

Technologie-Roadmap Leistungselektronik- Kondensatoren



ZVEI-Fachverband Starkstromkondensatoren

Im ZVEI vertritt der Fachverband Starkstromkondensatoren die wirtschaftlichen, technischen und industriepolitischen Interessen der Hersteller und Anwender von Leistungskondensatoren, Leistungselektronik-Kondensatoren, passiven und aktiven Kompensations-/Filtersystemen und Blindleistungsreglern, Drosseln für die Blindleistungskompensation sowie von Leuchtstofflampen- u. Motorkondensatoren in Deutschland und Europa.

Diese Produkte, vom Kondensator bis hin zum kompletten System und den zugehörigen Dienstleistungen, bilden eine wesentliche Komponente für eine effiziente Erzeugung, Umspannung und Nutzung elektrischer Energie.



Technologie-Roadmap Leistungselektronik-Kondensatoren

Herausgeber:
ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.
Fachverband Starkstromkondensatoren
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main

Ansprechpartner:
Dr. Marcus Dietrich
Telefon: +49 69 6302-462
Fax: +49 69 6302-407
E-Mail: dietrich@zvei.org
März 2019
www.zvei.org



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung, Nicht-kommerziell, Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz.

Trotz größter Sorgfalt übernimmt der ZVEI für Vollständigkeit und Richtigkeit der Inhalte keine Gewähr.

Autoren:

Dr. Volker Geitner, Sebastian Lemm	Electronicon Kondensatoren
Ronald Hänßler, Dr. Lucia Cabo,	
Natalia Iriondo, Ayse Kartal	Epcos
Gerd Peter Fischer	Ftcap
Andrea Tesi, Dietmar Zeidler	Kemet Electronics
Dr. Rainer Weber	Vishay Electronic

Gastbeiträge:

Ulrich Schlapbach	ABB Schweiz
Roland Lund	Brückner Maschinenbau
Michael Mankel	Infineon Technologies
Markus Ackermann, Ingo Euler	Siemens
Vladimir Moncek	Tervakovski Film
Dr. Masatoshi Ohkura	Toray International Europe
Dr. Karl-Heinz Kochem	Treofan Germany
Dr. Faical Turki	Vahle

Inhalt

1 Einleitung	4
2. Allgemeine Informationen zu PEC	5
2.1 Weltmarkt der PEC	5
2.2 Normengrundlage für PEC	5
2.3 Grafische Übersicht der verschiedenen Technologien sowie der zugehörigen Technologietreiber	7
2.4 Neue Halbleitertechnologien stellen Herausforderungen an PEC	8
2.5 Materialeigenschaften von Polypropylen und weiterer Dielektrika	9
3. Anwendungsbereiche für PEC	11
3.1 Technische Einsatzgebiete	11
3.2 Bauformen von PEC	12
3.3 Anwendungsbereiche von PEC nach Art der elektrischen Beanspruchung	13
4. DC-Anwendungen der Leistungselektronik	14
4.1 Stand der Technik / Techniktrend allgemein	14
4.2 Technologieentwicklung	15
4.3 Anwendungsbereiche von PEC	18
5. AC-Anwendungen der Leistungselektronik	26
5.1 Allgemeine technische Anforderungen	26
5.2 Verwendung von Filterkondensatoren	27
5.3 Typen von Filterkondensatoren	28
6. Schlusswort	30
7. Abkürzungsverzeichnis	31

1. Einleitung

Neben Induktivitäten und Widerständen gehören Kondensatoren zu den klassischen passiven Bauelementen, da diese im Gegensatz zu aktiven elektronischen Komponenten, wie den Halbleitern, keine Verstärkungs- oder Steuerfunktionen erfüllen.

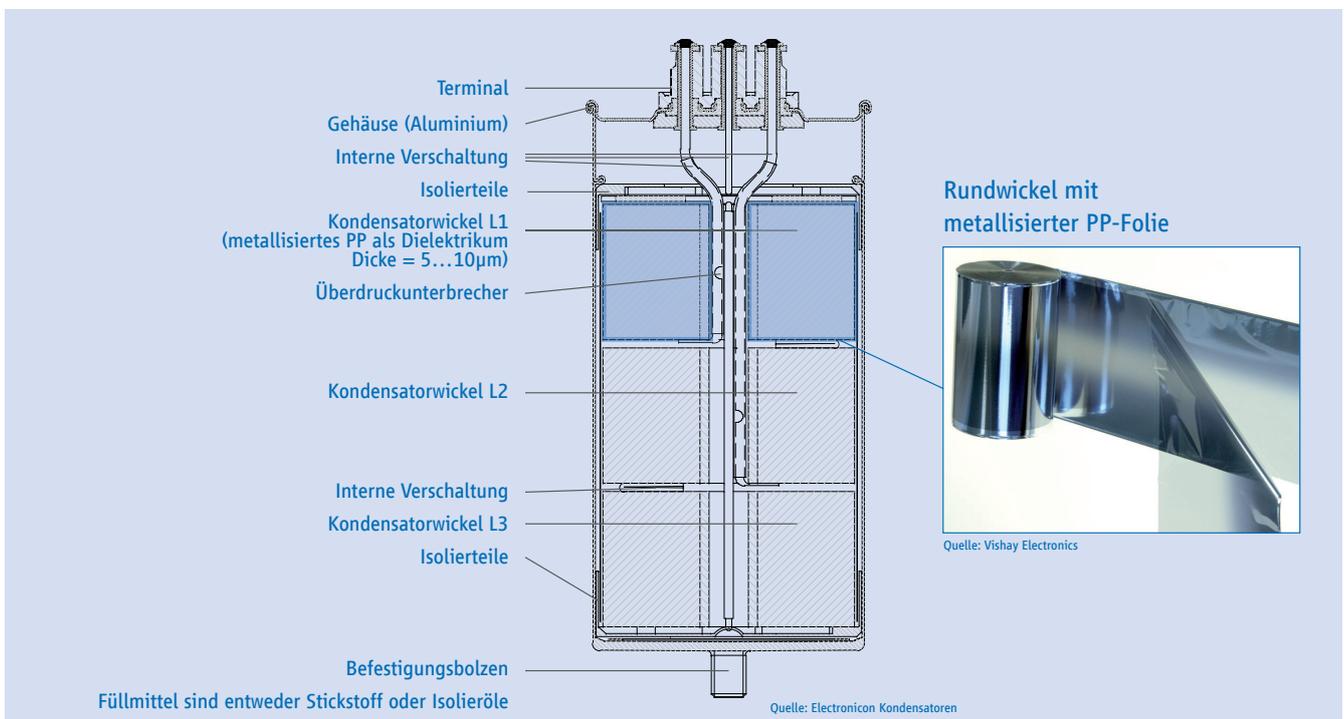
Die folgenden Darlegungen behandeln ausschließlich die Gruppe der Folienkondensatoren und ihre vielfältigen Anwendungen in der Leistungselektronik.

Leistungselektronik-Kondensatoren, die nach der MKP-Technologie (Metallisiertes Kunststoff Polypropylen) hergestellt wurden, sind in der Lage, elektrische Energie in kurzer Zeit verlustarm und bei gleichzeitig hoher Lebensdauer aufzunehmen, zu speichern und abzugeben. Sie decken dabei einen großen Frequenz-, Spannungs- und Energiebereich mit einer breiten Vielfalt an Bauformen und -größen ab.

MKP-Kondensatoren sind nicht gepolt und somit für Gleich- und Wechselspannungsanwendungen gleichermaßen geeignet.

Aufgrund dieser herausragenden Eigenschaften werden Leistungselektronik-Kondensatoren, auch Power Electronic Capacitors (PEC) genannt, als Schlüsselkomponenten in einer Vielzahl von leistungselektronischen Schaltungen, wie zum Beispiel in industriellen Anwendungen, in Energiesystemen, im Bereich Mobilität und in der Medizintechnik eingesetzt.

Abb. 1: Querschnitt eines typischen dreiphasigen AC-Filterkondensators



In der vorliegenden Broschüre wird eine Bewertung und Darstellung von Status und Trends sowie Chancen und Risiken, bezogen auf Märkte und Technologien für Leistungselektronik-Kondensatoren, vorgenommen.

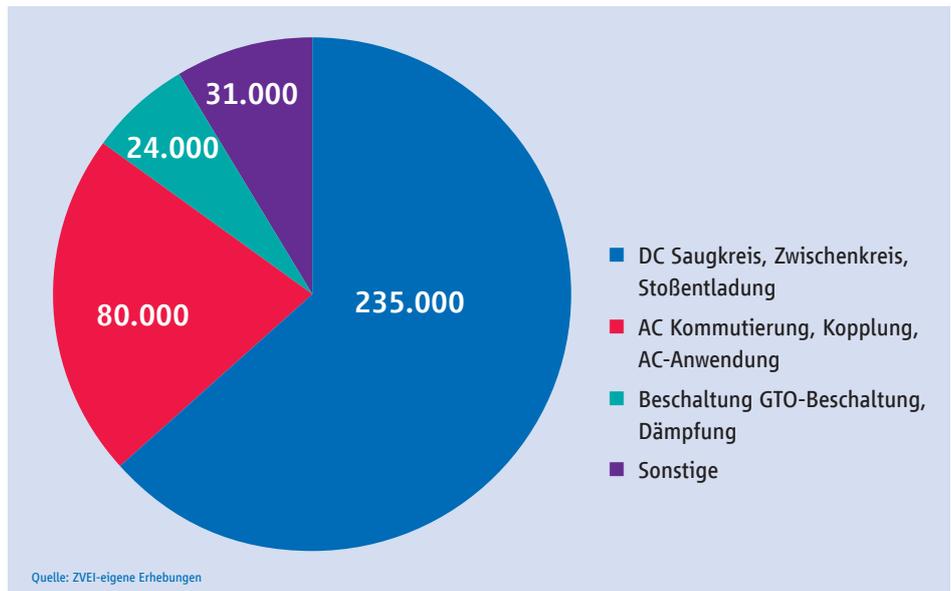
Dem Leser soll ein Überblick über die zu erwartenden Anforderungen von Leistungselektronik-Kondensatoren in deren Anwendungen für einen Zeitraum von etwa fünf Jahren vermittelt werden.

2. Allgemeine Informationen zu PEC

2.1 Märkte der PEC

Der Weltmarkt für Leistungselektronik-Kondensatoren (PEC) nahm 2016 ein Umsatzvolumen von 370 Millionen Euro ein. Davon entfielen 235 Millionen Euro auf die Applikationen DC-Saugkreis, Zwischenkreis und Stoßentladung. Es folgt die Gruppe der AC-Anwendungen mit Kommutierung und Kopplung mit einem Umsatz von 80 Millionen Euro. Neben den Sonstigen Anwendungen (31 Millionen Euro Umsatz) nimmt die Gruppe der Beschaltungs- und Dämpfungskondensatoren mit 24 Millionen Euro Umsatz den geringsten Anteil am Weltmarktumsatz ein.

Abb. 2: Weltmarkt Leistungselektronik-Kondensatoren 2016 in TEuro



2.2 Normengrundlage für PEC

Für den Einsatz von Leistungskondensatoren spielen die zugehörigen Normen eine wichtige Rolle. In den nachstehend aufgeführten EN-, IEC-, IEEE-Standards und in anderen Normen und technischen Vereinbarungen wie UL oder der AEC-Q200 werden Mindestanforderungen bzw. Vorgaben unter anderem zur Herstellung, Prüfung und Verwendung der PEC zusammengefasst und beschrieben.

Sie spiegeln damit zum einen den erreichten Stand wider und setzen zum anderen wichtige Maßstäbe bezüglich der technischen Mindestanforderungen und qualitativen Absicherung der Produkte.

Neben rein technischen Aspekten spielen hierbei auch Untersuchungen und Nachweise zur Sicherheit der Kondensatoren eine entscheidende Rolle. Normen stellen damit ein wichtiges Hilfsmittel auch für die Anwender der Komponenten dar, um deren sicheren und langfristigen Betrieb zu gewährleisten.

2.2.1. Wichtige internationale Kondensatornormen für die Leistungselektronik (PEC) und verwandte Anwendungen

- EN / IEC 61071 Ed.2, AC- und DC-Kondensatoren für die Leistungselektronik
- UL810 – AC-Kondensatoren
UL810B – DC-Kondensatoren für die Leistungselektronik
- EN / IEC 61881-1, PEC-Schienenfahrzeuge – Papier- und Kunststofffilm-Kondensatoren
- JIS E 5012-1:2015 – entspricht IEC 61881-1:2010 (MOD) Rolling stock – Capacitors for power electronics – Part 1: Paper and plastic film capacitors
- EN / IEC 60831/60931 1-2, AC-Leistungsparrallelkondensatoren bis 1.000 V IEEE 18-2012, Standard for Shunt Power Capacitors >216V AC 50/60 Hz, ggf. zutreffend für Leistungselektronik-Kondensatoren beim Einsatz für netzseitige AC-Filteranwendungen

2.2.2. Wichtige internationale Normen, welche zusätzliche technische Anforderungen regeln, die auch auf Kondensatoren anzuwenden sind

- EN 45545 1-4 – Brandschutz in Schienenfahrzeugen
→ regelt die besonderen Materialanforderungen für den Bahneinsatz
- IEC 61287-1 Ed. 3, Railway applications – Power converters installed on board rolling stock – Part 1: Characteristics and test methods
- IEC 61800-5-1 Ed. 2.1, Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-1: Safety requirements – electrical, thermal and energy

Die genannten Normen enthalten besondere Testanforderungen zu elektrischen Eigenschaften, zum Beispiel zum Nachweis der Teilentladungsfestigkeit des Isoliersystems.

