

Entwicklung eines recyclingfähigen Solarwechselrichters

Dipl.-Ing. Peter Fischer; Dipl.-Ing. Martin Sauter
Wuseltronik Forschung und Entwicklung; Paul-Lincke-Ufer 41, 10999 Berlin
Tel. 030/6185071, Fax. 030/6185075
email: fischer@wuseltronik.com; sauter@wuseltronik.com

1. Einleitung

Die Anwendung der Photovoltaik im Bereich der Netzeinspeisung hat sich in den letzten 10 Jahren als Technologie bewährt. Es ist abzusehen, daß die Wechselrichterfertigung in naher Zukunft von der Klein- und Mittelserienfertigung in eine Massenfertigung übergehen wird. Die seit 1992 installierte Leistung im Bereich netzgekoppelter PV-Anlagen liegt, einschließlich 1997, bei ca. 30MWp [1]. Diese Leistung entspricht ca. 15.000 2kWp-Wechselrichtern. Bei einem angenommenen Gewicht von 15kg/Gerät würde dies einen Materialeinsatz von bisher 225t bedeuten, wobei die Flachbaugruppen (bestückte Leiterplatten) an dieser Menge ca. 20gew.% also 4kg Anteil pro Gerät] haben [2], entsprechend sind dies 45t. Diese 45t nehmen sich zwar im Vergleich zur vom VDMA (Verband der Deutschen Masch. und Anlagenbauer) genannten Menge an in Deutschland pro Jahr anfallenden Leiterplattenabfall von 50.000t/a relativ gering aus. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß der PV-Markt deutlich wachsen wird. Eine realistische Einschätzung, nach Kaltschmitt [3], geht von einer möglichen, installierbaren PV-Leistung von ca. 17GWp in der Bundesrepublik aus. Umgerechnet auf eine Wechselrichterleistung von 2kWp wären dies ca. 8,5 Mio. Geräte. Daraus resultierend, würden bei der vollen Ausschöpfung dieses Potentials ca. 25.500 t Flachbaugruppen nach dem Gebrauch der Wechselrichter als Elektronikschrott anfallen. Diese Flachbaugruppen bestehen zu 30%-50% aus duromeren Kunststoffen [4], die bisher als nicht recyclingfähig gelten.

Zudem werden in der Elektronik vielfach Polyurethane (PU) und Epoxidharze als Vergußmassen eingesetzt (Printrafos, Drosseln), die nicht nur beim Materialrecycling Probleme bereiten, sondern schon bei der Herstellung die Umwelt schädigen können. Für die Herstellung von PU werden Diisocyanat [5] und Formaldehyd eingesetzt. Daneben sind für die Herstellung des Diisocyanats Problemstoffe wie Phosgen notwendig (50gew.%!) [5]. Besondere Probleme bereiten die in den Basismaterialien und Vergußmassen zum Zwecke des Flammenschutzes eingebrachten organischen Halogenverbindungen (Tetrabrombisphenol) oder das krebserzeugende Antimontrioxid, die beim thermischen Recycling Furane bzw. Dioxine entstehen lassen.

Diese Gründe waren für uns Anlaß, ein von uns entwickeltes Netzeinspeisegerät nach den Gesichtspunkten des nachhaltigen Wirtschaftens zu überarbeiten. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

2. Methodisches Vorgehen

2.1 Erstellung einer Ökobilanz für den Wechselrichter

Ökobilanzen sind ein wichtiges Informations- und Planungsinstrument, mit dem Umweltauswirkungen über den gesamten Lebensweg eines Produktes von der Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe, Herstellung von Werkstoffen, Fertigung von Komponenten, Montage, Distribution, Nutzung und Verwertung bzw. Entsorgung transparent gemacht werden können.

Auf dieser Basis lassen sich dann Optimierungspotentiale aufzeigen, Innovationen bewerten und Handlungsstrategien ableiten.

Der über die orientierende Ökobilanz ermittelte Primärenergieverbrauch läßt es zu, daß für den bilanzierten Wechselrichter eine Energierückzahlener (ERZ) berechnet werden kann. [6]

2.2 Ergebnisse der Ökobilanz

2.2.1 Sachbilanz:

Der vorgestellte Wechselrichter besteht aus 484 Bauelementen und besitzt ein Gerätegewicht von 21kg. Durch Demontage des Gerätes und Auswiegen der Bauelemente wurde das Gewicht der einzelnen Baugruppen (Bauteilefraktionen) ermittelt. Die prozentuale Verteilung der verschiedenen Werkstoffe sind in Abb.1 und des Primärenergieverbrauchs in Abb. 2 dargestellt.

