

Einsatz, Entsorgung und Recycling PCB-haltiger Bauteile und Komponenten der Elektrotechnik

L. Bonk, M. Böckler, F. Göller, W. Jasny, E. Tigges

Zusammenfassung In der Elektrotechnik wurden über viele Jahrzehnte weltweit PCB-haltige Bauteile (PCB: polychlorierte Biphenyle), Komponenten und Anlagen eingesetzt. Aufgrund niedriger elektrischer Leitfähigkeit bei gleichzeitig guter Wärmeleitfähigkeit, Hydrophobie, thermischer Stabilität und Flammwidrigkeit sowie wegen der preiswerten Herstellung wurden PCB als ideale Isolationsflüssigkeit angesehen. Isolationsflüssigkeiten, auch Askarele genannt, wurden insbesondere in Leistungskondensatoren und Transformatoren im Bereich der Energieversorgung verwendet. Nachdem die negativen Auswirkungen von PCB für die menschliche Gesundheit und die Natur eindeutig belegt werden konnten, wurde deren Neueinsatz zunächst eingeschränkt und schließlich weltweit verboten. In der Bundesrepublik Deutschland wurde zunächst durch die PCB-Verbotsverordnung im Juli 1989 und später durch weitere gesetzliche Regelungen Auflagen gemacht, um das vorhandene PCB zu entsorgen. Dieser Entsorgungsauftrag ist bis heute noch nicht abgeschlossen.

Use, disposal and recycling of electrical and electronic components and subassemblies containing PCBs

Abstract In electrical and electronic engineering, components, subassemblies and equipment containing PCBs (polychlorinated biphenyls) were in use for many decades worldwide. Owing to their low electrical conductivity combined with good thermal conductivity, hydrophobicity, heat stability and flame resistance and because of their low cost of production, PCBs were regarded as the ideal insulation liquid. Insulation liquids (also known as askarels) used to be employed especially in capacitors and transformers in the power supply sector. When the negative effects of PCBs on human health and the natural environment had been demonstrated beyond doubt, their use in new products was initially restricted and finally banned worldwide. In the Federal Republic of Germany, the PCB Prohibition Ordinance of July 1989 and subsequent legal arrangements established procedures for the disposal of existing PCBs. This disposal assignment is still in progress.

1 Einführung

Als „Polychlorierte Biphenyle“ (PCB) wird nicht ein einzelner Stoff, sondern ein Gemisch aus bis zu 209 chemischen Verbindungen (Kongeneren) bezeichnet. Folglich variieren die physikalischen und chemischen Eigenschaften je nach Zusammensetzung des Kongenerengemisches. Typische Eigenschaften für die elektrotechnische Anwendung bezogen auf das Produkt Clophen A40 sind in **Tabelle 1** aufgeführt [1].

Dipl.-Ing. Lutz Bonk, Dipl.-Ing. Margret Böckler,
Dipl.-Ing. Frank Göller, Dipl.-Ing. Werner Jasny,
Dipl.-Ing. Eduard Tigges,

Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medien-
erzeugnisse, Köln.

Diese Eigenschaften und die Tatsache, dass PCB nicht brennbar sind, machten sie schnell zu einer nahezu idealen Isolierflüssigkeit, wie man sie in Kondensatoren und Großtransformatoren benötigt. In der Praxis werden diese Isolierflüssigkeiten als Askarele bezeichnet. Askarele bestehen aus PCB bzw. aus Mischungen von PCB mit Polychlorbenzolen. Typische Handelsnamen waren Clophen (Fa. Bayer, Deutschland), Aroclor (Fa. Monsanto Chemical, USA und Großbritannien) oder Pyralène (Fa. Prodelec, Frankreich) [1].

Die industrielle Produktion begann im Jahr 1929. Anfang der 1970er Jahre wurden PCB in den USA, in Japan, der damaligen UdSSR sowie in einigen westeuropäischen Staaten, darunter insbesondere Deutschland hergestellt. Man schätzt, dass die weltweite Gesamtproduktion von PCB in den etwa 1960er Jahren bei mindestens 1,5 Mio. t lag. Davon wurden vom einzigen westdeutschen Hersteller, der Fa. Bayer, ca. 159 000 t hergestellt und unter der Produktbezeichnung Clophen vertrieben [2].

