaten für den UV Lack gemäß Sicherheitsdatenblatt

Emission	→	Sachbilanzdaten ggf. über Stoffanalogien	Gew.%
1,1,1-Trihydroxymethylpropyltriacrylat (TMPTA) <sup>a</sup>	→	Butylacrylat	50
Dipropylenglykoldiacrylat (DPGDA) <sup>a</sup>	→	Butylacrylat	20
(1-methyl-1,2-ethanediyl)bis([oxy(methyl-2,1-ethanediyl)])diacrylat (TPGDA) <sup>a</sup>	→	Butylacrylat	25
Unbekannte Stoffe <sup>b</sup>			5

<sup>a</sup> Die Monomere sind Acrylate. Sie unterscheiden sich vor allem in der Alkoholgruppe. Näherungsweise ist daher eine Substanzanalogie über ein Acrylat mit abweichender Alkoholgruppe berücksichtigt.

<sup>b</sup> 5% Gewichtsanteil sind nicht im Detail bekannt. Zu diesen unbekanntem Stoffen gehören Fotoiniatorsysteme, wie  $\alpha$ -Spalter und Wasserstoffabstraktor-Donator-Systeme inkl. Synergisten. Diese beiden Arten der Fotoiniatoren sind jeweils mit 2, 5% angenommen. Die Herstellungsprozesse und Sachbilanzdaten von Acetophenon und Benzophenon sind in Anhang M.2 (S. 254 ff.) beschrieben. Zur Kalkulation des Synergisten wird die Vorkette von Trimethylamin nach Althaus et al. (2007, S. 777 ff.) mit einem Gewichtsanteil von 50% am Wasserstoffabstraktor-Donator-Systeme als Analogie für ein tertiäres Amin genutzt.

Flexodruckplatte die preisgünstigere Variante.<sup>236</sup>

Die Gummischichten der Gummitücher können über Tauch-, Streich-, Kalandrier- und Dublierverfahren aufgebracht werden.<sup>237</sup> Zumeist wird die Gummischicht allerdings über das Streichverfahren mittels Gummilösungen bewerkstelligt.<sup>238</sup> Das Streichen ermöglicht die Erfüllung sehr hoher Anforderung hinsichtlich Schichtdickentoleranz ( $\pm 0,02 \text{ mm}$  für Drucktücher)<sup>239</sup> und Oberflächenqualität, welche bei Gummitüchern gefordert werden.<sup>240</sup> In eg (2004) wird über ein alternatives Verfahren - dem Kalandrieren - berichtet, welches das Freisetzen von großen Mengen an Lösemitteln im Vergleich zum Streichverfahren vermeiden kann.

In der Ökobilanz-Studie handelt es sich um ein 3ply Gummituch. Die unterste Gewebeschicht (Baumwolle und/oder Jute) ist dreilagig mit Kett- und Schussfäden in Leinwandbindung, welches im Verbund mit den anderen Schichten des

<sup>236</sup> Details zu den Lackplattentypen in Kipphan (2000, S. 265) und Schmitt (2007, S. 149 ff.)

<sup>237</sup> Röthemeyer and Sommer (2001, S. 579)

<sup>238</sup> eg (2004); Röthemeyer and Sommer (2001, S. 947)

<sup>239</sup> Röthemeyer and Sommer (2001, S. 580, 947)

<sup>240</sup> Röthemeyer and Sommer (2001, S. 578); eg (2004)

Gummituchs für die nötige Festigkeit sorgt.<sup>241</sup> Dazu ist ein Verstrecken der Gewebbahn erforderlich.<sup>242</sup> Das Gewebe wird vor dem Gummiauftrag im Tauchbad mit Haftvermittler imprägniert und anschließend mit einer Restfeuchte von unter 2% getrocknet.<sup>243</sup> Die Tränkung kann mit einer wässrigen Polymerdispersion aus Poly(methyl)acrylaten (ca. 25 Gew.%), Netzmitteln (ca. 2 Gew.%), ggf. Polymerisationsinitiatoren und sonstigen Hilfsmitteln erfolgen, um die Dehnungseigenschaften der Fasern zu reduzieren.<sup>244</sup> Im Anschluss wird die trockene Gewebbahn ggf. kalandriert, um die Oberfläche zu vergleichmäßigen. Für mehrlagige Baumwollgewebe des Gummituchs werden die einzelnen Gewebbahnen über Kaschiermaschinen unter Verwendung wasserbasierter Kaschierklebers miteinander verbunden.<sup>245</sup>

