

Versagensgründe für Isolationen (Auswahl)

Die Durchschlagspannung in Datenblättern gibt dem Ingenieur an, bei welcher Spannung ein Isolationsmaterial versagt. Verschwiegen wird dabei, dass dieser Wert nur im „Neuzustand“ Gültigkeit besitzt.

Für die Prüfung dieses Durchschlages durch den Isolationswerkstoff hindurch wird meistens ein Spannungsanstieg von 500V/Sek verwendet. Die Durchschlagspannung wird dann normiert auf die Dicke als z.B. kV/mm angegeben.

Doch dieser Wert verringert sich im Laufe der Einsatzzeit immer mehr. Eine Vielzahl von Faktoren ist daran beteiligt, die Isolationsfähigkeit eines Werkstoffes negativ zu beeinflussen. Darum reicht es je nach Anwendung auch nicht, den einzelnen Einflussfaktor zu betrachten. Man muss vielmehr die Summe aller Belastungen im konkreten Fall zusammengefasst in ihren Auswirkungen berücksichtigen.

Im Folgenden soll mit dem Schwerpunkt auf Isolationsfolien versucht werden, anhand der am häufigsten vorkommenden Belastungsarten einen Eindruck zu gewinnen, worauf man achten sollte:

1. Temperatur

Ganz allgemein kann festgestellt werden: umso höher die Temperatur, desto stärker werden u.a. korrosive und oxidative Einflüsse der Umgebungsluft wirksam. Oder noch allgemeiner gesagt erhöht sich mit steigender Temperatur die Geschwindigkeit der Alterung, wobei die meisten Prozesse der sogenannten Arrhenius-Kurve gehorchen.

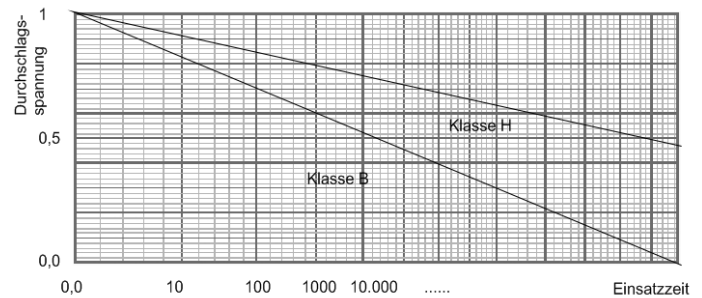
Als Faustregel aus der Elektronik rechnet man vereinfacht mit einer Halbierung der Lebensdauer je 10°C Temperaturerhöhung.

Isolationsmaterialien werden über Normen wie die IEC 60085 in Wärmeklassen (z.B. B=130°C, F=155°C, H=180°C) eingeteilt. Diese Klassen geben an, bei welcher Dauergebrauchstemperatur die Isolationsmaterialien nach 20.000 Stunden noch 50% der Durchschlagspannung haben, die sie im Neuzustand hatten.

Etwas anders formuliert bedeutet dies, dass ein Material nach nur zweieinhalb Jahren Einsatz bei maximaler erlaubter Temperatur die Hälfte seiner Schutzfunktion gegen einen elektrischen Schlag eingebüßt hat.

Will man also bei einer gegebenen Arbeitstemperatur eine höhere Lebensdauer erzielen, setzt man ein Isolationsmaterial einer höheren Wärmeklasse ein. Das übliche End-life-Kriterium der „halbierten Durchschlagspannung“ wird auf diese Weise viel später erreicht.

Erreichen der halben Durchschlagspannung (UI746) bei 130°C Dauereinsatztemperatur



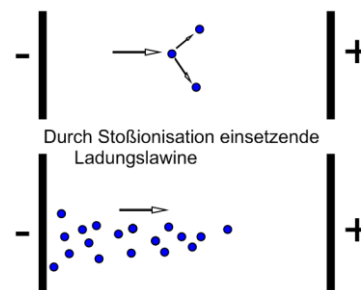
Bezüglich der maximal auftretenden Wärme sollte man u.a. auch Wärmestaus innerhalb von Wicklungen, höchste mögliche Umgebungstemperatur sowie ggf. gelegentlich auftretende Fehlfunktionen mit in die Betrachtung aufnehmen.

Andere Werkstoffe wie Formmassen, Lacke und Tränkmittel, die als Isolation eingesetzt werden, können durch Wärme verspröden, schrumpfen oder Spannungsrisse bekommen. Auch Bewitterung lässt zusammen mit Wärme diese Werkstoffe früher versagen.