Die Verwendung von PCB in Deutschland für die unterschiedlichen Einsatzgebiete [3] ist in **Bild 1** dargestellt. Mehr als die Hälfte des verwendeten PCB wurde hier in der Elektrotechnik eingesetzt.

Aufgrund der Erkenntnisse, dass PCB Erkrankungen, z. B. Chlorakne, verursachen können, sich in der Nahrungskette ansammeln und dass sich im Brandfall polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) und Dibenzodioxine (PCDD) bilden können, wurden zuerst in Japan im Jahr 1972 die Produktion und der Einsatz von PCB verboten. Durch Inkrafttreten der „Stockholm convention on persistent organic pollutants (POP)“ [4] am 17. Mai 2004 wurden Produktion und Neueinsatz von PCB nahezu weltweit verboten.

2 PCB-haltige Transformatoren in der Elektrotechnik

In der Elektrotechnik werden Transformatoren in praktisch allen Bereichen eingesetzt. Mit ihnen werden die elektrotechnischen Kenngrößen Strom (Einheit: Ampere) und Spannung (Einheit: Volt) gemäß den Anforderungen transformiert. So benötigt man z. B. für den Transport elektrischer Energie über große Entfernungen große Spannungen bis 380 000 V und für Galvanikprozesse große Ströme von einigen Tausend Ampere. Bei den Transformationsprozessen entsteht technisch bedingt Wärme, die abgegeben werden muss, damit sich der Transformator nicht zu sehr aufheizt. Dies könnte zur Zerstörung des Transformators führen.

In den Transformatoren im Bereich der Energieversorgung (**Bild 2**) sorgt eine Ölfüllung im Transformatorgehäuse dafür, dass die im Kern entstehende Wärme abtransportiert wird. Gleichzeitig wirkt die Isolationseigenschaft des Öls einem Überschlag zwischen den leitenden Teilen entgegen. Die gute Wärmeleitfähigkeit von PCB verbesserte den Wärmetransport im Trafoöl. Da PCB gleichzeitig als „nicht brennbar“ eingestuft sind, ließ sich auch ein hohes Maß an Brandschutz erreichen. Bei einigen Transformatoren, die

Tabelle 1. Typische Eigenschaften von Clophen A40 für elektrotechnische Anwendungen.

Dichte in g/cm ³ : bei 20 °C	1,47
bei 100 °C	1,39
Spezifischer Durchgangswiderstand in Ω cm (1 000 V, 1 min, 90 °C)	≥ 1 × 10 ¹³
Wärmeleitfähigkeit bei 40 °C in J/m s K	0,105
Durchschlagsspannung bei 20 bis 90 °C in kV	> 50
Dielektrizitätskonstante (500 V, 50 Hz, 20 °C)	5,7

hohe Anforderungen an den Brandschutz erfüllen mussten, wurde dieses durch ausschließliche Füllung mit PCB realisiert. In einigen Fällen verwendete man PCB aber nur als Additiv, um ein Aufschäumen des Isolieröls im Zirkulationskreislauf zu verhindern.

Das Volumen des eingefüllten Öl/PCB-Gemisches betrug bei einem häufig eingesetzten Ortsnetztransformator (20 kV/400 V) ca. 300 l. In den Umspanntransformatoren der Kraftwerke und Freiluftschaltanlagen betrug die Füllung bis zu einigen 1 000 l.

3 PCB-haltige Kondensatoren in der Elektrotechnik

Kondensatoren dienen in der Elektrotechnik zumeist der kurzfristigen Speicherung elektrischer Energie. Aufbau, Größe und Anwendung sind dabei sehr unterschiedlich. So

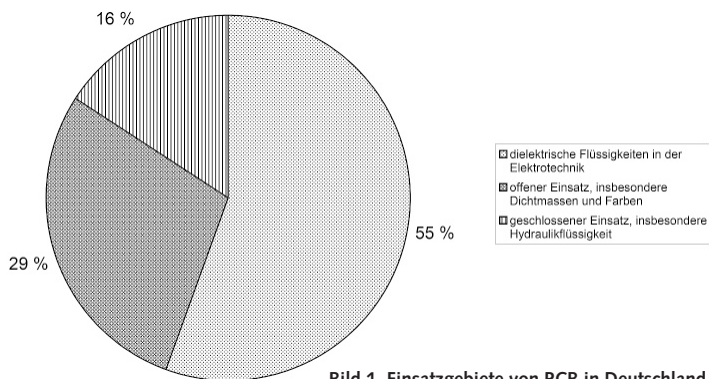


Bild 1. Einsatzgebiete von PCB in Deutschland.