2.2.3. Standards für Automotive Components (Kondensatoren)

Im Bereich der Leistungselektronik-Kondensatoren für die E-Mobilität ist derzeit kein Standard vorhanden oder in Planung; die speziellen Anforderungen werden über eine Detailspezifikation vereinbart.

Die einzige Normenreferenz ist die IEC 62576 – Electric double-layer capacitors for use in hybrid electric vehicles – Test methods for electrical characteristics

Darüber hinaus existieren folgende Dokumente, die Kondensatoren einschließen oder direkt behandeln:

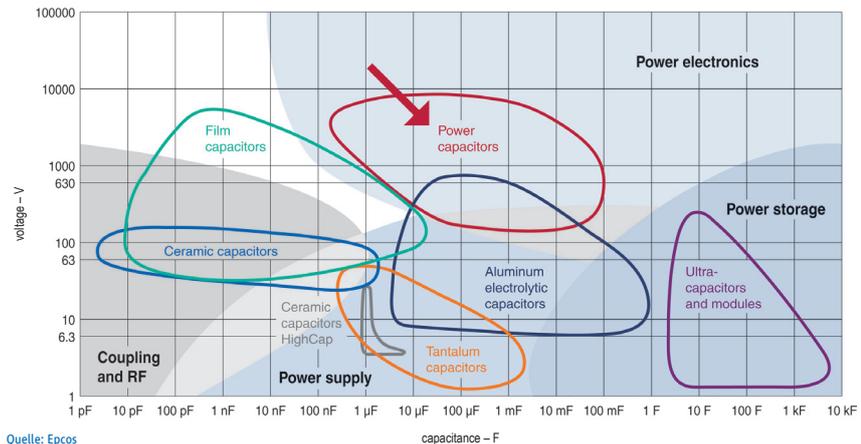
- AEC-Q200, Stress Test Qualification For Passive Components
- Nationales ZVEI-Anforderungsdokument „Qualifikation von Zwischenkreis-kondensatoren für den Einsatz in Komponenten von Kraftfahrzeugen“ – Allgemeine Anforderungen, Prüfbedingungen und Prüfungen
- ZVEI-Delta-Qualification-Matrix-KFZ-Zwischenkreiskondensatoren-V1-161021.xlsx

2.3 Übersicht der verschiedenen Technologien sowie der zugehörigen Technologietreiber

Die beiden nachstehenden Abbildungen zeigen die unterschiedlichen Kondensator-technologien in Abhängigkeit von Spannung und Kapazität für die Jahre 2004 und 2016. Man erkennt, dass die Entwicklung in den letzten Jahren zu einer noch stärkeren Überlappung der verschiedenen Kondensator-technologien geführt hat.

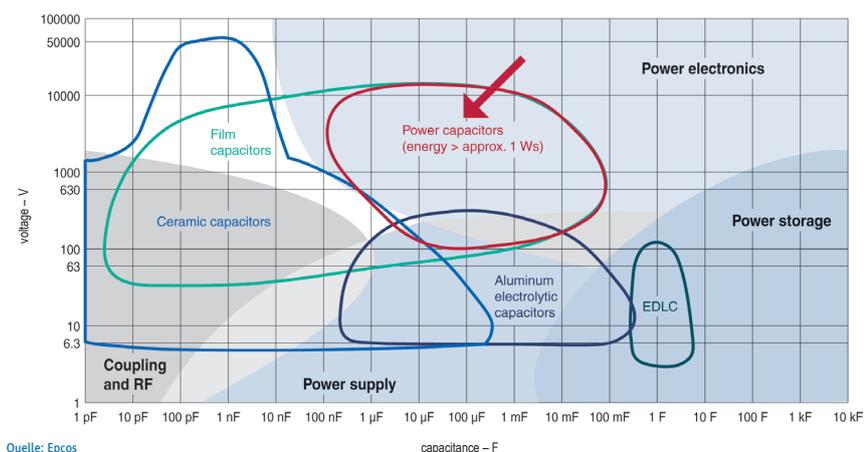
Der Spannungs- und Kapazitätsbereich der Leistungskondensatoren mit einem Energieinhalt größer ca. 1 Ws ist hierbei weitgehend unverändert geblieben. Leistungskondensatoren stellen nach wie vor einen wesentlichen Teil der Folienkondensatoren dar. Hinsichtlich ihrer elektrischen Kenndaten bezüglich hoher Spannung und Kapazität werden ihre Eigenschaften in dieser Kombination von keiner anderen Kondensator-technologie erreicht. Einzig zu den Elektrolytkondensatoren gibt es Überlappungen im Bereich niedriger Spannungen.

Abb. 3: Kondensator-technologien 2004



Quelle: Epcos

Abb. 4: Kondensator-technologien 2016



Quelle: Epcos

Die wesentlichen Herausforderungen für die Zukunft liegen im Bereich der gestiegenen Anforderungen bezüglich weiterer elektrischer und technischer Parameter abseits von Kapazität und Nennspannung der PEC.

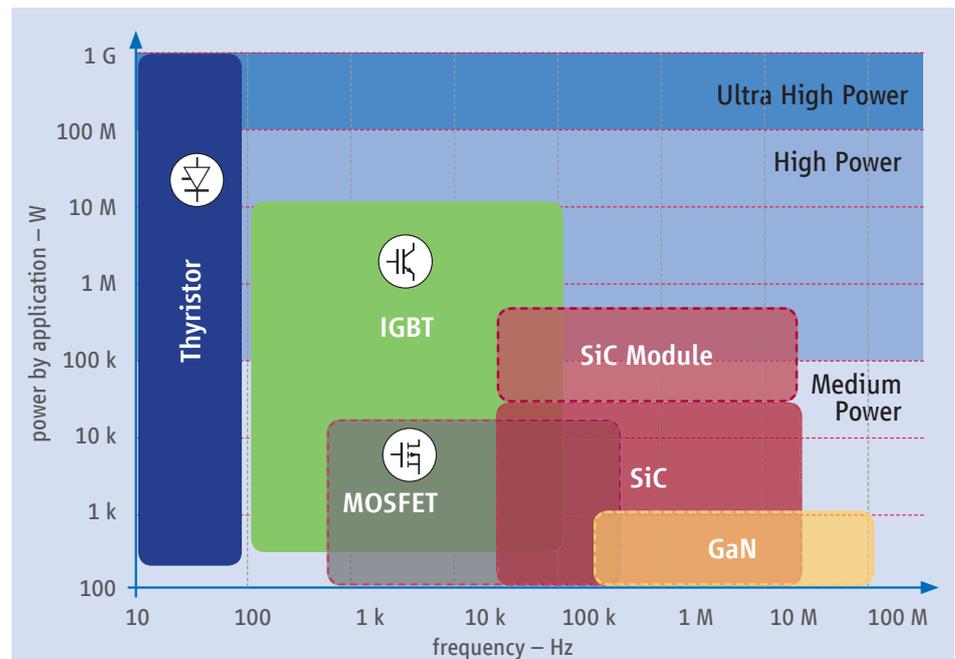
Damit werden sich die Entwicklungen der letzten Jahre – hin zu verlustarmen kompakten Kondensatoren – weiter fortsetzen.

2.4 Neue Halbleitertechnologien stellen Herausforderungen an PEC

Die sich in Markteinführung befindlichen SiC- und GaN-Leistungshalbleitertechnologien stellen neue Herausforderungen an die Leistungselektronik-Kondensatoren dar. Diese Halbleiter-Bauelemente können mit hohen Schaltfrequenzen arbeiten und erzeugen Frequenzanteile in Bereichen von ca. 30 kHz bis 100 MHz. Sie erlauben auch einen sichereren Betrieb bei höheren Temperaturen, als das mit Si-Bauelementen bisher möglich war.

Daher ist zukünftig die Entwicklung von noch kompakteren leistungselektronischen Baugruppen zu erwarten, die neue bzw. erweiterte Anwendungsgebiete erschließen werden. Wesentliche Anwendungen werden zunächst im Bereich der Industrie liegen. Anwendungsbereiche mit hohen Anforderungen an die Systemzuverlässigkeit werden wohl erst zu einem späteren Zeitpunkt folgen.

Abb. 5: Trendsetter Halbleitertechnologien



Quelle: Infineon Technologies

Die Entwicklung dieser neuen leistungsstarken Halbleitertypen in SiC- oder GaN-Technik tritt damit zugleich als wesentlicher Technologietreiber für die Produktgruppe der PEC auf.

Für zukünftige Kondensatorentwicklungen sind somit als wesentlich erweiterte Anforderungen zum einen die hohen Einsatztemperaturen und zum anderen das auch auf die Kondensatoren wirkende erhöhte Frequenzspektrum zu nennen. Hier gilt es, clevere Lösungen zu finden.

2.5 Materialeigenschaften von Polypropylen und weiterer Dielektrika

Die nachstehende Tabelle stellt die wesentlichen Eigenschaften von unterschiedlichen Dielektrikum-Folien, die für die Herstellung von PEC verwendet werden können, nach verschiedenen Parametern dar.

Sie soll eine Übersicht geben, inwieweit zu den heute gebräuchlichen Werkstoffen alternative Materialien als Kondensator-Dielektrikum-Folie zur Verfügung stehen.

Der für die Herstellung von Leistungskondensatoren gegenwärtig fast ausschließlich eingesetzte Folienwerkstoff ist Polypropylen (PP). Dabei eignet sich Polypropylen aufgrund seiner besonderen Eigenschaften wie hoher Spannungsfestigkeit, niedriger elektrischer Verluste sowie günstiger Verarbeitbarkeit und niedrigem Preis besonders für die Herstellung von Kondensatoren mit hoher Leistung. PP-Kondensatorfolien sind in einem großen Dickenbereich verfügbar.

Der in der Tabelle dargestellte Vergleich an Dielektrikum-Folien macht deutlich, dass gegenwärtig keine aussichtsreichen Alternativwerkstoffe zum PP zur Verfügung stehen.

Tab. 1: Übersicht charakteristischer Filmmaterial-Eigenschaften

Dielektrikum	Polypropylen	Polyester	Polyethylen-naphthalat		Polyphenylensulfid	Aramid	Syndiotaktisches Polystyrol	Polyetherimid	Polyvinylidenfluorid
	PP	PET	PEN	PEN HV	PPS		SPS	PEI	PVDF
Dichte [g/cm ³]	0,91	1,41	1,36	1,30	1,34	1,4	1,2	1,27	1,78
Verlustfaktor	<0,0002	0,003	0,004	0,003	0,0006	0,01	<0,0002	0,001	0,02
Dielektrizitätszahl	2,2	3,2	3,05	2,95	3	3,7	2,9	3,2	8
Glastemperatur [°C]	<0	75	125	125	95	>270	100	>210 (217)	<0
Schmelztemperatur [°C]	165	255	265	265	280		280		175
Selbsteigenschaften	sehr gut	mittel	mittel bis gering	sehr gut	gering			mittel bis gering	
Durchschlagsspannung	gut	mittel	mittel	gut	gering	gering	mittel	gering	sehr gering
Kosten	niedrig	niedrig	mittel	mittel	hoch	NA	niedrig	hoch	sehr hoch
Min. Foliendicke [µm]	2,0	0,7	1,4	3	1,2		12	5	
Schrumpf-MD [%]	...5 %								
Schrumpf-TD [%]	...2 %								
Spez. Widerstand [Ωcm] [23°C]	10E18	10E18							
Metallisierungsfähigkeit	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut		gut	gut	

Quelle: ZVEI

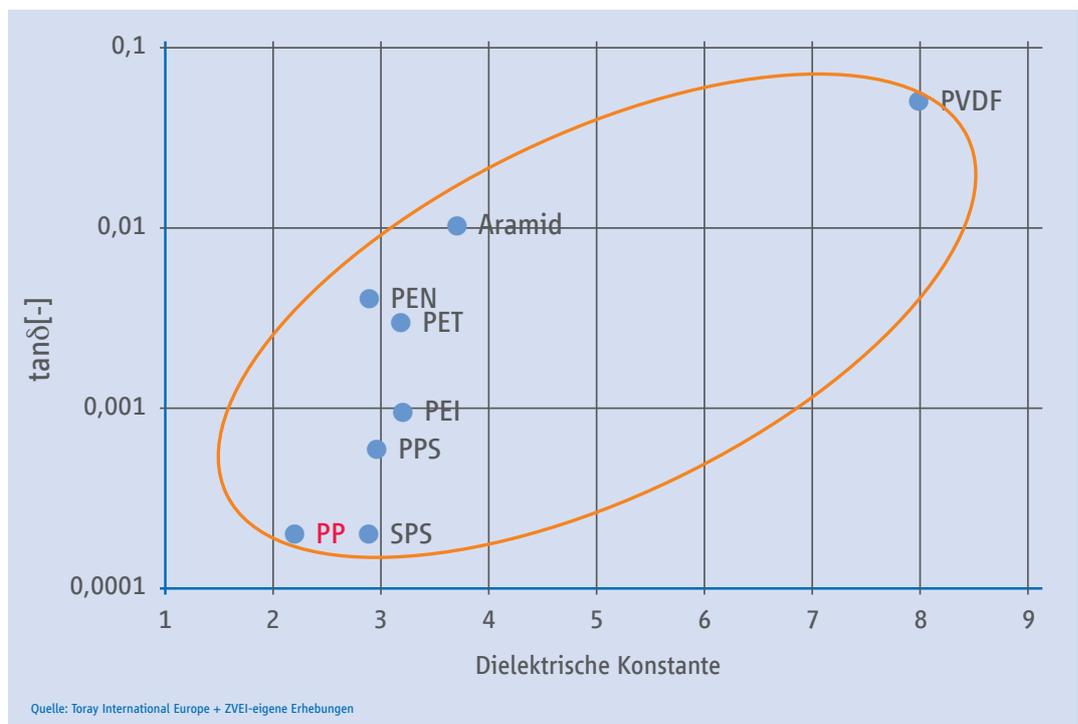
Charakteristische Filmmaterial-Eigenschaften

Die nachstehende Abbildung zeigt die grafische Einordnung der verschiedenen Filmmaterialien nach Verlustfaktor ($\tan \delta$) und Dielektrizitätskonstante. Dabei sticht PP wegen seines besonders niedrigen Verlustfaktors heraus. Es eignet sich neben den DC-Anwendungen als einziges Material insbesondere auch für AC-Leistungsanwendungen mit hohem Blindleistungsanteil.