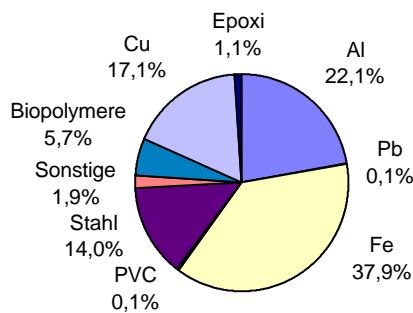


Abb. 1: Verteilung der Werkstoffe in Gew.%

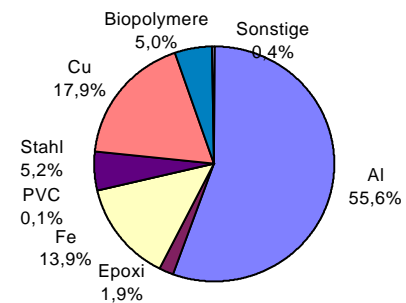
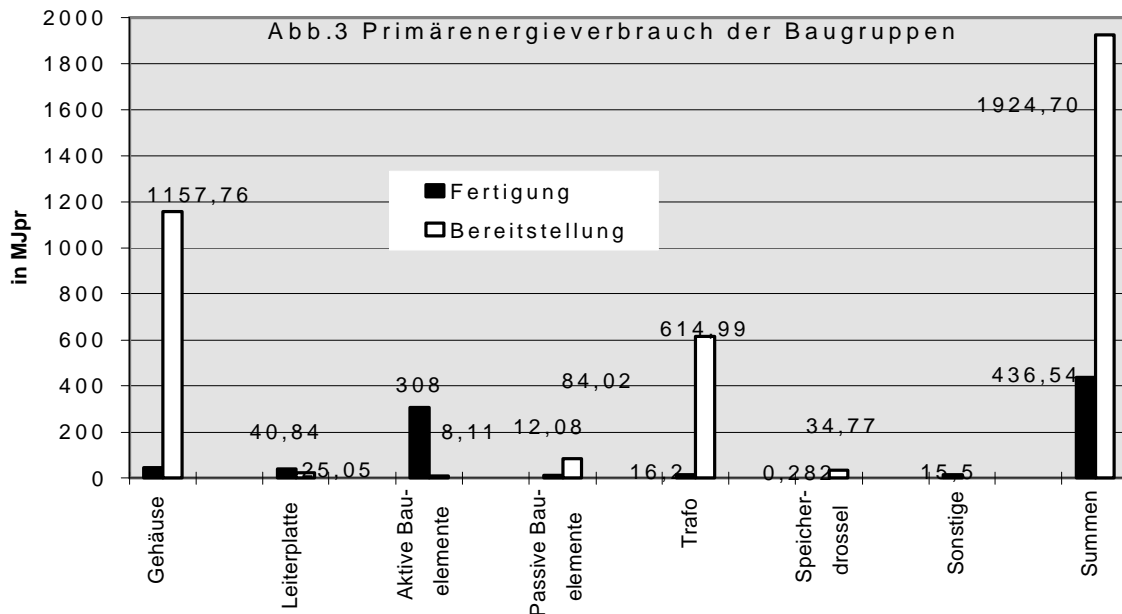