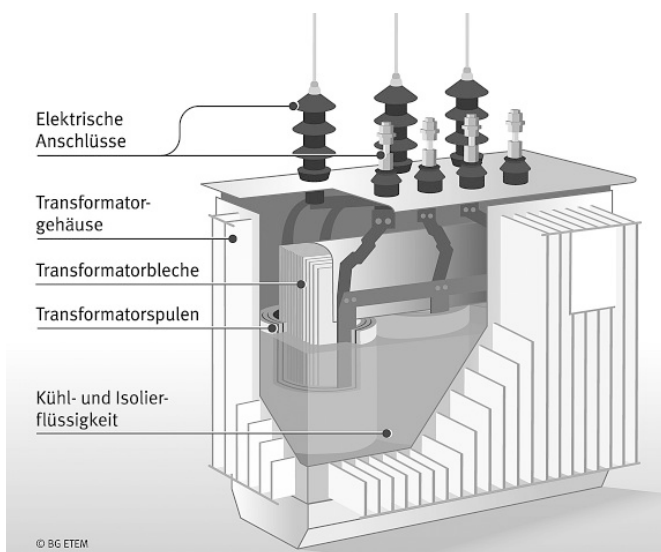


Bild 2. Prinzipieller Aufbau eines Transformators mit Öl/PCB-Füllung.

werden diese von mikroskopisch kleinen Strukturen in Halbleiterchips bis zu etwa 100 kg schweren Komponenten im Bereich der Energieversorgung verwendet. Der Aufbau der dort eingesetzten Leistungskondensatoren besteht grundsätzlich darin, dass zwischen zwei metallischen Elektrodenfolien eine Isolationsschicht gewickelt wird. Bei diesen sogenannten Wickelkondensatoren

(Bild 3) besteht die Isolationsschicht (Dielektrikum) auch heute noch teilweise aus einer getränkten Papierlage. Wegen ihrer sehr guten Isoliereigenschaften wurden hierfür bis Mitte der 1980er Jahre überwiegend PCB als Dielektrikum eingesetzt.

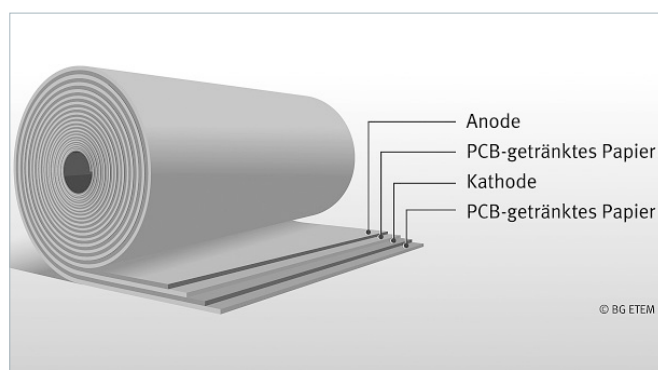


Bild 3. Aufbau eines Wickelkondensators mit PCB-getränktem Papier als Dielektrikum.

Entsprechend der Baugröße unterscheidet man Kondensatoren in solche mit einer geringen Füllmenge bis zu 1 l und solche mit mehr als 1 l PCB-Füllung. In der Praxis enthielten die kleinen Kondensatoren etwa 50 bis 200 g PCB. Solche Kondensatoren wurden insbesondere in Leuchtstoffleuchten (Bild 4) oder bei speziellen Motorantrieben, z. B. in Waschmaschinen, eingesetzt.

Große Kondensatoren hatten Füllmengen von einigen Litern PCB-haltiger Flüssigkeit. Diese kamen nur in industriellen Fertigungsprozessen und der Energieversorgung vor.