Andere Materialien mit zum Teil deutlich höheren Dielektrizitätskonstanten verfügen im Gegensatz dazu fast immer über einen deutlich höheren $\tan \delta$ oder sind Exoten, die nicht in geeigneten Foliendicken verfügbar sind.

Somit bleiben gegenwärtig und auch für die nähere Zukunft Polypropylen und, eingeschränkt auf DC-Anwendungen, auch PET weiterhin die hauptsächlich eingesetzten Filmmaterialien.

Abb. 6: Eigenschaften verschiedener Filmmaterialien



Nachdem die wesentlichen Eigenschaften von Dielektrikum-Folien vorgestellt wurden, wird im folgenden Kapitel auf die Anwendungsbereiche nach technischen Einsatzgebieten der Leistungselektronik-Kondensatoren und ihre unterschiedlichen Bauformen eingegangen. Darüber hinaus werden die Anwendungsbereiche von Leistungselektronik-Kondensatoren nach Art der elektrischen Beanspruchung erläutert.

3. Anwendungsbereiche für PEC

3.1 Technische Einsatzgebiete

Allgemeine Bedarfsträger für PEC nach Technikbereichen



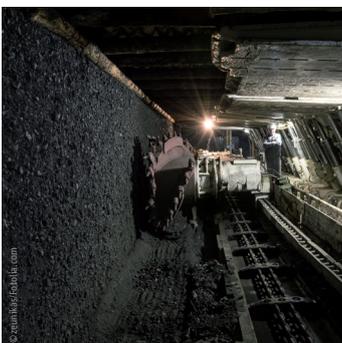
Traktion



Papier



Offshore



Minen

Energie

Erneuerbare Energien

- Spannungsumrichter für PV und Wind

HGÜ-Stromnetze

- Klassik-Thyristoranlagen
- Voltage sourced converter, d. h. selbstgeführte HGÜ auf IGBT-Basis

Industrie

Frequenzumrichter für

- Stationäre Anlagen
- Schweißeinrichtungen
- Diverse Leistungselektronikanwendungen etc.

Mobilität

Bahn

- Frequenzumrichter für Bahnantriebe
- Bahnstromversorgung

E-Mobilität

- Frequenzumrichter für den Antriebsstrang
- Ladesysteme

Medizintechnik

- Diverse Leistungselektronikanwendungen

Forschung / Militär

- Diverse Leistungselektronikanwendungen



Distribution



E-Mobilität



Marine



Medizintechnik



Windkraft

3.2 Bauformen von PEC



Electronicon



Epcos



Ftcap



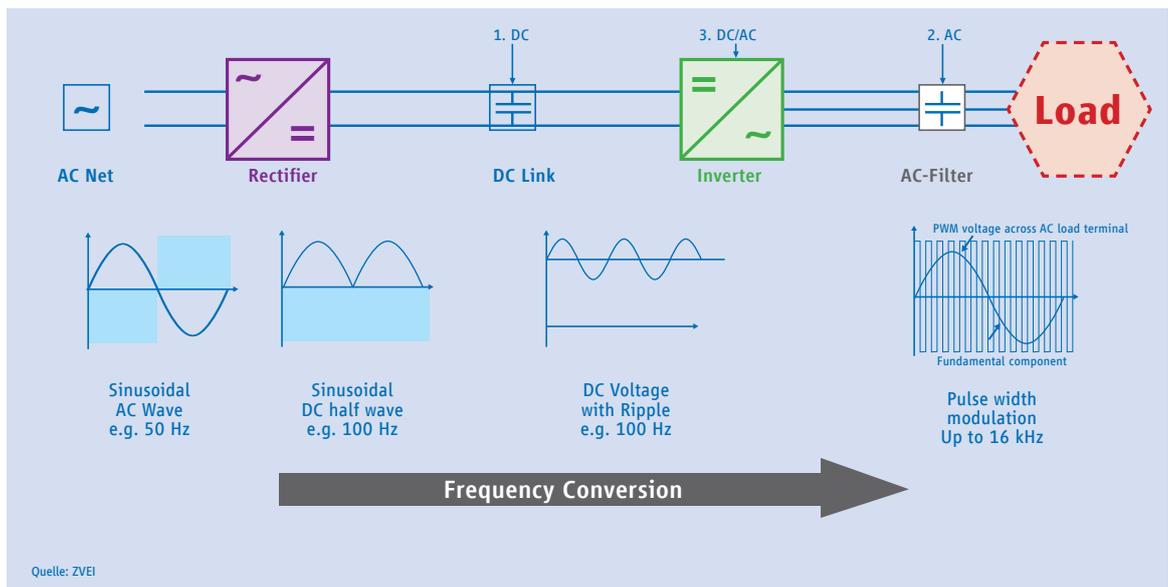
Kemet



Vishay

Abb. 7: Umrichter – Blockschaltbild

mit Beispielen für verschiedene Einsatzarten der Leistungselektronik-Kondensatoren



3.3 Anwendungsbereiche von PEC nach Art der elektrischen Beanspruchung

Im Folgenden werden wesentliche Anwendungsbereiche von Leistungselektronik-Kondensatoren, unterteilt nach der Art ihrer elektrischen Beanspruchung – wie Einsatzgebiet, Spannungsform und Verwendung –, dargestellt.

Tab. 2: Gliederung Haupteinsatzfälle, strukturiert nach Spannungsform und Verwendung

DC-Anwendungen	AC-Anwendungen
<ul style="list-style-type: none"> • Zwischenkreiskondensatoren (DC-Link) • Saugkreise in Umrichtern (DC-Filter) • VSC-HGÜ-Speicherkondensatoren 	<ul style="list-style-type: none"> • AC-Ein- und Ausgangsfilter • Beschaltungs- / Bedämpfungskondensatoren • Kommutierungskondensatoren • Resonanzkreise
<ul style="list-style-type: none"> • Impulserzeugung 	

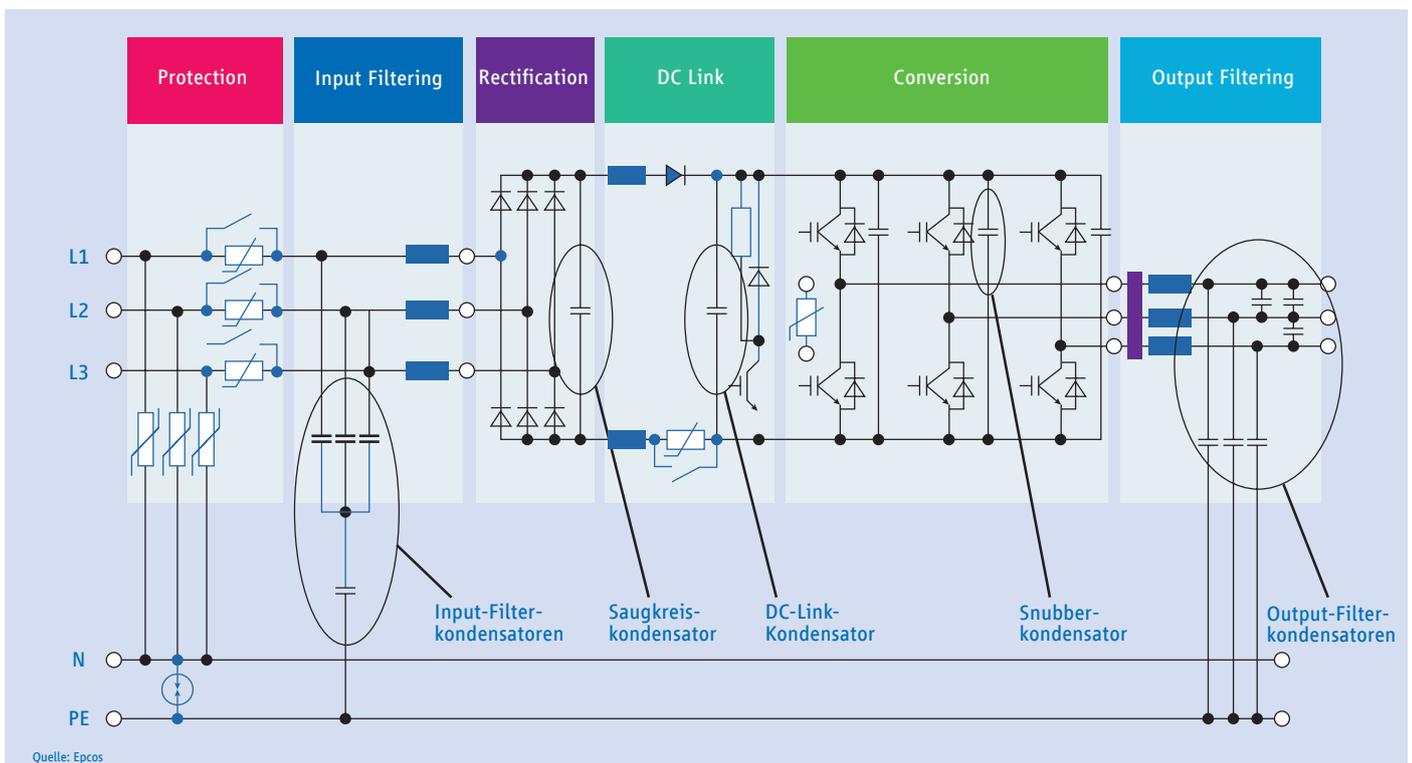
Quelle: ZVEI

In der folgenden Abbildung werden die wesentlichen Anwendungsbereiche der PEC in einem Frequenzumrichter beispielhaft dargestellt.

Es wird schematisch unterschieden nach DC, AC und Mischbelastungen aus DC und AC. Eine detaillierte Bewertung der konkreten Anwendung und ihrer Spezifika kann hierbei jedoch nicht erfolgen.