2. Spannung (Stress, Teilentladung)

Bereits ab 400V entsteht Corona-Entladung. Dabei werden durch die entstehende Feldstärke freie Elektronen soweit beschleunigt, dass sie weitere Ladungsträger aus ihrer stabilen Position schleudern. Es entwickelt sich eine Ladungsträgerlawine, die dann in eine Teilentladung (Corona; Gleitentladung) mündet.

In großen Anlagen (Motoren, Generatoren, Verteiltransformatoren) kann man halbleitende Materialien einsetzen, um diese Gleit- und Glimmentladung so weit wie möglich zu vermeiden. Auch wird so das elektrische Feld geformt, damit keine Feldlinienspitzen entstehen können.

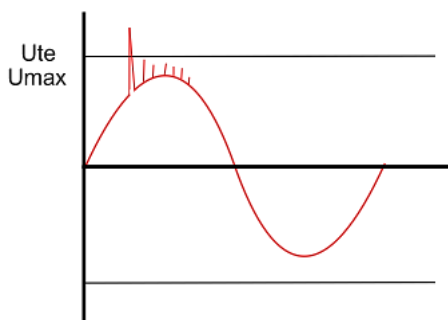


In Gerätestromkreisen moderner Geräte wie Netzgeräten, Filterkomponenten und Powermodulantrieben kommt es vermehrt zu sich wiederholenden Impulsen (Schaltimpulse). Sie haben kurze Anstiegszeiten und Scheitelspannungen deutlich über dem Nennwert der Versorgungsspannung.

Diese energiereichen Impulse lassen Isolationssysteme auf andere Weise altern wie unter herkömmlicher, netzfrequenter Wechsellspannung:

- Teilentladungen zerstören die Isolation durch aggressive Abbauprodukte, UV-Strahlung und Ozon
- Elektromechanische Ermüdung auf Grund der Stromimpulse
- Dielektrische Erwärmung wegen der hochfrequenten Anteile der Spannungsimpulse

Selbst wenn die Nennspannung unterhalb der TE-Einsatzspannung liegt, können solche überlagerten Impulse Teilentladungen zünden. Dabei beeinflussen die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Impulsform, -polarität und -wiederholungsrate wesentlich die Degradationsgeschwindigkeit der Werkstoffe.



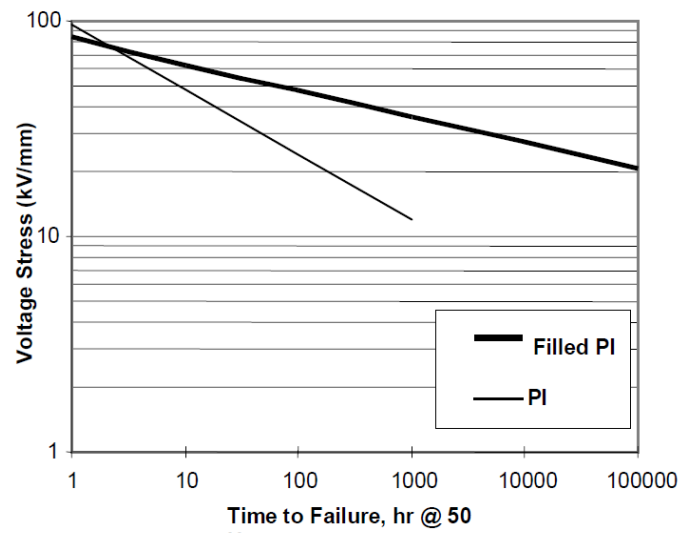
Getriggert TE-Einsatz durch Überspannungsimpuls auch unter TE-Einsatz

Ein ausreichender Abstand zur TE-Verlöschungsspannung ist also immer ratsam. Diese erreicht man – neben konstruktiven Maßnahmen - durch Verwendung ausreichend spannungsfester, sprich „dicker“ Isolationen.

Das widerspricht allerdings den Anforderungen nach möglichst wenig Isolationsmaterial innerhalb von Transformatoren und Generatoren. Denn nur die „Eisen-„ und Kupferanteile in einem Transformator sind elektrisch wirksam.