4 Herstellungs- und Verwendungsbeschränkungen

Aufgrund zunehmender Forschungsergebnisse über Gefährdungen beim Umgang mit PCB und von Unfallereignissen, wie z. B. das Seveso-Unglück, wurden in Deutschland im Jahr 1976 die ersten Produktionsbeschränkungen für PCB-haltige Produkte festgelegt. Weitere gesetzliche Regelungen auf nationaler und internationaler Ebene führten letztendlich zu einem vollständigen Verwendungsverbot von PCB.

Wichtige Eckdaten zur Regulierung von PCB sind:

- 1978 – Verbot der Nutzung von PCB in offenen Systemen, z. B. als Dichtungsmasse,
- 1989 – PCB-Verbotsverordnung sowie TRGS 518 „Elektroisolierrflüssigkeiten, die mit PCDD oder PCDF verunreinigt sind“ und TRGS 616 „Ersatzstoffe, Ersatzverfahren und Verwendungsbeschränkungen für Polychlorierte Biphenyle (PCB)“ treten in Kraft.

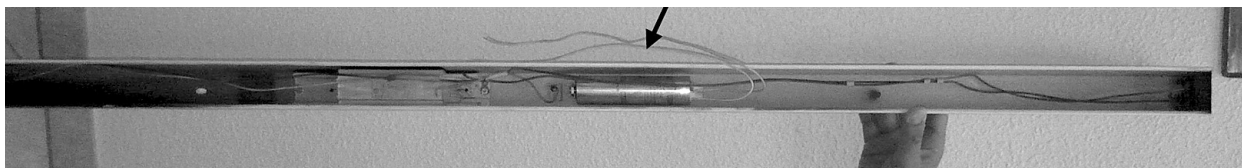


Bild 4. Leuchtstoffleuchte mit einem PCB-haltigen Kondensator (Pfeil) zur Blindstromkompensation.

PCB gehören aufgrund ihrer Persistenz in der Umwelt sowie ihrer schädigenden Wirkung auf Umwelt und Gesundheit zu den persistenten organischen Schadstoffen (POP) und sind damit Gegenstand des Stockholmer Übereinkommens über persistente organische Schadstoffe vom Mai 2001, das am 17. Mai 2004 in Kraft getreten ist [4]. Parallel dazu trat am 20. Mai 2004 die Europäische Verordnung 850/2004 in Kraft. Danach dürfen PCB-haltige Abfälle nur noch unter bestimmten Bedingungen (z. B. Verbrennung) beseitigt werden [5]. Für die unterschiedlichen elektrotechnischen Bauteile und Komponenten gelten die in **Tabelle 2** aufgeführten Regelungen. Die Produktion von Clophen wurde in Deutschland im Jahr 1985 eingestellt. Danach wurden elektrotechnische Produkte mit einer PCB-haltigen-Füllung in Deutschland nicht mehr in Verkehr gebracht [6].

5 Entsorgungskonzepte

Die Entwicklung von Entsorgungskonzepten für PCB-haltige elektrotechnische Komponenten und Bauteile begann in Deutschland nach Inkrafttreten der PCB-Verbotsverordnung. Für Transformatoren boten sowohl Herstellerkonzerne als auch zumeist kleine Entsorgungsspezialbetriebe entsprechende Verfahren an. Insbesondere wird hier auf die Mitteilung 24 der Bund-/Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) [7] verwiesen, die sich mit der Entsorgung und Reinigung von PCB-haltigen Transformatoren, Kondensatoren und Reststoffen befasst. Aufgrund des geringen Entsorgungsbedarfs seit dem Jahr 2000 hat sich die Zahl der Entsorgungsspezialbetriebe auf einige wenige reduziert. Alle Betriebe, die PCB-haltige Produkte entsorgen, müssen hierfür eine Genehmigung gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) nachweisen können.

5.1 Entsorgung kleiner PCB-haltiger Kondensatoren

Nach der aktuellen Fassung der Gefahrstoffverordnung durften Kondensatoren mit einer PCB-Füllung zwischen 0,1

und 1 l bis zum 31. Dezember 2010 weiter genutzt werden. Für kleinere Kondensatoren gilt dies bis zur Außerbetriebnahme ohne zeitliche Befristung. Entsprechende Kondensatoren werden somit noch in den nächsten Jahren dem Entsorgungsprozess zugeführt werden müssen.