Abb. 8: Umrichterdesign – Blockschaltbild

Typische industrielle Umrichter



Quelle: Epcos

4. DC-Anwendungen der Leistungselektronik

4.1 Stand der Technik / Techniktrend allgemein

Abb. 9: Stand der Technik 2016

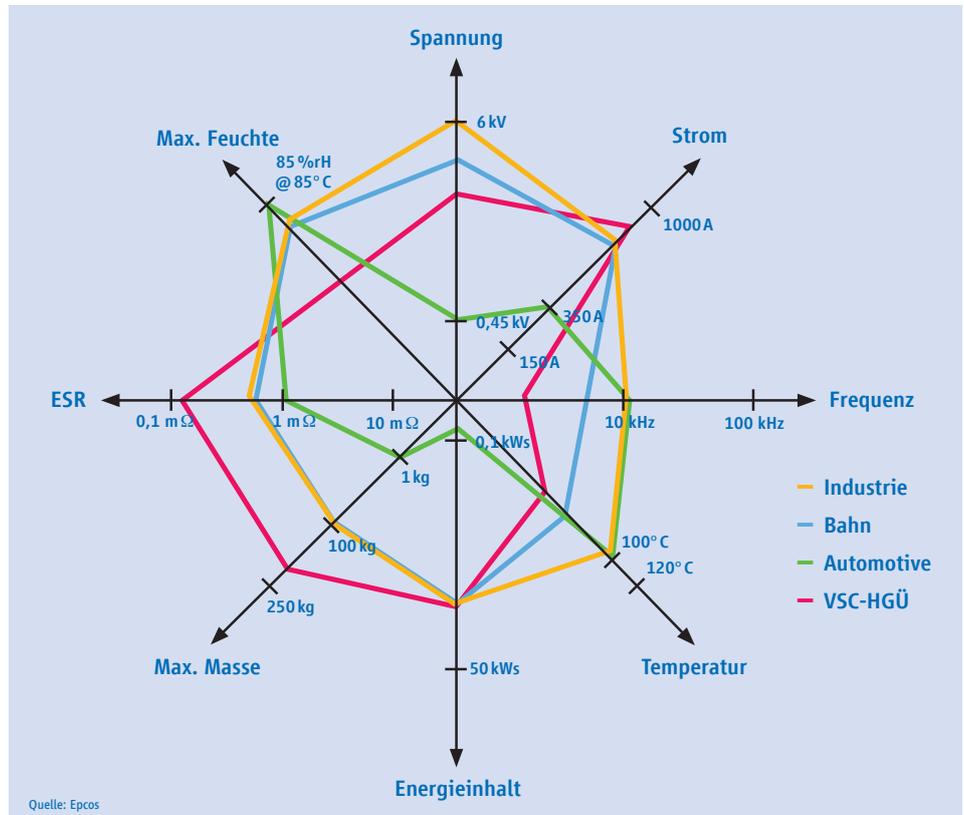
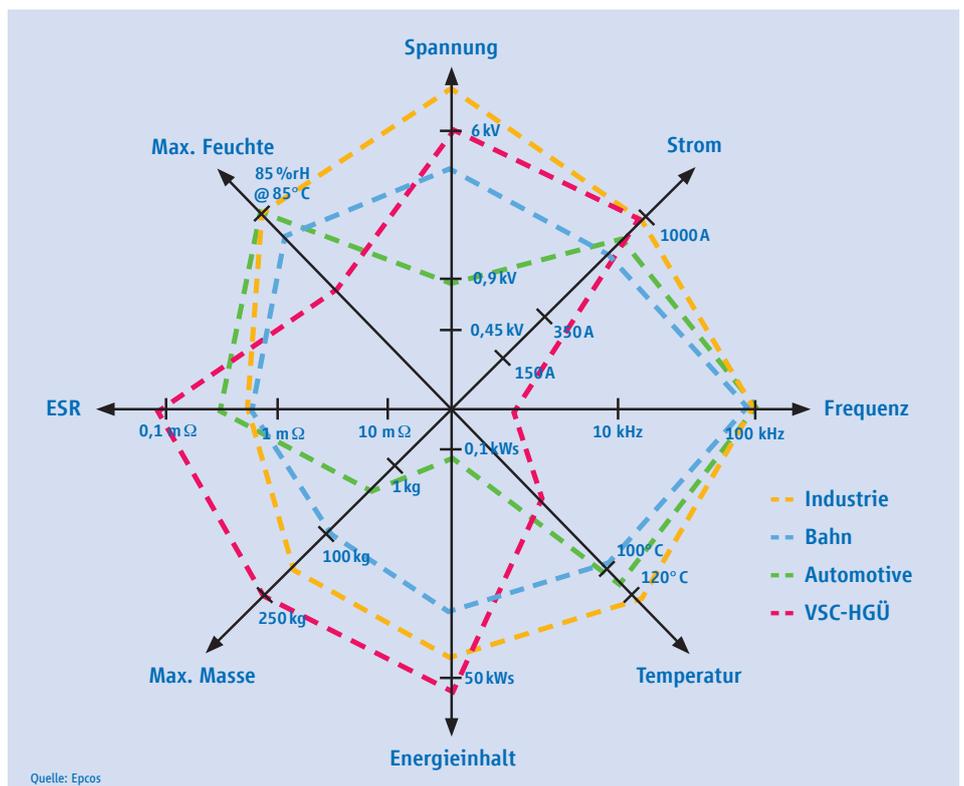


Abb. 10: Techniktrend 2021



Die beiden Abbildungen 9 und 10 zeigen für die vier PEC-Hauptabnehmersegmente Industrie, Bahn, Automotive und VSC-HGÜ wesentliche physikalische Spezifikationen der MKP-Leistungselektronik-Kondensatoren für das Jahr 2016 und die zu erwartenden Werte für das Jahr 2021.

Dargestellt sind die jeweils schärfsten Anforderungen in der entsprechenden technischen Kategorie. Es ist deutlich zu erkennen, dass entscheidende Entwicklungen bezüglich der Frequenzen bei Industrie, Bahn und auch im Automotive-Bereich zu erwarten sind. Im Bereich Industrie werden höhere Spannungs- und Stromanforderungen zu berücksichtigen sein.

Der Trend bei VSC-HGÜ-Anwendungen geht immer weiter in Richtung höherer Energieinhalte, was im engen Zusammenhang mit einer Volumen- bzw. Gewichtszunahme der Kondensatoren steht. Daraus ergeben sich unweigerlich auch neue Anforderungen bezüglich der Erhöhung der Energiedichten der Einzelkomponenten.

4.2 Technologieentwicklung

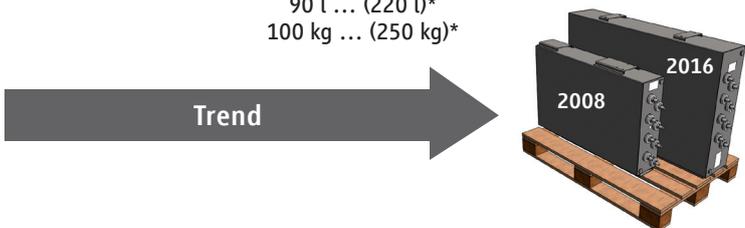
4.2.1 Umrichter: Technologie- und Marktumfeld Leistungselektronik-Kondensatoren

- **Trend Umrichterentwicklung**
 - Kleiner & leichter
 - Höhere Leistungsdichte
 - Kostengünstiger
 - Höhere Temperatur-/Feuchteanforderungen
- **Halbleiterentwicklung ist und bleibt Technologietrendsetter**
 - Thyristor >> GTO >> IGBT >> sind die Treiber für die Kondensatoren
 - Neue Halbbrückenmodule reduzieren die Kommutierungsinduktivität um 80 Prozent. Für den Zwischenkreis sind neue Konzepte gefragt, um das Potenzial dieser neuen Module auszuschöpfen.
 - Neue Halbleitertechnologien (GaN, SiC)
 - Schaltfrequenzen bis ca. 100 kHz, extreme Steilheit der U-/I-Anstiege, (max. 3–5 nH parasitäre Induktivitäten erlaubt)
- **Kondensatorentwicklung findet synchron zur Halbleiterentwicklung statt**

Die folgende Übersicht in Tabelle 3 gibt einen Überblick über wesentliche technische Kennwerte von PEC und vermittelt, wer die Treiber für eine Weiterentwicklung der technischen Anforderungen sind.

Es werden die zu erwartenden Trends in Tabelle 3 dieser wesentlichen technischen Anforderungen genannt, ergänzt mit der Tabelle 4 zur Historie wichtiger Kondensatoreigenschaften. In Tabelle 3 ist zu erkennen, dass die neuen Halbleitertechnologien auf SiC- und GaN-Basis einen wesentlichen Treiber für die Technologieentwicklung bezüglich Frequenz und Temperatur darstellen.

Tab. 3: Wichtige Kennwerte und deren Entwicklung bei DC-Leistungselektronik-Kondensatoren

	Wertebereich	Treiber
Typ. Spannungsebenen für DC-Anwendungen	400 V _{DC} – 700 V _{DC} – 1.000 V _{DC} – 2.000 V _{DC} – 4.000 V _{DC} – 6.000 V _{DC} ...	HGÜ
Typ. Umgebungstemperaturen	55 °C – 70 °C – 85 °C – 100 °C – 120 °C ...	Automotive neue Halbleiter SiC/GaN
Effektivströme für DC-Anwendungen	10 A – 25 A – 100 A – ... 1.000 A	VSC-HGÜ
Eigeninduktivität	100 nH – ... <10 nH (Treiber: neue Halbleiter SiC/GaN)	neue Halbleiter SiC/GaN
Schaltfrequenzen/ Harmonische	1,2 kHz – 3 kHz – 9 kHz – 12 kHz – 16 kHz – ... >100 kHz	neue Halbleiter SiC/GaN
ESR	10 mOhm – 2 mOhm – ... < 1 mOhm	VSC-HGÜ und Automotive
Max. Energieinhalte	10 kW _s – >55 kW _s	VSC-HGÜ
Max. Volumen/Masse	90 l ... (220 l)* 100 kg ... (250 kg)* 	VSC-HGÜ

Quelle: ZVEI

* Allgemeine Sicherheitshinweise Starkstromkondensatoren
<https://www.zvei.org/verband/fachverbaende/fachverband-starkstrom-kondensatoren/allgemeine-sicherheitshinweise-starkstromkondensatoren>

4.2.2 Umrichter: Technologietrends Leistungselektronik-Kondensatoren

- **Höhere Schaltfrequenzen und komplexere Stromspektren**
 - Geringerer ESR und niedrigere Eigeninduktivität
 - Eigenresonanzen der Kondensatoren werden künftig stärker stimuliert!
 - Tendenz zu geringeren Kapazitätswerten bei höherer Strombelastung
- **Tendenz zu höheren Spannungen**
- **Höhere Umgebungstemperatur bzw. stärkere thermische Kopplung mit dem HL**
- **Geeignet für eine höhere mittlere Jahresfeuchte (bis 85 Prozent – Wunsch)**
- **Reduzierung des Volumens: Erhöhung der Energiedichte (Wunsch)**
- **Maximierung der Kondensatoren im SVC-HGÜ-Bereich wegen hoher Speicheranforderungen und hoher Betriebsströme (gesp. Energie pro Becher)**
- **Zum Teil extreme Anforderungen hinsichtlich mechanischer Toleranzen und zulässiger Drehmomente an Terminals**
- **Reduzierung der Kosten: Kondensatoren höherer Leistungsdichte, standardisierte Bauformen**
- **Beherrschbares und abrufbares/detektierbares Lebensdauerende (Wunsch)**
- **Umweltaspekt: trockene Kondensatoren; SF₆ frei, Berücksichtigung der Anforderungen aus RoHS, REACH etc.**

Tab. 4: Technologieentwicklung DC-Kondensatoren Historie / Trend 2021

	1996–2000	2000–2003	2004–2007	2008–2011	2011–2016	2016–2021
Dielektrikum	Polypropylen (PP)	PP	PP	PP	PP	PP + neue Materialien
Spezifischer Energieinhalt	300 Ws/l	350 Ws/l	450 Ws/l	500...550 Ws/l	500...550 Ws/l	500...550 Ws/l
Elektrode	Zn/Al-Metallisierung selbstheilend	Zn/Al-Metallisierung selbstheilend	Zn/Al-Metallisierung selbstheilend	Zn/Al-Metallisierung selbstheilend	Zn/Al-Metallisierung / Al-Metallisierung selbstheilend	Zn/Al-Metallisierung / Al-Metallisierung selbstheilend
Füllmittel	trocken, Harz, Pflanzenöl, N ₂	trocken, Harz, Pflanzenöl, N ₂	trocken, Harz, Pflanzenöl, N ₂	trocken, Harz, Pflanzenöl, N ₂	trocken, Harz, Pflanzenöl, N ₂	trocken, Harz, Pflanzenöl, N ₂
Gehäuse	Metall, Kunststoff	Metall, Kunststoff	Metall, Kunststoff	Metall, Kunststoff	Metall, Kunststoff	Metall, Kunststoff
Sicherung	Überdruck-Sich. Drucksensor Segmentierung	Überdruck-Sich. Drucksensor Segmentierung	Überdruck-Sich. Drucksensor Segmentierung/ Metallisierung			
Ø Spezifisches Gewicht/ [g/Ws]	100 %	80 %	60 %	40...50 %	40...50 %	40...50 %
Max. Energieinhalt	bis 8 kW	bis 12 kW	bis 16 kW	bis 20 kW	bis 30 kW	bis 55 kW
Max. Volumen	50 l	70 l	70 l	80 l	120 l	220 l
Max. Gewicht	55 kg	65 kg	75 kg	90 kg	135 kg	250 kg*
Umweltanforderungen			RoHS-Bleifrei!	RoHS-Bleifrei!	RoHS/REACH	RoHS/REACH
Max. Temperatur	85°C	85°C ...95°C	85°C ...105°C	85°C ...105°C	85°C ...105°C	85°C ...125°C

Quelle: ZVEI

* Allgemeine Sicherheitshinweise Starkstromkondensatoren
<https://www.zvei.org/verband/fachverbaende/fachverband-starkstrom-kondensatoren/allgemeine-sicherheitshinweise-starkstromkondensatoren>

4.3 Anwendungsbereiche von PEC

Leistungselektronik-Kondensatoren werden in den verschiedensten Anwendungsbereichen wie Automotive, Industrie, Bahn und Energie – hier insbesondere den HGÜ-Anlagen – eingesetzt. Auf den folgenden Seiten werden die zu erwartenden schärfsten Anforderungen an die Kondensatoren je nach Anwendungsbereich für die verschiedenen Parameter wie Strom, Spannung, Frequenz, Volumen, Energieinhalt, ESR und andere bis zum Jahr 2021 im Vergleich zum Jahr 2016 dargestellt.