Die Zwischenschicht ist eine kompressible Luftpolsterschicht und wird per Hohlkugeleinbettverfahren hergestellt.<sup>246</sup> Ebenso sind ein Salzauswasch- und das ContiTech-Blähverfahren möglich.<sup>247</sup> Die Schichtdicke beträgt zwischen 0,3 und 0,5 mm.<sup>248</sup> Das Material kann wie die Deckschicht aus Acrylnitril-Butadien-Elastomeren bestehen,<sup>249</sup> welche als Schäume offen-, geschlossen- oder gemischtzellige Hohlräume enthalten.<sup>250</sup>

Die Deckplatte wird auf ein einlagiges Mischgewebe aufgetragen, welches ebenfalls als Leinwandbindung hergestellt wird. Es dient als Träger der Deckschicht.<sup>251</sup> Zugleich deckt es nach thermischer Verbindung mit dem zuvor beschriebenen Gummituchteil die kompressible Schicht ab.<sup>252</sup> Die Deckplatte besteht aus einer Moosgummiunterlage<sup>253</sup> und der Deckschicht. Diese hat eine Dicke von ca. 0,4 bis 0,5 mm.<sup>254</sup> Das Material besteht aus Acrylnitril-

<sup>241</sup>Bouabid (2008, S. 24); Röthemeyer and Sommer (2001, S. 946 f.)

<sup>242</sup>Röthemeyer and Sommer (2001, S. 529)

<sup>243</sup>Röthemeyer and Sommer (2001, S. 577, 947)

<sup>244</sup>Füssmann et al. (2001, S. 3-6)

<sup>245</sup>Füssmann et al. (2001, S. 6)

<sup>246</sup>Informationen des Herstellers; Röthemeyer and Sommer (2001, S. 947)

<sup>247</sup>Bouabid (2008, S. 26)

<sup>248</sup>Röthemeyer and Sommer (2001, S. 947)

<sup>249</sup>Bartholmei et al. (1999)

<sup>250</sup>Müller (1990)

<sup>251</sup>Bartholmei et al. (1999)

<sup>252</sup>Bartholmei et al. (1999)

<sup>253</sup>eg (2004)

<sup>254</sup>Röthemeyer and Sommer (2001, S. 547)

**Tab. 9-4:** Sachbilanzdaten für das Gummituch in Anlehnung an Röthemeyer and Sommer (2001), Göppert (2012) und Althaus et al. (2007)

Stoff <sup>a</sup>	→	Sachbilanzdaten ggf. über Stoffanalogien	Gew.%
Träger aus Baumwollgewebe	→	Gewebe, Baumwolle	52
Acrylnitril-Butadien-Elastomer <sup>b</sup>	→	Copolymerisation aus Acrylnitril und Butadien <sup>c</sup>	48

<sup>a</sup> Das gebrauchte Lacktuch wurde aus der UV Bogenoffsetdruckmaschine ausgebaut und drei 10 x 10 cm große Ausschnitte entnommen. Die Lagen der Abschnitte wurden manuell voneinander getrennt und über eine Analysewaage mit einer Messgenauigkeit von ±10 mg jeweils dreimal gemessen; Ermitteltes Flächengewicht: 1,95 kg m<sup>-2</sup>

<sup>b</sup> Die Haftvermittler zwischen den unterschiedlichen Gummituchlagen sind als Bestandteile der Elastomer-Schicht abgeschätzt, da eine Schichttrennung hier nicht möglich war.

<sup>c</sup> Die Sachbilanzdaten für die Herstellung von Acrylnitrilkautschuk sind in Anhang M.4 (S. 261 ff.) zusammengefasst.

Butadien-Elastomeren.<sup>255</sup> Diese Schicht wird durch mehrfache Streichvorgänge in einer Endlosstreichmaschine aufgetragen.<sup>256</sup> Auf diese Weise entstehen die Gummischichten, die in Trocknungskanälen getrocknet werden.<sup>257</sup> Nach dem Vulkanisieren wird die Oberfläche mehrfach geschliffen.<sup>258</sup>

Aufgrund stark begrenzter Informationen des Herstellers über Materialschichten des eingesetzten Gummituchs und Flächengewichte derselben sind Mengenanteile mittels gravimetrischer Messung angenähert (vgl. Tab. 9-4, S. 92). Die Kalkulation des Herstellungsprozesses des Gummituchs kann ausschließlich anhand von Literaturangaben abgeschätzt werden (vgl. Anhang J, S. 245 ff.).