Abb2.: Prozentuale Verteilung des Primärenergieverbrauchs der Werkstoffe

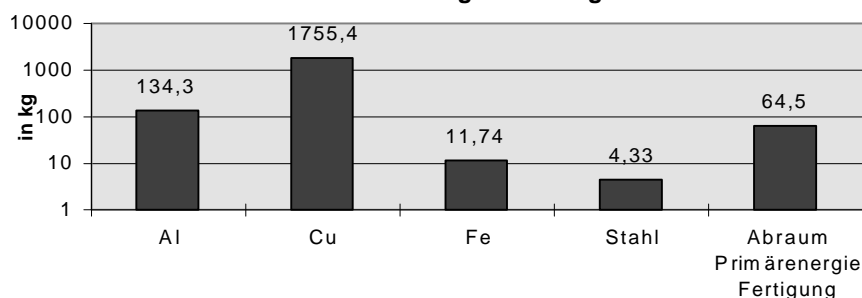
Die Bereitstellung der Rohstoffe für die Herstellung eines Wechselrichters beginnt mit dem Abbau der Erze in Australien, Rußland, Afrika und Südamerika sowie der Erdölförderung, bzw. Anbau der Ölpflanzen zur Kunststoffherstellung. Der Aufwand für die Rohstoffgewinnung spiegelt sich dementsprechend auch im Primärenergieverbrauch (PEV) für die Fertigung wieder. Abb. 3 zeigt für den bilanzierten Wechselrichter den werkstoff- und fertigungsbedingten Primärenergieverbrauch für die Baugruppen Gehäuse, Trafo, Elektronik und Leiterplatte. Beachtenswert ist der fertigungsbedingte PEV von **308 MJpr** (14% des gesamten PEV) für die aktiven elektronischen Bauelemente, die mit einem Gesamtgewicht von **88 g** (0,4%) kaum zum Gerätegewicht beitragen. Gesamtprimärenergieverbrauch **2361 MJpr** (1kWh = 3,6MJ)



2.2.2 „Ökologischer Rucksack“

Jedes Gerät trägt zusätzlich noch einen „ökologischen Rucksack“, der mit dem Abraum aus der Werkstoffbereitstellung und der Energiebereitstellung gefüllt ist. Das Abraumaufkommen für den bilanzierten, 21kg schweren Wechselrichter zeigt Abb. 4.

Abb.4: Ökologischer Rucksack/Abraummengen zur Rohstoffgewinnung



2.2.3 Distribution

Hinsichtlich des Energieverbrauches spielt die Distribution eines Wechselrichters mit rund 12,5 MJpr eine untergeordnete Rolle. Daher sind die Optimierungspotentiale in diesem Bereich eher gering. Zugrunde gelegt wurde für diese Berechnung der Transport mit LKW und Kleinlastern bei einer mittleren Transportstrecke von insgesamt 245 km. [5] [7]

2.3. Recyclinggutschriften

Grundsätzlich müssen beim Recycling zwei Recyclingstrategien unterschieden werden:

- Materialrecycling (Rückgewinnung von Rohstoffen)
- Produktrecycling (Wiederverwendung von Baugruppen)

In beiden Fällen wird Primärenergie eingespart. Jedoch ist zu berücksichtigen, daß beim Materialrecycling ca. 6% des eingesetzten Materials verloren geht und zusätzlich ein Primär-

energieaufwand von ca. 0,6 MJ/kg für das Materialrecycling notwendig ist. Des weiteren gehen beim Materialrecycling die fertigungsbedingten Primärenergieaufwendungen unwiderruflich verloren. Die fertigungsbedingten Primärenergieaufwendungen liegen beim bilanzierten Wechselrichter bei ca. 436 MJ (18% des gesamten PEV). Es ist daher die Wiederverwendung von Baugruppen anzustreben.

2.3.1 Materialrecycling

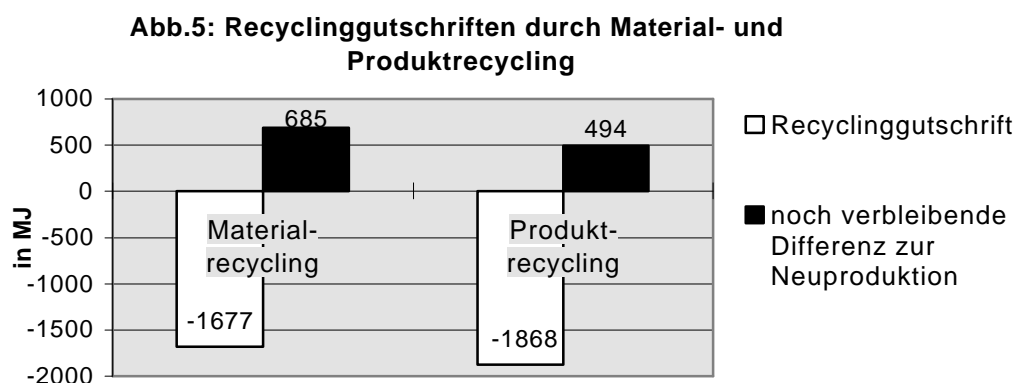
Beim Materialrecycling wird die Produktgestalt völlig aufgelöst, dies geht einher mit einem Wertschöpfungsverlust. Die durch die Demontage des Gerätes gewonnenen Fraktionen werden vom Recyclingunternehmen entsprechenden Aufbereitungsverfahren (Metallschmelze; thermisches Recycling) zugeführt bzw. fachgerecht entsorgt (Deponierung). Die durch das Materialrecycling erzielbaren Primärenergiegutschriften sind in Abb. 5 dargestellt.