4.3.1 Automotive

Der Bereich Automotive zeigt bereits heute eine deutliche Dynamik hinsichtlich Veränderungen, die in den kommenden Jahren noch zunehmen wird. Der Übergang von konventionellen Verbrennungsantrieben zu Elektroantrieben wird weiter fortschreiten. Dabei spielt die Reduzierung des Schadstoffausstoßes der Fahrzeugflotte eine entscheidende Rolle. Die Klimaziele zur Reduzierung von Feinstaub, Kohlendioxid und Stickoxid fordern in diesem Sektor die technische Innovation.

Leistungselektronik-Kondensatoren werden in den Zwischenkreisen der Inverter oder in DC-DC-Konvertern eingesetzt. Sie kommen somit in reinen Elektroantrieben, in Hybridantrieben, aber auch in Brennstoffzellenantrieben zum Einsatz. Derzeit bieten fast alle namhaften Hersteller Fahrzeuge mit diesen Antrieben als Prototypen, aber auch als Serienfahrzeug an. Zur Absicherung der Mobilität wird das Ladesäulennetz weiter vergrößert. Eine flächendeckende Versorgung, angepasst an die Reichweite der Fahrzeuge, ist notwendig. Auch hier kommen Leistungselektronik-Kondensatoren zum Einsatz.

Anwendungen

• Leistungsumrichter

- Hybrid electrical vehicle (HEV)
- Plug in electrical hybrid vehicle (PEHV)
- Electrical vehicle (EV)
- Micro hybrid vehicle (MHV)
- Fuel cell (FC)

• Laden

- Ladesäulen (Stationär, Onboard)
- Induktives Laden

• Induktives Laden

- Kleine Kapazitäten mit hoher Stromtragfähigkeit
- Hohe C-Konstanz (Frequenzstabilität im Schwingkreis)
- Hohe Temperaturanforderungen wegen hoher Leistungsdichte
- Hohe Arbeitsfrequenz (> 50 kHz)
- Folienkondensatoren aus PP bei Verwendung spezieller Kühlsysteme
- Bedarf an Hochtemperaturkondensatoren

Fazit: Keramikkondensatoren oder alternative Dielektrika

Abb. 11: Automotive

Zwischenkreiskondensator in einer Umrichteranwendung – Trend 2016–2021

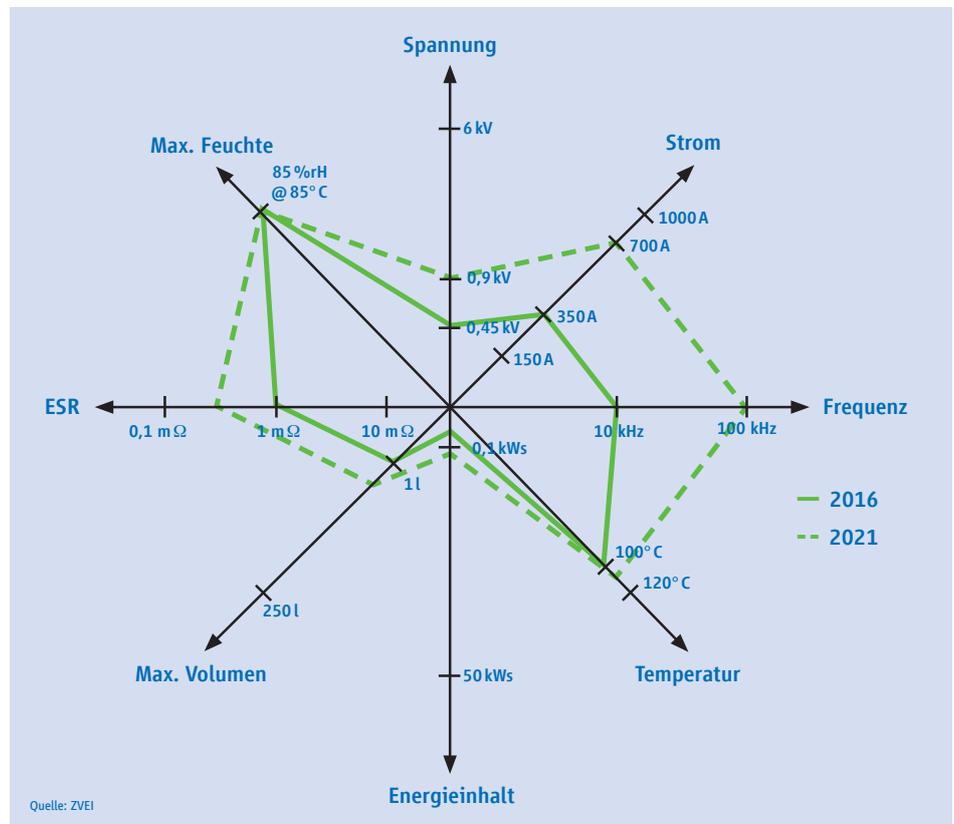
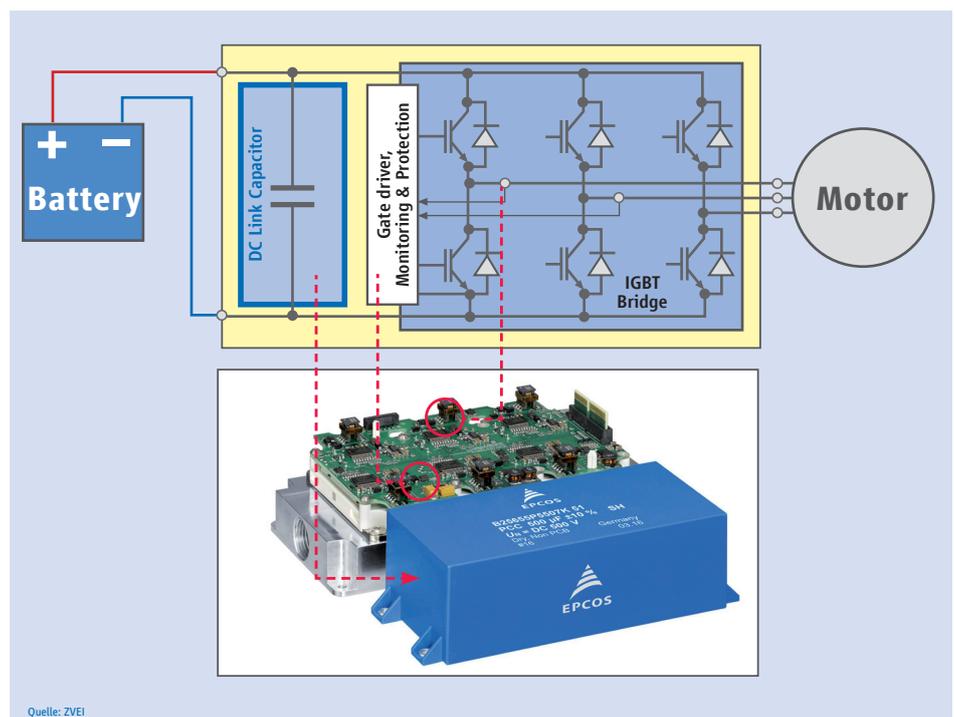


Abb. 12: Automotive

Zwischenkreiskondensator in einer Umrichteranwendung – Schaltbild



Tab. 5: Technologietrend HEV/EV (Antriebsstrang)

	HEV 2016	HEV 2021	EV 2016	EV 2021	Einheit	Trend
Temperatur Umgebung	110	120	90	120	°C	↗
Strom	150	100–450	350	450–700	A	↗
Spannung	450	450–900	450	450–900	V	↗
Frequenz	10	20–40	10	20–40	kHz	↗
ESR	1	0.5	1	0.5	mOhm	↘
Volumen	0,5@450V	0,8@900V	1,0@450V	1,6@900V	l	↗
Energieinhalt	50	120	50	120	Ws	↗
ESL	Interaktion Busbar-Kondensator					↘

Quelle: ZVEI

Fazit

- Film-Technologietrend: Foliendicke < 2 µm für 450 V
- IGBT >> SiC: höhere Schaltfrequenz

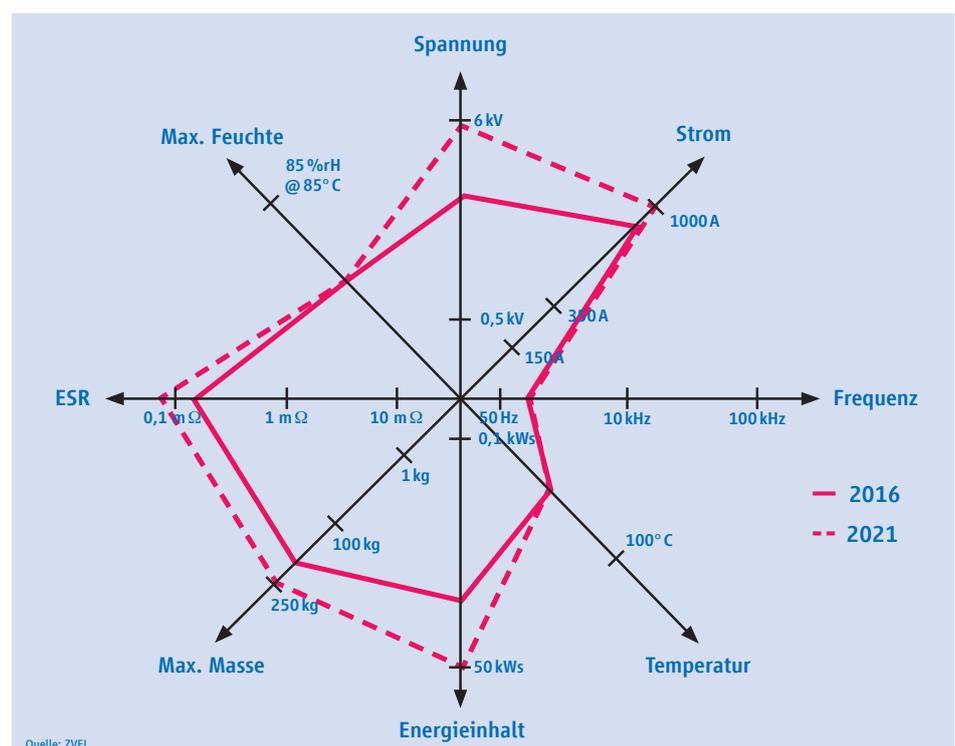
4.3.2 VSC-HGÜ

Anwendungsschwerpunkt

- **HVDC-Speicherkondensator**
 - Die Kondensatoren nehmen bezüglich der Kosten eine besondere Position im Umrichter ein.
 - Umrichter in Multilevel-Topologie haben generell einen großen Bedarf an verbauter Kapazität, das heißt, bei einer ungünstigen Kostenkonstellation könnte diese prinzipiell vorteilhafte Technologie gegenüber anderen zurückfallen.

Abb. 13: VSC-HGÜ

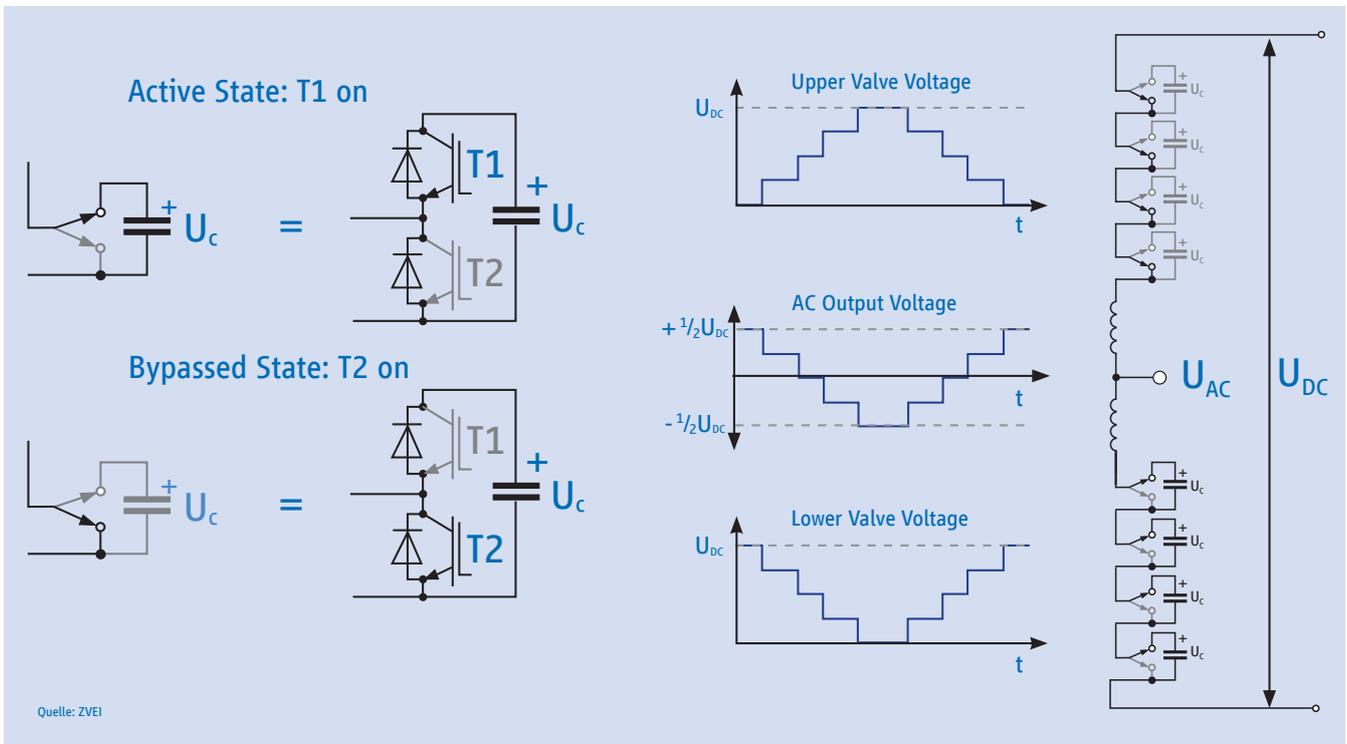
HVDC-Speicherkondensatoren in einer Multilevel-Umrichter-Anwendung – Trend 2016–2021