### 9.1.2.3 Lackierprozess

Die UV Lackierung wird über ein Kammerrakel-Lackierwerk der UV Bogenoffsetdruckmaschine auf den Druckbogen aufgetragen. Die Kammerrakel wird mittels Lackversorgungssystem über eine Membranpumpe mit Lack automatisch befüllt. Über das Rasterwalzensystem wird der Lack auf den Druckbogen übertragen. Die Walze kann mit unterschiedlichen Rastern ausgestattet sein: Nöpfchen,

<sup>255</sup> Informationen des Herstellers

<sup>256</sup> Röthemeyer and Sommer (2001, S. 579); eg (2004)

<sup>257</sup> Röthemeyer and Sommer (2001, S. 579, 588, 947)

<sup>258</sup> eg (2004)

Haschuren oder Spezialraster. Auch lässt sich das Schöpfvolumen variieren. Mit steigendem Schöpfvolumen sind erhöhte Glanzgrade zu erwarten.<sup>259</sup> Der Lackfilm wird unter Einsatz eines UV Endtrockners mit polychromatischer Strahlung von zwei nicht-dotierten<sup>260</sup> Quecksilber-Mitteldruckdampfstrahler bei einer Länge von 550 mm und einer Leistungsstärke von je  $160 \text{ W cm}^{-1}$  in der verlängerten Auslage gehärtet.<sup>261</sup> Ein IR Trockner unterstützt den Aushärtungsprozess.<sup>262</sup> Eine Polymerisation des UV Lackes ist i.d.R. nach  $\leq 1 \text{ s}$  abgeschlossen.<sup>263</sup>

Entscheidend für eine optimale Aushärtung des Lackfilms sind eine gut abgestimmte Wahl von Fotoinitiatoren, deren Konzentration und die Strahlungsparameter, wie Strahlerspektrum, Intensität und Bestrahlungsdauer.<sup>264</sup> Dabei wird bei kurzwelliger Strahlung (UV-B, 315 bis 280 nm; UV-C<sup>265</sup>, 280 bis 100 nm) diese an der Oberfläche durch die Bindemittel absorbiert; Langwellige UV Strahlung (UV-A; 380 bis 315 nm) dringt tiefer in die Schicht ein und wird fast ausschließlich durch die Fotoinitiatoren absorbiert.<sup>266</sup>

Emissionen können während des UV Lackierprozesses entstehen. Generell sind Ausgasungen abhängig vom Lösemittelgehalt, der Lackformulierung und dem Trocknungs- bzw. Härtingsprozess.<sup>267</sup> Eine Ozonbildung kann durch die Absorption von UV Strahlung durch Sauerstoff ( $O_2$ ) unterhalb von 200 nm (= Ionisierung von Sauerstoffatomen) hervorgerufen werden. Spaltprodukte aus den Fotoinitiatoren können zur Geruchsentwicklung führen und Rest-

<sup>259</sup>Schmitt (2007, S. 148)

<sup>260</sup>Eine Dotierung der UV Strahler ist vor allem zur Aushärtung von pigmentierten Lacken erforderlich, da hierfür ein verbreitertes Strahlungsspektrum und somit eine stärkere Emission an der Grenze zum sichtbaren Wellenlängenbereich nötig ist; vgl. Müller and Poth (2009, S. 241), Mischke (2007, S. 41, 57)

<sup>261</sup>Mischke (2007, S. 56); Walther (2007, S. 39)

<sup>262</sup>Der IR Trockner wird zur Trocknungsbeschleunigung von physikalisch trocknenden Bestandteilen der Hybridfarben eingesetzt. Die Glanzstudie in Kap. 11.2.1.4 (S. 150 ff.) zeigt allerdings dass der Einsatz des IR Trockner ebenso die Glanzwirkung des Lackes positiv zu beeinflussen scheint, obwohl es sich um ein UV Lack aus 100% Polymeren handelt.