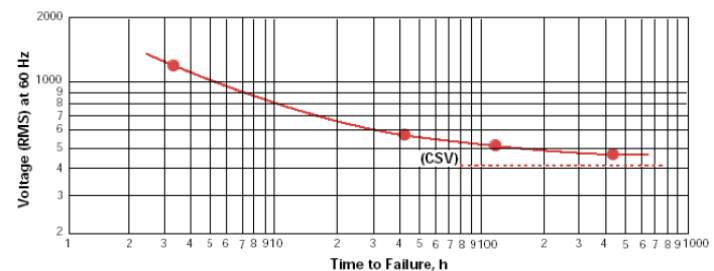
Kann man die Gefahr von Teilentladungen nicht ausschließen, verwendet man Materialien, die besonders TE-beständig sind. Dazu gehören alle anorganischen Isolationsstoffe wie Glas, Keramik oder der Naturstoff Glimmer (Mica). Sie werden von Coronaentladungen nicht geschädigt, weswegen z.B. Nomex® mit Micamehl gefüllt wird, um eine erhöhte Coronabeständigkeit in Hochspannungsmaschinen (Generatoren, Motoren) zu erreichen.

Bei kleineren Baugrößen empfiehlt sich der Einsatz von Kapton® CR oder Fluorpolymere wie z.B. FEP. Bei Kapton® CR wird die TE-Beständigkeit durch die Zugabe von anorganischen Werkstoffen in die Polymermasse drastisch erhöht. Fluorpolymere bestehen durch ihre geringe Reaktivität, haben jedoch andere Nachteile (Dehnbarkeit, Kaltfluß).



Lebensdauer-Unterschied zwischen Kapton HN und Kapton CR bei Teilentladungsbelastung

Wie bei den Betrachtungen zu dem Einfluss der Temperatur gilt auch hier, dass der Einsatz einer höherwertigen Folie (also z.B. statt Class B eine Class F Folie, Kapton® CR statt Kapton® HN oder 50µm statt 25µm Folienstärke) den Zeitpunkt der Zerstörung deutlich verschiebt. Die Spannungsfestigkeit bleibt im Dauerbetrieb länger oberhalb der Spannung, bei der Teilentladungen einsetzen.



Corona Starting Voltage (CSV) = 425 V

Dauer, bis Kapton unter Spannungsstress die TE-Einsatzspannung erreicht

In der IEC 60343 (Recommended test methods for determining the relative resistance of insulating materials to break-down by surface discharges; ähnlich aber nicht gleich ASTM 2275) wird die Testanordnung so gewählt, dass ein Ausfall der Proben zwischen 100 Stunden und 1000 Stunden liegt. Aus den Ergebnissen kann man dann die Zeit bis zum Ausfall bei geringerer

Spannungsbelastung interpolieren. Eine weitere interessante Norm zu dem Thema ist die DIN IEC/TS 61934 (Elektrische Messung von Teilentladungen (TE) bei sich wiederholenden Spannungsimpulsen mit kurzer Anstiegszeit).

Die Vermeidung von Teilentladungen im Isolationspaket bleibt jedoch trotz verbesserter Isolationsmaterialien oberstes Gebot bei der Auslegung von elektrischen Betriebsmitteln. Das bei solchen Coronaentladungen entstehende UV-Licht, die aggressiven Abbauprodukte sowie das reaktive Ozon beeinträchtigen ganz allgemein die umgebenden Materialien und nicht nur die direkt betroffene Folie.

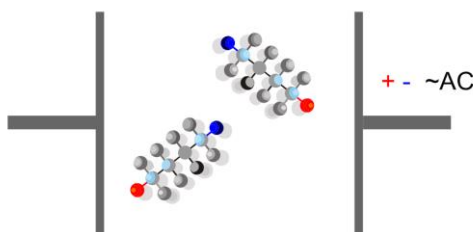
Anmerkung: die Messung der Höhe von TE in einem elektrischen Bauteil ist heute gängige Methode der Fertigungsüberwachung.

3. Frequenz

In sehr vielen „elektrischen“ Basisnormen wird normalerweise mit sinusförmiger Spannung bei 50Hz gemessen. Moderne Schaltnetzteile arbeiten jedoch mit bedeutend höheren Frequenzen. Dadurch steigt der Stress für das Isolationsmaterial.

Exkurs: Die elektrische Größe „Spannung“ macht eine Aussage über die Kraft, die notwendig ist, um eine Ladungseinheit zu bewegen. Und diese „Arbeit“ wird bei steigender Wechsel-Frequenz immer häufiger in das Isolationsmaterialien eingebracht. Es entsteht ein mechanischer Stress und „Reibungswärme“. Unpolare Werkstoffe wie Keramiken oder Glas sind davon wenig betroffen. Die organischen Isolationsfolien wie PE, PP, PET, PA, PI usw. sind jedoch mehr oder weniger polar.

Die komplexen Polymerketten bilden Dipole, die sich nach dem äußeren elektrischen Feld auszurichten versuchen. Es entsteht ein mechanischer Stress und materialintern „Reibungswärme“. Die Folge ist eine verringerte Spannungsfestigkeit.