2.3.2 Produktrecycling - Wiederverwendung

Das Produktrecycling stellt das Recyclingverfahren dar, das die höchste Wertschöpfung innerhalb der Recyclinghierarchie garantiert. Dabei wird die Produktgestalt weitestgehend beibehalten und schadhafte Baugruppen (Module) werden ausgetauscht, bzw. aufgearbeitet. Die durch das Produktrecycling erzielbaren Primärenergiegutschriften sind ebenfalls in Abb. 5 dargestellt.

2.3.3 Priorität und Wertigkeit unterschiedlicher Recyclingverfahren

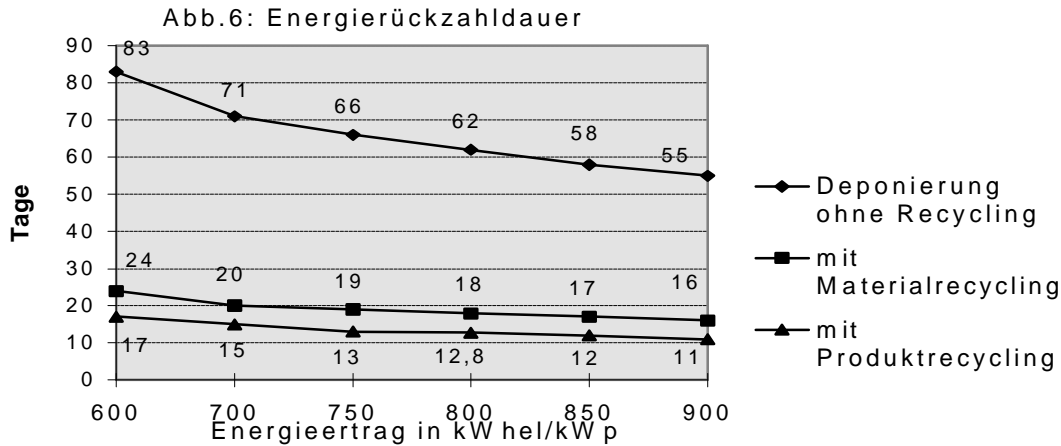
Betrachtet man Recyclingverfahren als Aufwand-/Nutzen-Relation und wertet z.B. den Kapital- und Energieeinsatz bezogen auf die rezyklierte Wertschöpfung des Produktes, so ist die Aufarbeitung zur Rückgewinnung der Funktion eines Produktes unter Beibehaltung der Produktgestalt in Wirkungsgrad bzw. Wertniveau deutlich höher einzustufen als die Aufbereitung zur Rückgewinnung lediglich der Werkstoffe. Eine solche Betrachtung unterstreicht die Notwendigkeit, dem höherwertigen Recycling der Produktfunktion durch Aufarbeitung gesteigerte Bedeutung zuzumessen. [8]



2.3.4 Energierückzahldauer (ERZ)

Als Energierückzahldauer wird das Verhältnis von *investierter* nicht erneuerbarer Primärenergie zu *ersetzer* nicht erneuerbarer Primärenergie verstanden. Der bilanzierte Wechselrichter benötigt insgesamt 2361 MJpr Primärenergie. Somit ergibt sich, bei der Anwendung des reinen Materialrecyclings, unter Berücksichtigung der Recyclinggutschriften eine ERZ von 19 Tagen. Bei der Durchführung von Produktrecycling beträgt die ERZ nach Anrechnung der Gutschrift-

ten 13 Tage. Bei der Berechnung wird von einem Energieertrag von 750 kWhel./a kWp ausgegangen. In Abb. 6 werden für die jeweiligen Recyclingstrategien die ERZ in Abhängigkeit des Energieertrages dargestellt. Als Berechnungsgrundlage wird der Kraftwerksmix der Bundesrepublik Deutschland herangezogen ($\eta = 33\%$), [5].