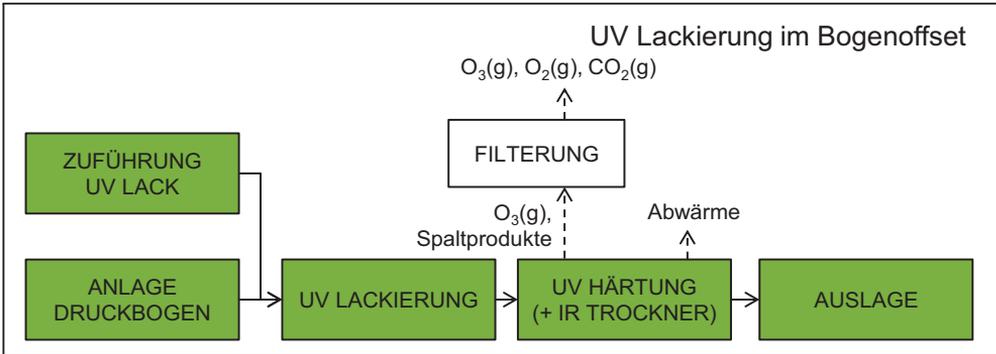
<sup>263</sup>Mischke (2007, S. 177)

<sup>264</sup>Mischke (2007, S. 176)

<sup>265</sup>VUV (200 – 100 nm) und FUV (280 – 200 nm) sind Anteile der UV-C Strahlung (vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., 1984); "Hierbei bezeichnet VUV den Teil der Strahlung der sich an Luft nicht ausbreiten kann, da der Sauerstoff in diesem Wellenlängenbereich absorbiert." (Pieke, 2009, S. 7)

<sup>266</sup>Müller and Poth (2009, S. 239); Mischke (2007, S. 56, 176 f.); Deutsches Institut für Normung e.V. (1984)

<sup>267</sup>Prieto and Kiene (2007, S. 323)



**Abb. 9-4:** Prozessschema der Glanzbeschichtung mittels UV Lackierung im Bogenoffset

emissionen fördern.<sup>268</sup> Zur Reduktion der Luftbelastung ist die UV Bogenoffsetdruckmaschine mit einer Abluftreinigung durch Aktivkohlefilter ausgestattet, wobei die Aktivkohle Ozon in Sauerstoff und Kohlendioxid ( $CO_2$ ) umwandelt (vgl. Schema H.1, S. 236) bzw. sämtliche, absorbierbare Stoffe physikalisch bindet. Die gereinigte Abluft wird anschließend in die Umluft abgegeben. Die Druckbogen verlassen die Druckmaschine nach der Trocknungsanlage und werden im Stapel abgelegt. In Abb. 9-4 (S. 94) ist der Lackierprozess schematisch dargestellt.

Die Sachbilanzdaten des UV Lackierprozesses wurden während der Modellproduktionen (vgl. Anhang D, S. 224: Testdruck #1, #3 und #4) erhoben und sind in Anhang E (S. 225 ff.) zusammengefasst. Emissionswerte von Ozon, Stickoxiden und Kohlendioxid wurden in der Abluft gemessen (vgl. Tab. 9-5, S. 95; Anhang I, S. 239 ff.).<sup>269</sup> Die ermittelte Massenkonzentration der Luftemissionen für die Glanzbeschichtung bei einer UV Trocknerleistung von 100% inkl. IR Trockner nach Filterung der Schadstoffe mittels Aktivkohlefilteranlage sind in Tab. 9-5 (S. 95) aufgelistet. Demnach sind Umweltbelastungen durch Stickoxide nicht feststellbar.

<sup>268</sup>Prieto and Kiene (2007, S. 323)

<sup>269</sup>Luftproben wurden im Rahmen der Emissionsmessungen nach Anhang I (S. 239 ff.) mittels Aktivkohle-Röhrchen für Kurzzeitmessung von DRÄGER SAFETY AG & CO. KGAA zur chemischen Analytik von Kohlenwasserstoffen entnommen. Ein erstes Screening deutet auf eine sehr geringe Menge Ethanol hin. Die Untersuchung konnte im Zeitraum dieser Arbeit allerdings nicht vollständig abgeschlossen werden, so dass diese Emissionen in der vergleichenden Produkt-Ökobilanz nicht berücksichtigt sind.

**Tab. 9-5:** Prozessemissionen im UV Lackierprozess mit einer UV Trockner-einstellung von 100% inkl. IR Trockner und Abluftreinigung mittels Aktivkohlefilteranlage (vgl. Anhang I, S. 239 ff.)