PCB-haltige Kondensatoren sind im Allgemeinen mit den Buchstabenkombinationen CD, CI, CP oder A30, A40 gekennzeichnet. Zur Identifizierung entsprechender Kondensatoren eignet sich, wie in **Bild 5** dargestellt, das vom ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. veröffentlichte Merkblatt „Entsorgung von PCB-haltigen Starkstromkondensatoren“ [8]. Dieses Merkblatt enthält eine umfangreiche Aufstellung der in Deutschland eingesetzten Starkstromkondensatoren. Des Weiteren bietet es Hinweise auf Transportanforderungen und zugelassene Entsorgungsunternehmen.

Während des Entsorgungsvorgangs werden die Kleinkondensatoren zunächst maschinell zerkleinert, meist in einer Schredderanlage. Die dabei frei werdende PCB-Flüssigkeit wird aufgefangen und in geschlossenen Tanks gesammelt. Die zerkleinerten Feststoffe werden in Behältnissen separiert, die entsprechende Anforderungen erfüllen müssen. Beide Fraktionen, fest und flüssig, werden zur abschließenden Beseitigung in einer Hochtemperaturverbrennungsanlage für Industriemüll bei einer Temperatur von ca. 1 200 °C verbrannt.

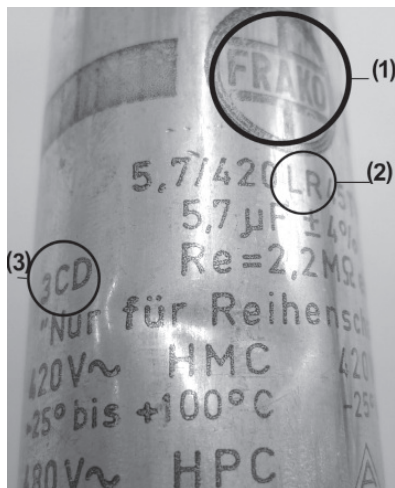
5.2 Entsorgung großer PCB-haltiger Kondensatoren

Der Einsatz größerer Kondensatoren mit einer PCB-Füllung von über 1 l ist durch die PCB-Verbotsverordnung seit dem 1. Januar 1994 in Deutschland nicht mehr zulässig. Bis heute werden solche Kondensatoren immer noch bei den Entsorgungsfachbetrieben angeliefert. Die Bauteile stammen sowohl von deutschen als auch von ausländischen Betreibern.

Der Entsorgungsprozess gestaltet sich im Vergleich zu Kleinkondensatoren aufwendiger, das Hauptproblem liegt insbesondere im Öffnen der Kondensatoren. Damit die PCB-Flüssigkeit herausfließen kann, werden die Gehäuse angebohrt oder mit einer spitzen Stange angestochen. Bei beiden Verfahren besteht die Gefahr einer Hautkontamination durch austretende PCB-Flüssigkeit. Um dem entgegenzuwirken, nutzt man entweder teilautomatisierte geschlossene Aufbohranlagen oder sehr lange Aufstechstangen. Die auslaufende PCB-Flüssigkeit wird über Ablaufrinnen aufgefangen und anschließend in Entsorgungstanks gesammelt.

Tabelle 2. Rechtliche Regelungen für Kondensatoren und Transformatoren.

Kleinkondensatoren (< 1 l PCB)	
In Verkehr bringen	Verbot seit dem 29. Juli 1989
Verwendung: 0,1 bis 1 l < 0,1 l	Verbot seit dem 1. Januar 2011 bis zur Außerbetriebnahme, sofern vor dem 29. Juli 1989 schon in Betrieb
Großkondensatoren (> 1 l PCB)	
In Verkehr bringen	Verbot seit dem 29. Juli 1989
Verwendung	Verbot seit dem 1. Januar 1994
Transformatoren	
In Verkehr bringen	Verbot seit dem 29. Juli 1989
Verwendung	Verbot seit dem 1. Januar 2000



Typenkennzeichnung von PCB-haltigen Starkstromkondensatoren				
FIRMA	Leistungskondensatoren		Leuchtstofflampen- und Motorkondensatoren	
	Typen- kennzeichnung	Tränkmittel- kennzeichnung	Typen- kennzeichnung	Tränkmittel- kennzeichnung
...				
FRAKO (1)	Ph (außer PH-M) PK8 (außer PK2-M) RK1	3CD 4CD A40 Cp Clophen CPA40	LR (2) M...RLB M...RKB M...RFB RK1	3CD, 4 CD (3) A30, A40 Cp Clophen CP A 40
...				
...				