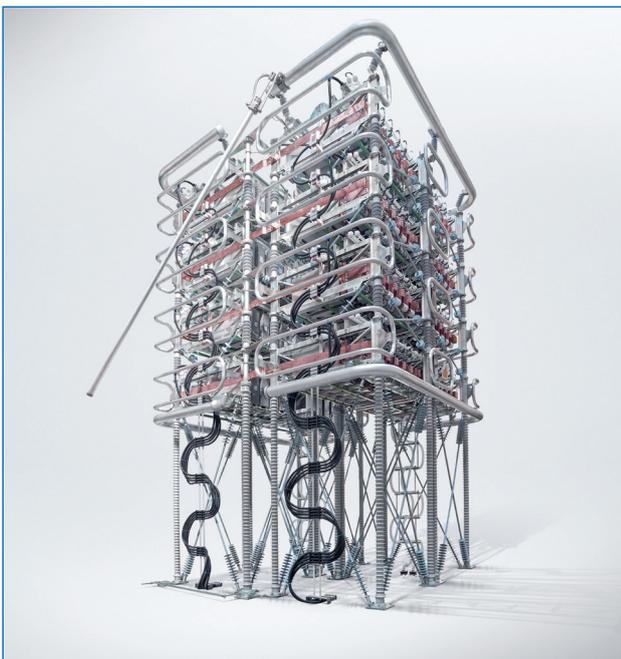
Quelle: ZVEI

Abb. 14: VSC-HGÜ

HVDC-Speicherkondensatoren in einer Multilevel-Umrichter-Anwendung



HVDC-Speicherkondensator



Quelle: Siemens, Konverterturm Siemens HVDC PLUS®

Trend

- Erhöhung der Energiedichte
- Verringerung der Verluste
- Überwachungseinrichtung zur Erkennung von Fehlern im Kondensator
- Generelle Leistungssteigerung / Kapazitätserhöhung
- Kostenreduzierung

Tab. 6: Technologietrend HVDC-Speicherkondensator

	2016	2021	Einheit	Trend
Temperatur Umgebung	45	60	°C	↗
Strom	~700	>1000	A	↗
Spannung	~3	~4...6	kV	↗
Frequenz	<1	<1	kHz	=
ESR	0.2	<0.1	mOhm	↘
Volumen	120	220	l	↗
Energieinhalt	30	55	kWs	↗
Masse	135	250*	kg	↗

Quelle: ZVEI

* Allgemeine Sicherheitshinweise Starkstromkondensatoren <https://www.zvei.org/verband/fachverbaende/fachverband-starkstrom-kondensatoren/allgemeine-sicherheitshinweise-starkstromkondensatoren>

4.3.3 Bahn

Im Bereich Traktion erwartet man eine deutliche Entwicklung zu höheren Temperaturen und Frequenzbereichen. Die hohen Schaltfrequenzen der neuen HL-Technologien stellen die Komponenten bezüglich der Eigeninduktivität vor neue Herausforderungen. Die Eignung für bestimmte klimatische Bedingungen (z. B. eine mittlere Jahresfeuchte von 85 Prozent) ist eine bereits gestellte Anforderung an die Kondensatoren. Der Wunsch nach der Möglichkeit eines detektierbaren Lebensdauerendes wird in Zukunft bei der Entwicklung der DC-Kondensatoren eine weitere Rolle spielen.

Schwerpunkte aktuell

- Temperaturfestigkeit
- Energiedichte
- Kosten senken €/Joule
- Sicherheit, Lebensdauerende

Schwerpunkte mittelfristig

- Aufbautechnologie mit geringer Induktivität
- Feuchtemodell
- Neue Basismaterialien (ϵ_r)

Fazit

Siliziumkarbid ist im Hochvoltbereich angekommen, es fehlen noch die kostengünstigen, niederinduktiven Leistungskondensatoren dazu!

Abb. 15: Bahn

Zwischenkreis-/Saugkreiskondensatoren – Trend 2016–2021

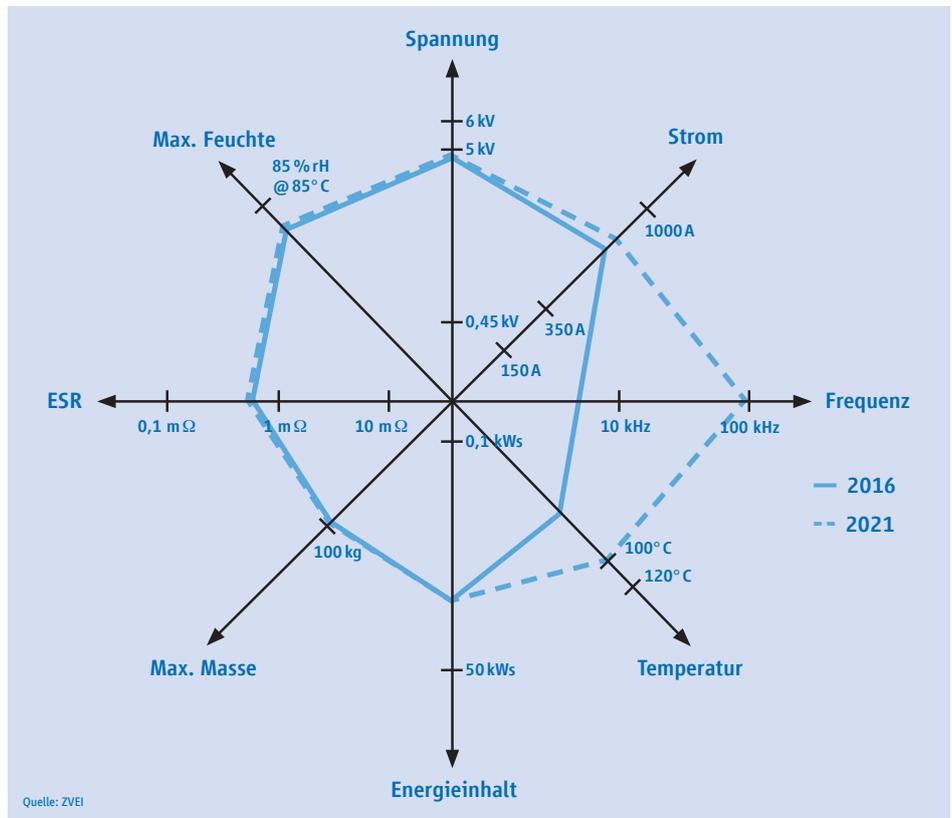


Abb. 16: Bahn

Anwendungsschwerpunkt – DC-Kondensatoren

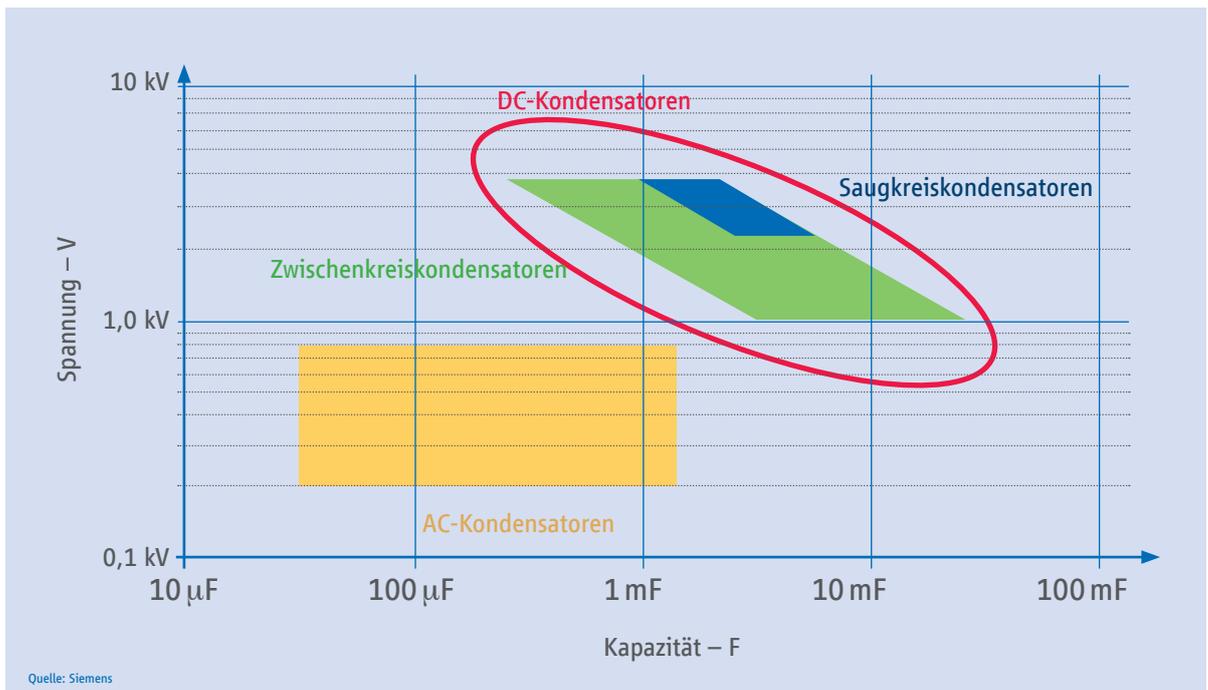
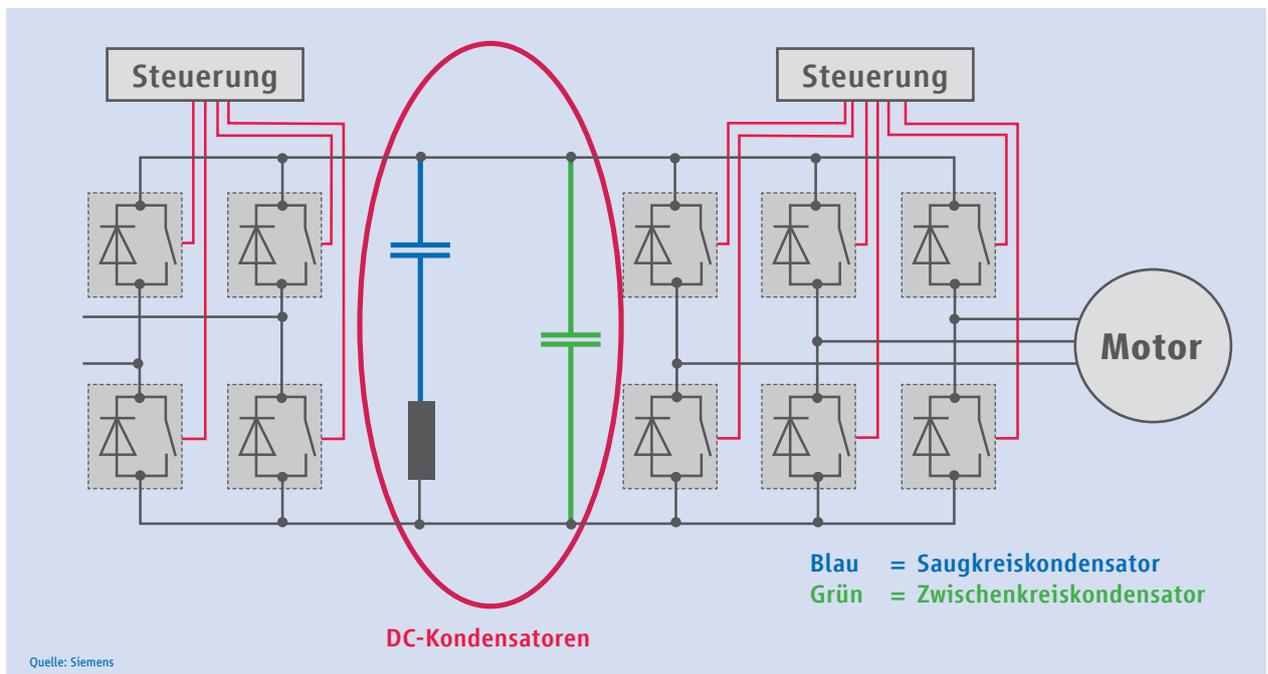