Emission	→	Sachbilanzdaten ggf. über Stoffanalogien	mg h <sup>-1</sup>
O <sub>3</sub>	→	Ozon (Luftemission, unspezifiziert)	0,5726
CO <sub>2</sub>	→	Kohlendioxid (Luftemission, unspezifiziert)	119,44
NO <sub>2</sub>	→	Stickstoffdioxid (Luftemission, unspezifiziert)	-
NO	→	Stickstoffmonoxid (Luftemission, unspezifiziert)	-
NO <sub>x</sub>	→	Stickoxide (Luftemission, unspezifiziert)	-

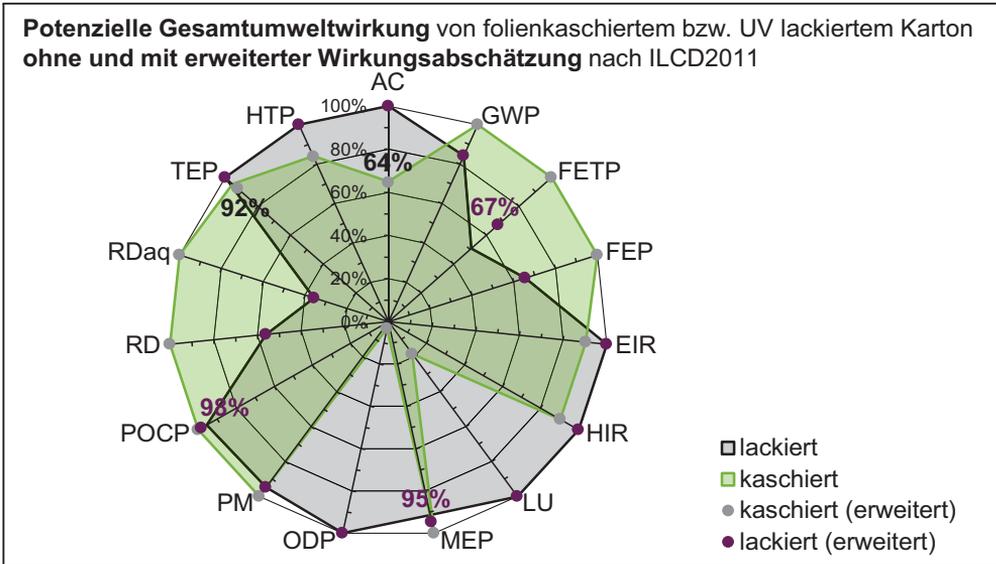
#### 9.1.2.4 Entsorgung

In Analogie zu Kap. 9.1.1.4 (S. 87 ff.) ist auch hier ein Recycling der veredelten Faltschachtelverpackung und die Verbrennung der Rückstände der UV Lackierung bilanziert (vgl. Anhang E, S. 225 ff.).

## 9.2 Umweltwirkpotenzial

Die in Kap. 9.1 (S. 81 ff.) dargestellten Sachbilanzdaten der folienkaschierten bzw. UV lackierten Faltschachtelverpackungen werden in der Wirkungsabschätzung charakterisiert. Grundlage stellen die in Kap. 6.3 (S. 37 ff.) vorgestellten Methoden und Parameter zur Ökobilanz dar. Gemäß der Erklärung in Kap. 8.3 (S. 76 ff.) wird zur Wirkungsabschätzung die Bewertungsmethode ILCD2011 eingesetzt. Die erweiterte Wirkungsabschätzung gemäß Kap. 8.2 (S. 72 ff.) ist in die Diskussion der Bilanzergebnisse mit aufgenommen. In Anhang N (S. 266 ff.) sind die Sachbilanzdaten der Produktvarianten im Vergleich tabellarisch dargestellt.

Der Vergleich der potenziellen Umweltwirkung von folienkaschierten bzw. UV lackierten Faltschachtelverpackungen zeigt ökologische Vorteile je nach Wirkungskategorie sowohl in der Glanzveredelung mittels Folienkaschierung als auch mittels UV Lackierung (vgl. Abb. 9-5, S. 96). Die Kategorien 'Ionisierende Strahlung' (EIR und HIR) und 'Bodeneutrophierung' (TEP) zeigen geringe Vorteile für den folienkaschierten Karton; starke Vorteile in den Kategorien



**Abb. 9-5:** Gesamtumweltwirkung von glanzbeschichteten Faltschachtelverpackungen auf Basis der in Kap. 9.1 (S. 81 ff.) beschriebenen Sachbilanzdaten unter Anwendung der LCA Bewertungsmethode ILCD2011 vor und nach Ergänzung nicht-berücksichtigter Substanzen nach Kap. 8.2 (S. 72 ff.); Mittleres Wirkpotenzial ohne Berücksichtigung der Datenunsicherheit