Bild 5. Identifikation eines PCB-haltigen Kondensators unter Nutzung des ZVEI-Merkblatts.

Nach dem Entleeren der Kondensatoren werden sie in einer Schredderanlage oder mit einer Sägeeinrichtung mechanisch zerkleinert. Die zurückbleibenden PCB-kontaminierten Feststoffe, z. B. getränktes Isolationspapier, werden analog zum Verfahren bei den Kleinkondensatoren im Hochtemperaturofen verbrannt.

5.3 Entsorgung und Recycling von Großtransformatoren mit PCB-haltiger Füllung

Die größten PCB-belasteten elektrotechnischen Komponenten waren Öl/PCB-gekühlte Transformatoren. Die PCB-Verbotsverordnung ließ für Transformatoren mit einer PCB-Konzentration bis 2 000 ppm einen einmaligen Austausch des belasteten Öls durch unbelastetes zu. Danach durfte die PCB-Konzentration von 50 ppm nicht überschritten werden. Dieser Wert musste durch eine Überprüfung nach sechs Monaten bestätigt werden. Ein Transformator mit einer PCB-Konzentration von unter 50 ppm gilt als PCB-frei. Solche Austausch- oder „Retrofilling“-Verfahren wurden hauptsächlich bis Ende des Jahres 1999 durchgeführt. Diese Arbeiten fanden fast ausschließlich direkt an der Einsatzstelle des Transformators statt, um Demontage- und Transportkosten zu sparen. Diese Möglichkeit des „Retrofillings“ war auch Bestandteil von Anhang IV, Nr. 14 der Gefahrstoffverordnung [9].

Transformatoren mit einer PCB-Konzentration von über 2 000 ppm mussten bis zum 31. Dezember 1999 endgültig fachgerecht entsorgt werden. Dies galt auch für Transformatoren, die nach dem Austauschprozess eine PCB-Konzentration über 50 ppm aufwiesen.

Auch heute noch stehen Transformatoren mit PCB-Gehalten über 2 000 ppm zur Entsorgung und zum Recycling an. Diese stammen überwiegend aus dem Ausland, teilweise auch aus Deutschland. Für die Entsorgung solcher Transformatoren gab es bis zum Inkrafttreten der EU-POP-Verordnung zwei Verfahren:

Verfahren 1

Das belastete Transformatoröl wurde abgepumpt und in Entsorgungstanks gelagert. Anschließend wurde in den entleerten Transformator granulartförmiges Bindemittel eingefüllt, um noch vorhandene Restmengen des Öl/PCB-

Gemischs aufzunehmen. Nach dem Verschließen des Transformators wurde dieser in die Untertagedeponie Herfa-Neurode (Hessen) der Fa. K+S gebracht und dort dauerhaft entsorgt. Diesen Entsorgungsschritt des Endlagerns empfahl die frühere TRGS 518 im Punkt 7.8.3. Gemäß Artikel 7 der EU-POP-Verordnung [5] ist dies seit dem Jahr 2007 nicht mehr zulässig.

Verfahren 2

Ziel dieses Prozesses ist es, den Reinigungsvorgang so durchzuführen, dass möglichst viele Wertstoffe, insbesondere Kupfer und Eisen, wiederverwertet werden. Dazu wird der Transformator nach dem Abpumpen des Öl/PCB-Gemisches weiter gereinigt. Meist schließen die Entsorgungsbetriebe den ungeöffneten Transformator an einen geschlossenen Spül- und Reinigungskreislauf an, in dem sich ein Reinigungsmittel befindet. Als Reinigungsmittel wird insbesondere Perchlorethylen (PER) eingesetzt.

Für gering belastete Transformatoren mit einer PCB-Konzentration < 20 000 ppm verwendet man auch ein Reinigungsmittel auf der Basis von Tensiden. Wird während des Spülvorgangs der PCB-Konzentrationswert von 50 ppm (Deklaration PCB-frei) unterschritten, ist dieser Reinigungsvorgang beendet. Die Spülflüssigkeit wird abgepumpt und der Transformator getrocknet. Anschließend wird der Transformator geöffnet, der Transformator Kern entnommen und in seine Einzelteile zerlegt.