Abb. 17: Bahn

Zwischenkreis-/Saugkreiskondensatoren – Trend 2016–2021



Tab. 7: Bahn

Zwischenkreis-/Saugkreiskondensatoren – Traction

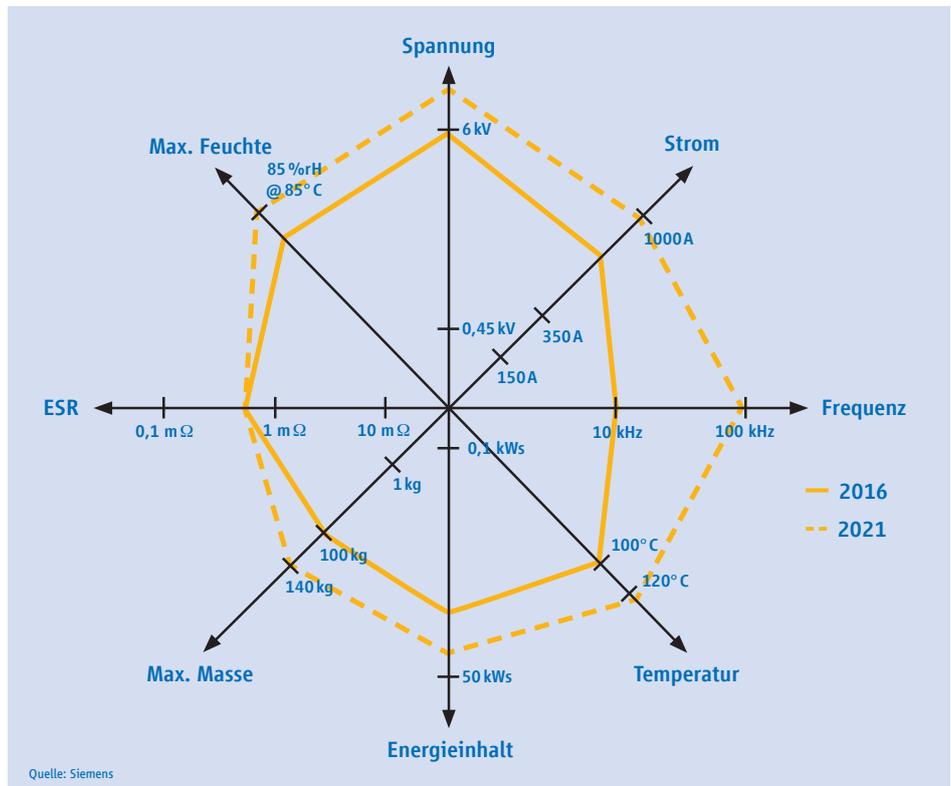
	2016 Si	2021 Si	2021 SiC	Einheit	Trend
Umgebungs- temperatur	70	70	>>70	°C	↗
Strom	bis 430	>450	300	A	↗ (Si)
Spannung	~3	~4	~3	kV	↗ (Si)
Frequenz	2	2	>50	kHz	↗
Eigen- induktivität	100	<30	<<10	nH	↓
ESR	0,8	0,8	0,8	mOhm	=
Masse	100	100	100	kg	=
Energieinhalt	30	30	30	kWs	=

Quelle: ZVEI

4.3.4 Industrie

Für den Bereich Industrie erwartet man eine breite Entwicklung in allen Bereichen. Vor allem die Parameter Frequenz und Temperatur zeigen einen starken Trend zu höheren Werten. Auch hier, wie bei der Bahn, stellen die Treiber für Frequenz und Temperatur die neuen Halbleitertechnologien auf SiC- und GaN-Basis dar. Die klimatischen und mechanischen Anforderungen werden sich in Zukunft ebenfalls anspruchsvoller entwickeln.

Abb. 18: Industrie
DC-Kondensatoren – Trend 2016–2021



Tab. 8: Industrie
Technologietrend DC-Kondensatoren

	2016	2021	Einheit	Trend
Umgebungstemperatur	100	120	°C	↗
Strom	bis 430	bis 1000	A	↗
Spannung	6	>6	kV	↗
Frequenz	10	100	kHz	↗
ESR	0,8	0,8	mOhm	=
Masse	100	140	kg	↗
Energieinhalt	30	40	kWs	↗

Quelle: ZVEI

Nachdem auf den zurückliegenden Seiten die DC-Anwendungen in der Leistungselektronik für die Bereiche Automotive, Bahn, Industrie und Energie (HGÜ-Anlagen) vorgestellt wurden, wird im folgenden Kapitel auf die AC-Anwendungen eingegangen.

Die richtige Auslegung der Kondensatoren auf die jeweiligen Anwendungsbereiche AC oder DC führt zu einsatzoptimierten Lösungen.

Am Markt befinden sich auch universelle Folienkondensatoren, die für beliebige Spannungsformen (AC und DC) geeignet sind. Aufgrund der großen Vielfalt an Einsatzbereichen von Kondensatoren in AC-Anwendungen wird im folgenden Kapitel nur auf ausgewählte Beispiele eingegangen.

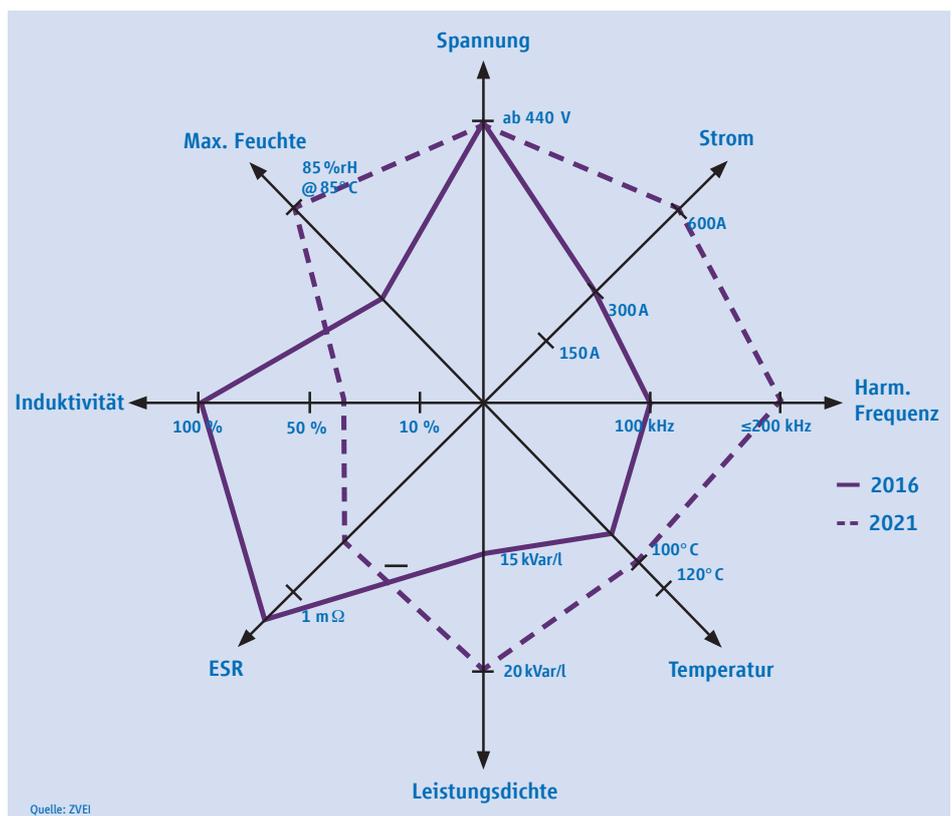
5. AC-Anwendungen der Leistungselektronik

Kondensatoren für AC-Anwendungen werden oft in der gleichen Baugruppe wie Kondensatoren für DC-Anwendungen verbaut. Allerdings unterscheiden sich bei beiden Anwendungen die jeweiligen Belastungsprofile: Während die Kondensatoren für DC-Anwendungen innerhalb der Schaltung die Aufgabe der Glättung und Energiespeicherung übernehmen, sind die AC-Kondensatoren in Anwendungen mit sinus- und nicht sinusförmigen Spannungsverläufen meist für das Filtern von bestimmten Frequenzanteilen verantwortlich. Darüber hinaus werden auch Kommutierungs-, Beschaltungs- und Bedämpfungskondensatoren (Snubber) sowie Resonanzkreiskondensatoren je nach Anwendungsbereich eingesetzt.

5.1 Technische Anforderungen an Filterkondensatoren

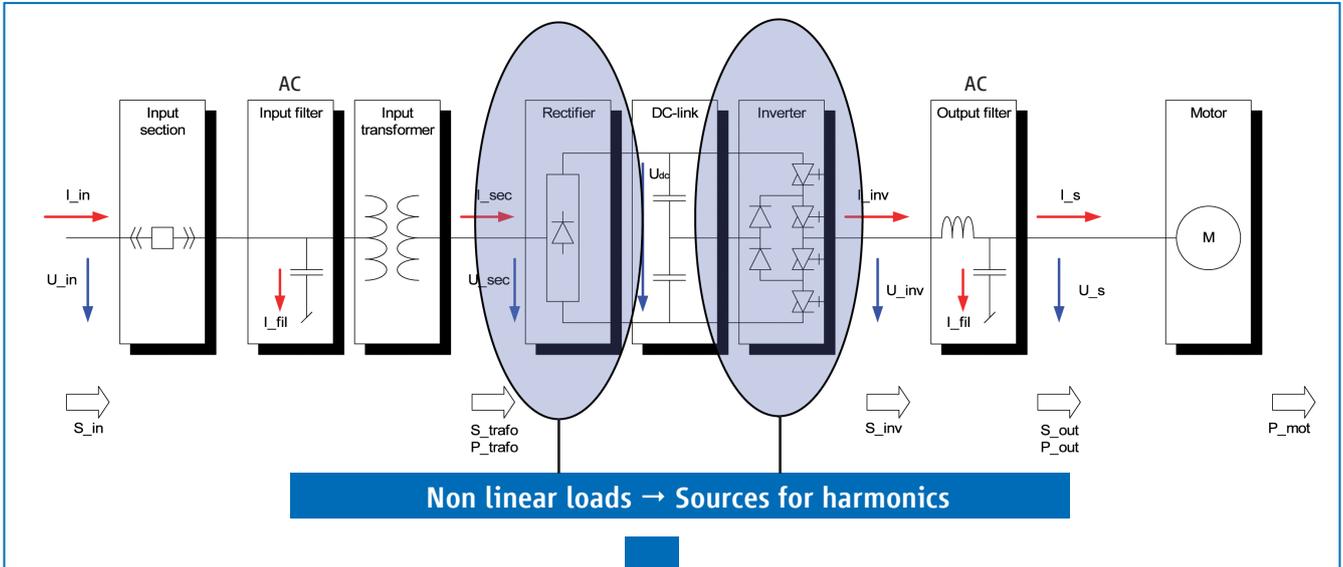
- Höhere harmonische Frequenzen
- Dielektrische-/Stromwärmeverluste bedingen eine erhöhte Temperaturfestigkeit
- Erhöhte Leistungsdichte
- Reduzierte Kosten
- Steigende Umwelt-/Testanforderungen (Feuchte-Modell gewünscht)
- Exzellente Qualität / lange Lebensdauer
- Skalierbare Größen (Baukasten)
- Interne Schutzmaßnahmen, Sicherheit (Verhalten bei Ende der Lebensdauer)
- Trockene Kondensatoren (keine flüssigen Füllstoffe)
- Erhöhte Temperatur, reduzierter Temperaturkoeffizient und erhöhte Energiedichte bedingen die Suche nach neuen Materialien. Damit steht die Eignung der MKP-Technologie für einige der zukünftigen Anforderungen infrage.