‘Humantoxizität’<sup>270</sup> (HTP), ‘Versauerung’ (AC), ‘Ozonzerstörung’ (ODP) und ‘Landnutzung’ (LU). Die Produktvariante ‘UV lackierter Karton’ ist deutlich vorteilhaft in ‘Frischwasser-Ökotoxizität’ (FETP), ‘Frischwasser-Eutrophierung’ (FEP), ‘Ressourcenverbrauch’ (RD), ‘Wasserverbrauch’ (RDaq) und geringfügig in ‘Globale Erwärmung’ (GWP), ‘Meerwasser-Eutrophierung’ (MEP), ‘Feinstaubbelastung’ (PM) und ‘Ozonbildung’ (POCP).

Die Ergänzung nicht-berücksichtigter Substanzen in der ILCD2011 Methode nach Kap. 8.2 (S. 72 ff.) führt in spezifischen Wirkungskategorien zu einer Veränderung der Umweltwirkpotenziale der Produktvarianten ‘folienkaschierter Karton’ und ‘UV lackierter Karton’ im Vergleich: Die prozentualen Beiträge der Produktvarianten nähern sich an in den Wirkungskategorien ‘Frischwasser-

<sup>270</sup>Die getrennten Kategorien der Humantoxizität werden in der Ökobilanz-Studie zugunsten der Übersichtlichkeit zu einer Wirkungskategorie zusammengefasst. Dies ist nach Aussage der Modellentwickler möglich (vgl. Anhang A, S. 207 ff.).

Ökotoxizität', 'Meerwasser-Eutrophierung' und 'Ozonbildung'; der Unterschied wird größer in der Wirkungskategorie 'Versauerung' und 'Bodeneutrophierung'. Änderungen in den Kategorien 'Ressourcenverbrauch', 'Wasserverbrauch' und 'Landnutzung' sind nicht vorhanden. Durch die Ergänzung der Substanzen in Kap. 8.2 (S. 72 ff.) ergeben sich ausschließlich Anpassungen in output-bezogenen Wirkungskategorien. Besonders deutlich ist die Modellanpassung für die Wirkungskategorie 'Frischwasser-Ökotoxizität'. Die Ergänzung von Substanzen führt zu einer Erhöhung des Wirkpotenzials des UV lackierten Kartons um  $\approx 16\%$ . Dieser Beitrag wird vor allem durch Wasseremissionen von Chlor und Benzalchlorid in der Vorkette zur Herstellung der Fotoinitiatoren verursacht.

Die Umweltwirkung des Produkts 'UV lackierter Karton' wird vorwiegend durch die UV Lackbestandteile inkl. ihrer Vorketten bestimmt (Tab. 9-6, S. 98). Das Umweltwirkpotenzial des folienkaschierten Kartons ist je nach Wirkungskategorie relativ ausgeglichen auf die Kaschierfolie, die Filmherstellung und den Kaschierprozess verteilt. Der Beitrag der end-of-life Phase ist besonders abhängig von der betrachteten Wirkungskategorie: für den UV lackierten Karton ist diese relevant in den Wirkungskategorien 'Frischwasser-Ökotoxizität'; für den folienkaschierten Karton sind zusätzlich die 'Globale Erwärmung', die 'Humantoxizität' und 'Meerwasser-Eutrophierung' wichtig.

Unterschiede zwischen den Produktvarianten ergeben sich auch in der Gutschrift durch Energierückgewinnungsprozesse in der end-of-life Phase. Die höhere Materialmenge im kaschierten Endprodukt sowie die bessere Energierückgewinnungsquote für Polypropylen kann je nach Wirkungskategorie in der Folienkaschierung zu einer Reduktion der Umweltwirkung zwischen 2,0% bis 35,8% führen. In der UV Lackierung ist ausschließlich eine Gutschrift von 0,2% bis 5,3% des gesamten Umweltwirkpotentials möglich. Diese Gutschrift zeigt sich vor allem im Ozonerstörungspotenzial, welches durch Emissionen aus Brennstoffen und Transporten dominiert wird. Der folienkaschierte Karton erhält hier eine Gutschrift von 35,8%, so dass das Wirkpotenzial von 37% auf 3% im Vergleich zum UV lackierten Karton reduziert wird. Auch in der Produktvariante 'UV lackierter Karton' wird die größte Rückgewinnungsquote in dieser Wirkungskategorie erreicht.