3. Recyclingstrategie: Produktrecycling

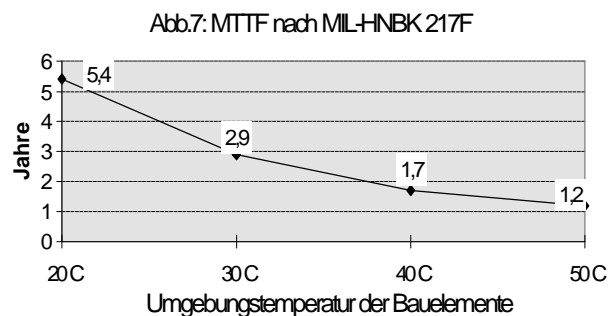
3.1 Auf Langlebigkeit ausgerichtete Produktstrategie

„Das beste Recyclingverfahren ist dasjenige, das erst überhaupt nicht stattfinden muß.[8]

„Ein langlebiges Gut, das doppelt so lange genutzt wird wie ein vergleichbares kurzlebige Gut, vermindert Abfälle und Ressourcenverbrauch um rund 50%. [9]

Auf Photovoltaikmodule werden z.Zt. bis zu 25 Jahre Garantie gegeben. Insofern ist es zum einen für den Anlagenbetreiber interessant den dazugehörigen Wechselrichter eine ähnlich lange Zeit mit möglichst geringen Wartungskosten im Betrieb zu halten. Zum anderen wird durch eine entsprechend lange Nutzungsdauer die Abfallmenge und der Ressourcenverbrauch erheblich reduziert [9]. Ein Wechselrichter ist als langlebiges Investitionsgut zu betrachten. Es ist allerdings nicht davon auszugehen, daß ein einmal in Betrieb genommener Wechselrichter die Lebensdauer von PV-Modulen erreichen wird. Der Grund hierfür ist, daß alle elektronischen Bauelemente einem beständigen Verschleiß, abhängig von der jeweiligen Umgebungstemperatur und der elektrischen Beanspruchung innerhalb der Schaltung, unterliegen. Um die Größenordnung des Temperatureinflusses nachvollziehbar zu machen, wurde von Wuseltronik eine Lebensdauerberechnung für den balanzierten Wechselrichter nach MIL-HNBK-217F [10] durchgeführt.

Abb. 7 zeigt den Verlauf der mittleren Zeitspanne bis zum Eintreffen eines Fehlers in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (ϑ_u). Randbedingungen: (Betriebsstunden pro Jahr: 3000h; $\vartheta_u = \text{const.}$; Temperaturbereich der Bauelemente [Halbleiter; Kondensatoren] -40 bis 120 °C



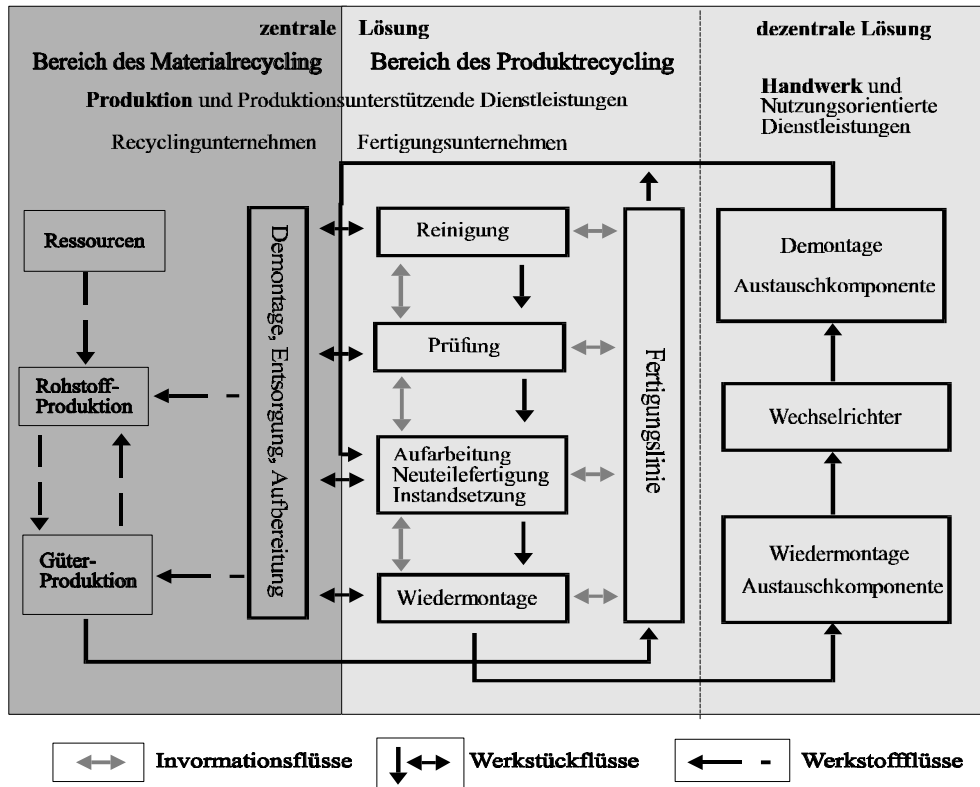
Vergleich mit der Praxis:

Im Zeitraum von 1989 bis 1997 wurden ca. 800 Geräte der NEG Serie (NEG 1400/NEG 1600) ausgeliefert. Es kamen nur 12 Geräte (im Zeitraum 1994-1997) mit Defekten zur Reparatur zurück. Die Ausfallrate beträgt somit 1,5%. Die mittlere Ausfallzeit der 12 Geräte liegt bei 6 Jahren. Alle aufgetretenen Fehler wurden durch Ausfall elektronischer Baugruppen verursacht. Induktive Baugruppen waren nicht betroffen. Die eingelieferten Geräte wurden alle instandgesetzt und wieder in Betrieb genommen.

Schlußfolgerung:

Beim Vergleich der Lebensdauerberechnung und den Erfahrungen in der Praxis kann eine Übereinstimmung im Bereich der Fehlerursachen festgestellt werden. Die Rechnung nach MIL 217F ergibt eine um den Faktor 100 höhere Fehlerrate bei den elektronischen Komponenten gegenüber den induktiven Baugruppen. Sie entspricht somit den in der Praxis gemachten Erfahrungen. Aus dieser Übereinstimmung heraus ergaben sich neben schaltungstechnischen Maßnahmen und der Bauelementeauswahl noch andere Konsequenzen. Alle elektronischen Baugruppen befinden sich beim neuen Konzept auf einer Leiterplatte; die Fehlereingrenzung wird dadurch eindeutig und Servicearbeiten wesentlich vereinfacht. Die verschiedenen im Wechselrichter enthaltenen Baugruppen wurden thermisch entkoppelt aufgebaut. Das Gerät erhält durch diese Vorgehensweise den, für die Demontage ohnehin notwendigen, offenen und leicht zugänglichen, modularen Aufbau. Durch die Lebensdauerberechnung kann für den Anwender in nachvollziehbarer Weise deutlich gemacht werden, wie die Verfügbarkeit und Nutzungsdauer der Photovoltaikanlage erhöht werden kann. Die Wartungs- und Servicekosten für den Anlagenbetreiber werden kalkulierbarer, da er durch das Produktrecycling über einen langen Zeitraum sicher sein kann, bei einem Geräteausfall kein neues Gerät kaufen zu müssen, sondern nur die entsprechende Austauschkomponente. Um dies gewährleisten zu können, müssen sich Neuentwicklungen am Gerätegrundkonzept orientieren. Als Nutzungsdauer einer Photovoltaikanlage kann der Rahmen der kostengerechten Vergütung 15 Jahre angenommen werden (z.B. BEWAG-Solarstrom-Börse). Das Modell des Produktrecyclings läßt sich problemlos auch auf längere Nutzungsdauern anpassen.

3.2 Recyclingschema: Produktrecycling



3.3 Maßnahmen der recyclinggerechten Konstruktion

Um ein Produktrecycling nach oben beschriebenen Muster zu ermöglichen, müssen bei der Konstruktion entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, die Wartungs- und Demontearbeiten zulassen, ohne zu einer Zerstörung des Gerätes zu führen. Weiterhin muß im Hinblick auf das Materialrecycling die Auftrennung des Gerätes in Reinstofffraktionen möglichst schnell und einfach bewerkstelligt werden, da dies Auswirkung auf die Recyclingkosten hat. Die VDI-Richtlinie 2243 „recyclinggerechte Konstruktion“ [11] beinhaltet und standardisiert Begriffsbestimmungen und gibt dem Konstrukteur, anhand von Beispielen eine Hilfestellung bei der Auswahl von recyclinggerechten Maßnahmen. Dabei werden der Verbindungstechnik und Werkstoffwahl besondere Bedeutung beigemessen. Die wichtigsten Kriterien der VDI 2243:

ANWENDUNGSBEREICH	KRITERIEN	LÖSUNGSMÖGLICHKEIT
Bereich Produktion	Rücklaufminimierung	Einstoffprodukte
Bereich Produktrecycling	Werkstoffvielfalt begrenzen	Hochwertige Bauelemente
	Langlebigkeit	Schnapp- u. Klemmverbindungen statt Schrauben
Bereich Materialrecycling	Lösbare u. zugängl. Verbindungen	
	Werkstoffkennzeichnung	Modulbauweise
	Demontagegünst. Baustruktur	Einstoffprodukte/Modulbauw.
	Werkstoffverträglichkeit	

4. Einsatz nachwachsender Rohstoffe bei Leiterplatten und Vergußmassen

Kunststoffe auf Erdölbasis bringen nicht nur als Endprodukt Probleme mit sich (siehe Einleitung). Allein die Gewinnung des Rohstoffes und die Verarbeitung haben beträchtliche negative Auswirkungen auf die Biosphäre und den Menschen selbst. Da diese Probleme schon ausführlich in der Öffentlichkeit diskutiert wurden, muß an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden. Es wurden bei der Entwicklung des neuen Wechselrichters neue Kunststoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe (Biopolymere) berücksichtigt. Ein Vorteil liegt im verminderten Primärenergieverbrauch begründet, der zum Beispiel bei Polyurethan bei ca. 160 MJpr/kg liegt [5], bei Biopolymeren bei ca. 80 MJpr./kg, dadurch ergibt sich alleine in diesem Bereich eine Energieeinsparung von 50%.

4.1 Vergußmassen:

Die im neuen Wechselrichter zum Einsatz kommenden Biopolymer-Vergußmassen sind ausnahmslos auf der Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt und als CO₂-neutral zu betrachten. Die Inhaltsstoffe sind in allen Fällen pflanzliche Stoffe (Rhizinuspolyole, Sojapolyole) und Vielfachzucker (Maisstärke). Alle Vergußmassen erfüllen sämtliche Anforderungen die an Werkstoffe der Elektronik gestellt werden. Sie übertreffen in einigen Punkten sogar die herkömmlich eingesetzten Polyurethan- und Epoxidvergußmassen. Durch die Hinzufügung von mineralischen Zuschlagsstoffen kann auf die üblichen Flammhemmer gänzlich verzichtet werden.

4.2 Leiterplatten (Flachbaugruppen)

Für die Leiterplatte des Wechselrichters wurde als erste Verbesserung ein Basismaterial (FR5) eingesetzt, das ohne Halogene als Flammhemmer auskommt. Dies ist jedoch nur als eine Zwischenlösung anzusehen. Parallel werden Basismaterialien auf der Grundlage nachwachsender Rohstoffe (Vielfachzucker und Hanffasern) auf ihre Brauchbarkeit untersucht. Der Flammschutz kann, auch in diesem Falle, durch Zugabe mineralischer Zuschlagstoffe schadstofffrei realisiert werden.

Literaturhinweise: [1] DFS Information vom 11.12.1997; [2] Ökobilanz „Recyclinggerechter Wechselrichter“ Wuseltronik 1997; [3] Kaltschmitt, Wiese: Erneuerbare Energien Springer 1993; [4] BIGAT Ingenieuresellschaft 26.05.1996 [5] Ökoinventare für Energiesysteme, 3.Aufl. 1995 Anhang A, S.1ff.; [6] Ökoinventare für Energiesysteme, 3. Aufl. 1995 Teil XII, S121; [7] Ermittlung des mittleren Transportweges durch Auswertung der Kundenlisten, Wuseltronik 1997; [8] Steinhilper, R; Gundler, G.: Recycling durch Aufarbeitung technischer Produkte in Austauschherzeugungsfertigung Phase I und II, FhG-IPA Stgt., FB. T86-122, S.22ff; [9] Walter R. Stahel: Langlebigkeit und Materialrecycling, 2. Aufl., Vulkan Vlg. Essen 1993 S.1ff; [10] Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment. Dep. of Defense, USA 2nd Dec. 1991; [11] VDI-Richtlinie 2243 Blatt 1: Recyclinggerechte Konstruktion, , 1993.

Projektförderung: „Zukunftsinitiative Ökologisch Wirtschaften“ (ZÖW), Förderkennzeichen: 3054ZÖW/A/W