Abb. 19: Filterkondensatoren (Input, Output) – Trend 2016–2021

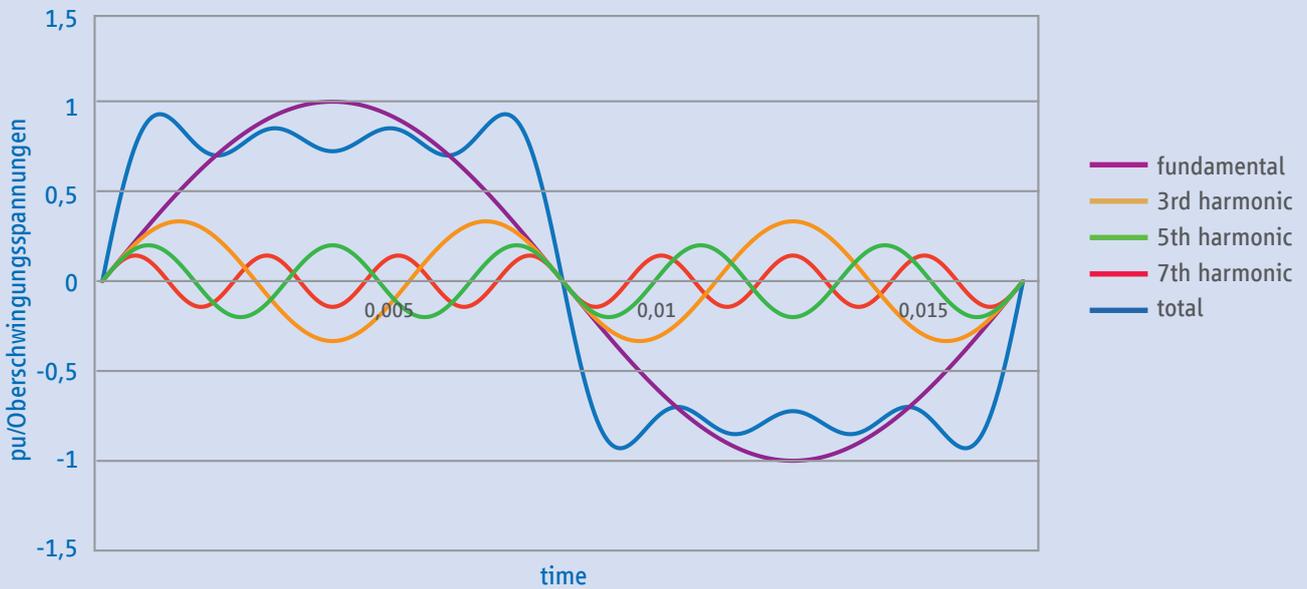


5.2 Verwendung von Filterkondensatoren

Abb. 20: Filterkondensatoren (Input, Output) – Blockschaltbild eines Umrichters



Harmonics – Example



Quelle: ABB

5.3 Typen von Filterkondensatoren

Abb. 21: Snubberkondensatoren – Trend 2016–2021

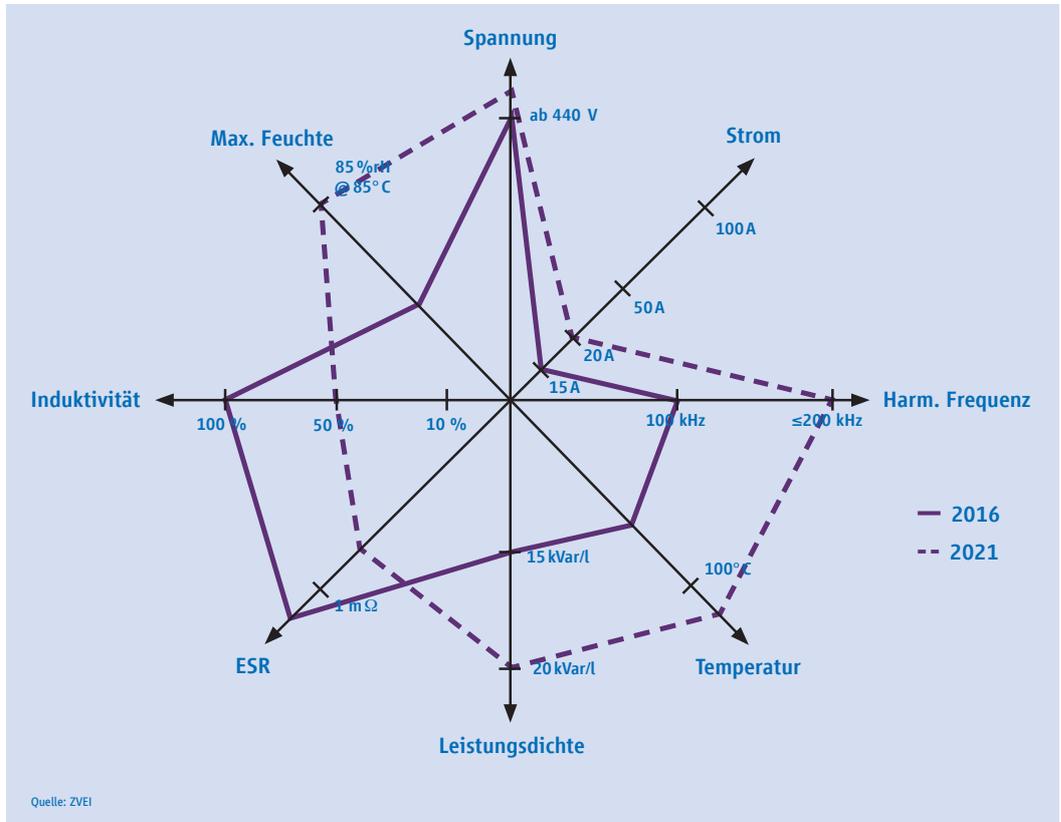


Abb. 22: Kommutierungskondensatoren – Trend 2016–2021

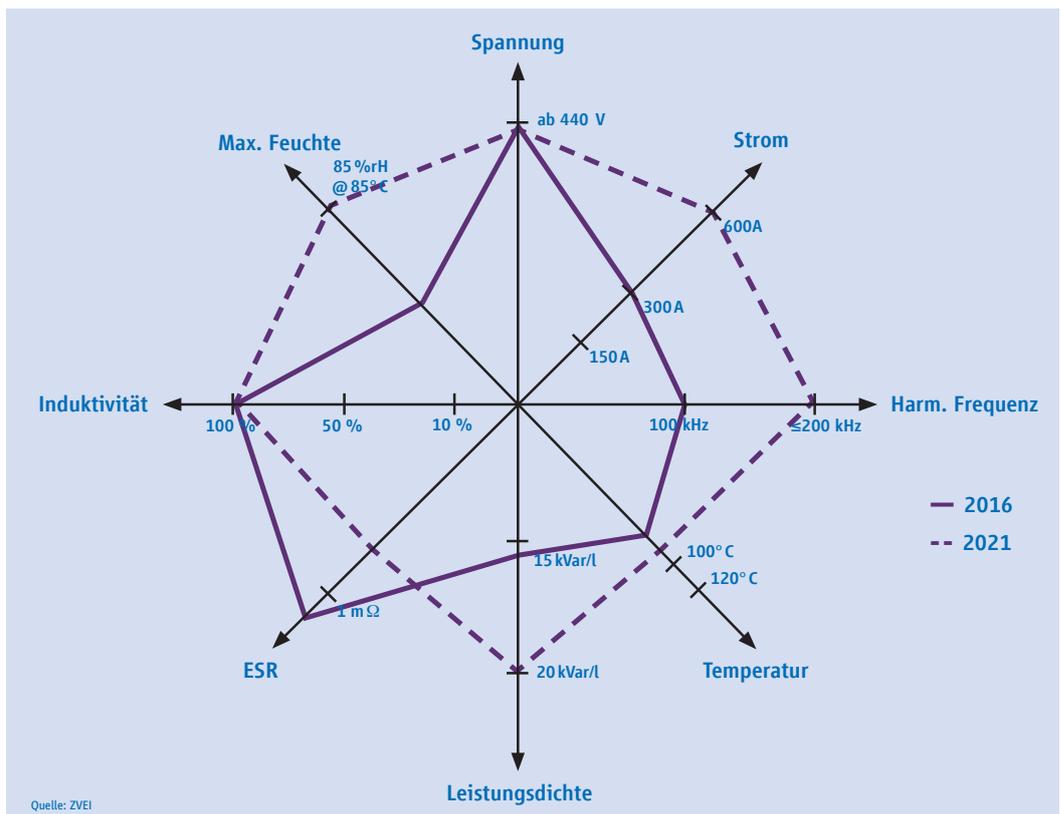
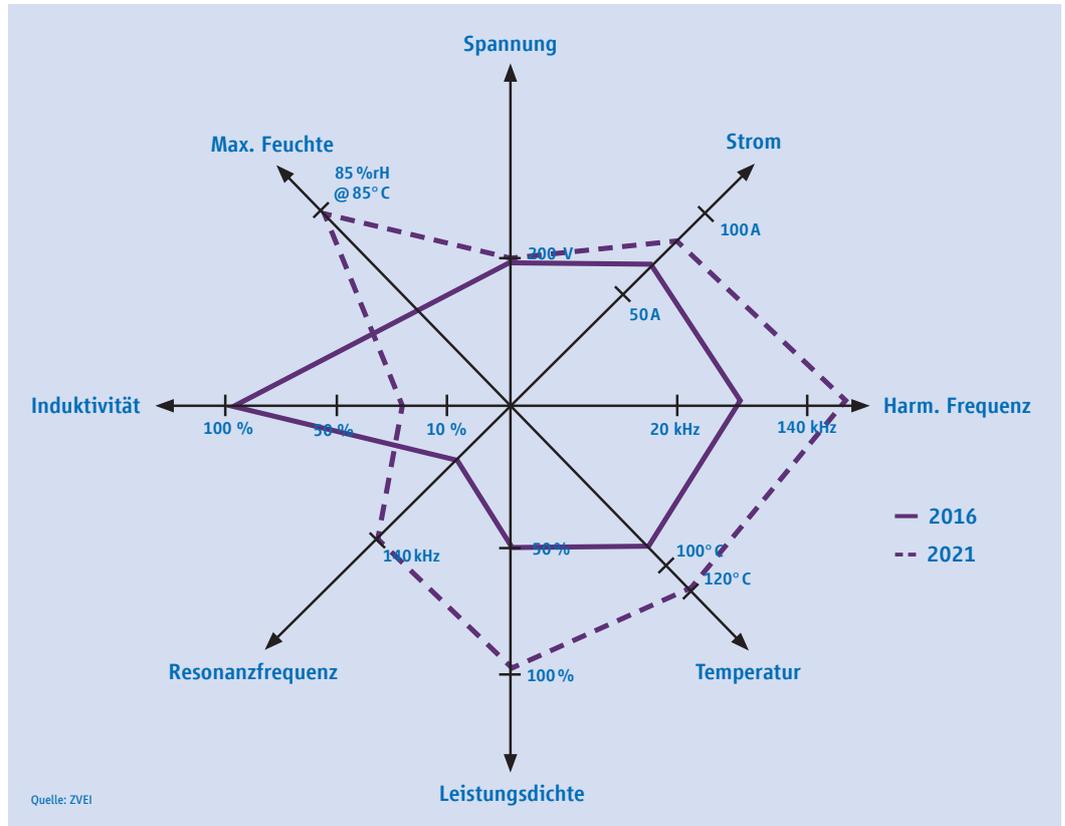


Abb. 23: Resonanzkreiskondensatoren – Trend 2016–2021



Weitere Bauformen von PEC



Electronicon



Electronicon



Epcos



Epcos



Ftcap



Kemet



Vishay



Vishay

6. Schlusswort

Die Leistungselektronik-Kondensatoren sind von hoher Bedeutung für die Verwirklichung zukünftiger Technologietrends. Das betrifft zum einen die technische Umsetzung der aus den neuen Leistungshalbleitermaterialien SiC und GaN gegebenen Impulse, aber auch die aus der weiteren Erschließung neuer Anwendungsbereiche herrührenden Anforderungen.

Von den Umwälzungen betroffen sind praktisch alle Einsatzbereiche von Kondensatoren in MKP-Technologie, sowohl in AC- als auch in DC-Anwendungen. Auch die permanent notwendigen Anpassungen an Veränderungen, die durch die E-Mobilität, die Energiewende mit ihren zunehmend dezentralen Erzeugungsanlagen und durch andere Erneuerungsprozesse gefordert werden, sind Treiber für eine neue Generation von PEC.

Neue Kondensatormaterialien sind kurzfristig jedoch nicht in Sicht. Es ist zwingend erforderlich, die technischen Grenzen der eingesetzten Materialien genau zu kennen und die Leistungsdichte und Zuverlässigkeit weiter zu erhöhen.

Eine enge Zusammenarbeit entlang der Lieferkette ist unbedingt erforderlich, um den Herausforderungen zu begegnen und die Wettbewerbsfähigkeit der ZVEI-Mitglieder zu erhalten bzw. zu stärken. Die Einbeziehung der Kunden in den Entwicklungsprozess zu einem möglichst frühen Zeitpunkt ist unabdingbar.

PEC stellen auch weiterhin eine wesentliche Komponente leistungselektronischer Baugruppen und Systeme dar. Die in kompakter Form gegebenen Informationen dienen einem generellen Überblick und sollen Anregung geben, sich den künftigen Anforderungen zu stellen.

7. Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
BOPP	Biaxial orientiertes Polypropylen
EDLC	Electric double layer capacitor
E-Mobilität	Elektromobilität
EN	Europäische Norm
ESL	Ersatzinduktivität
ESR	Equivalent Series Resistance
EV	Electrical vehicle
ϵ_r	Relative Permittivität
FC	Fuell cell
GaN	Galliumnitrid
GTO	Gate turn off
HEV	Hybrid electrical vehicle
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HL	Halbleiter
HVDC	High voltage direct current
IEC	International electrotechnical commission
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
JIS	Japan industrial standard
MKP	Metallisierter Kunststoff Polypropylen
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
PEC	Power electronic capacitor
PEI	Polyetherimid
PEN	Polyethylenaphthalat
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
PV	Photovoltaik
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SF ₆	Schwefelhexafluorid
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals
RoHS	Restriction of hazardous substances
Si	Silizium
SiC	Siliziumkarbid
SPS	Syndiotaktisches Polystyrol
UL	Underwriters Laboratories
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VSC	Voltage sourced converter
Zn	Zink



ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.

Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-0

Fax: +49 69 6302-317

E-Mail: zvei@zvei.org

www.zvei.org