Da die Reinigungsflüssigkeit die dicht gepackten Metallkomponenten (z. B. Blechpakete) des Transformator Kerns im ersten Spülvorgang nicht vollständig erreichen konnten, werden diese nach der Demontage vereinzelt und in dafür vorgesehene Behältnisse gepackt. Diese werden verschlossen und anschließend einem weiteren geschlossenen Spülvorgang unterzogen. Dies wird teilweise mechanisch unterstützt, z. B. durch Dreh- oder Rüttelbewegungen. Wird auch bei diesem Reinigungsvorgang die PCB-Konzentration von 50 ppm unterschritten, ist diese Reinigungsstufe durch Abpumpen und Trocknen beendet. Erst jetzt dürfen die Metalle dem allgemeinen Wertstoffkreislauf als PCB-frei zugeführt werden.

Die bei den Reinigungsverfahren eingesetzten Spülflüssigkeiten werden chemisch-physikalisch aufbereitet, sodass

eine Abtrennung der PCB erreicht werden kann. Alternativ werden sie, wie die übrig gebliebenen organischen Materialien (Papier, Holz, Kunststoffe), im Hochtemperaturofen verbrannt.

Alle in Deutschland eingesetzten Entsorgungs- und Recyclingprozesse für PCB-kontaminierte Transformatoren sind in ihrem Grundkonzept ähnlich. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Spül- und Reinigungsflüssigkeit und die technische Ausführung des Verfahrens. Für alle Entsorgungs- und Recyclingprozesse muss eine Zulassung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz vorliegen.

6 Ausblick

20 Jahre nach Inkrafttreten der PCB-Verbotsverordnung sind in Deutschland noch elektrische Bauteile vorhanden, die PCB enthalten. Diese resultieren sowohl aus den zulässigen Übergangsregelungen als auch aus Altbeständen. Darüber hinaus werden verstärkt elektrotechnische Komponenten aus dem Ausland in Deutschland wiederverwertet. Da insbesondere im Ausland noch eine große Menge PCB-haltiger elektrotechnischer Bauteile existiert, werden vermutlich noch über Jahre Entsorgungs- und Recyclingprozesse in Deutschland durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie. Bd. 9. 4. Aufl. Weinheim: Verlag Chemie 1975.
- [2] Brevik, K.; Sweetman, A.; Pacyna, J. M.; Jones, K. C.: Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners – a mass balance approach. 1. Global production and consumption. 2. Emission. *Sci. Total Environ.* 290 (2002) Nr. 1-3, S. 181-224.
- [3] Guidelines for the identification of PCBs and materials containing PCBs. Hrsg.: United Nations Environment Programme, 1999.
- [4] Stockholm convention on persistent organic pollutants (POPs). Hrsg.: Stockholm Convention Secretariat, Genf, Schweiz. <http://chm.pops.int/default.aspx>
- [5] Verordnung (EG) Nr. 850/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über persistente organische Schadstoffe und zur Änderung der Richtlinie 79/117/EWG. ABl. EG (2004) Nr. L 158, S. 7-49.
- [6] Abfallwirtschaft, PCB(Polychlorierte Biphenyle)-haltige Abfälle. Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2010. www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft/sonderabfall/pcb.htm
- [7] LAGA-Mitteilung 24. Teil 1: Merkblatt „Reinigung und Entsorgung von Transformatoren mit PCB-haltiger oder PCB-kontaminierter mineralöhlhaltiger oder sythetischer Isolierflüssigkeit (Stand: 15.2.95)“. Teil 2: Merkblatt „Entsorgung von PCB-haltigen Reststoffen und Abfällen (Stand: 2/92)“. Merkblatt „Entsorgung PCB-haltiger Kleinkondensatoren (Stand: 15.3.89)“. Hrsg.: Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Berlin: Erich Schmidt 1996.
- [8] Entsorgung von PCB-haltigen Starkstromkondensatoren. Hrsg.: ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., Frankfurt am Main 2010 (in Überarbeitung). www.zvei.org/fachverbaende/starkstromkondensatoren/publikationen/
- [9] Gefahrstoffverordnung. 20. Aufl. Köln: Carl Heymanns, 2008.