Umpolarisierungsverluste In Isolationswerkstoffen

Bei dem Hochfrequenzschweißen macht man sich diese Umpolungsverluste im Material sogar zunutze, um den Kunststoff aufzuschmelzen (dipolartige Kunststoffe wie PVC, PA und Acetate; hohe dielektrische Verluste). Grob kann man sagen: je höher das angelegte elektrische Feld und je höher die Frequenz, umso mehr Wärmeenergie wird in das Material eingetragen.

Was beim Schweißen erwünscht ist, ist für eine Isolationsfolie im Dauereinsatz schädlich. Denn diese „innere“ Erwärmung bleibt häufig unbeachtet bei Alterungsbetrachtungen und wird über übliche Normmessungen (z.B. UL 746) nicht abgebildet.

Material	Frequenz	Dielektr. Verlustfaktor; (x10e-4)
PTFE	50 Hz	0,5
	1 MHz	0,7
PP	50 Hz	2,5
	1 MHz	3,5
PI	50 Hz	3
	1 MHz	11
PET	50 Hz	20
	1 MHz	210
PVC	50 Hz	120
	1 MHz	300
PA	50 Hz	3900
(luftfeucht)	1 MHz	1300

Übersicht einiger Isolationsstoffe und ihrer Verluste im elektrischen Wechselfeld bezog auf zwei verschiedene Arbeitsfrequenzen

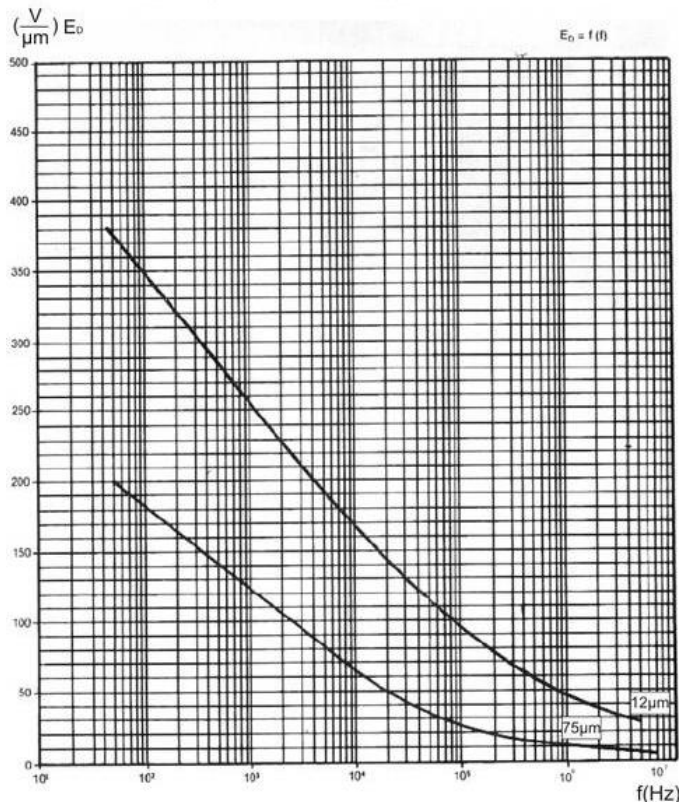
Frequenzrichter und Schaltnetzteile belasten heute Isolationen mehr als früher, denn Motoransteuerungen oder z.B. Computernetzteile verwenden pulsweiten-gesteuerte Spannungen im Bereich von 20 kHz und mehr.

Die dabei entstehenden Oberwellen haben Frequenzen bis weit über 15 MHz und es entstehen Spitzenspannungen weit oberhalb der Betriebsspannung.

Die hohen Schaltgeschwindigkeiten dv/dt belasten erheblich die verwendeten Isolationsmaterialien. Zusätz-

lich können Wellenreflektion, Stehwellen und Rückwirkungen aus dem gespeisten Gerät weiteren Stress für die Isolation bewirken.

Das folgende Diagramm stellt diesen Zusammenhang für die häufig verwendete Polyesterfolie dar:



Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Frequenz

Die Angabe der Durchschlagspannung für Elektroisierstoffe erfolgt in vielen Datenblättern bezogen auf eine Arbeitsfrequenz von 50/60 Hz sinusförmigen Stroms. Wie oben dargestellt, reagieren viele der Standardisulationsfolien bei höheren Frequenzen mit einer verringerten Durchschlagspannung.

Neben der Alterung durch Temperatur und die Schwächung des Materials durch Teilentladungen bestimmt also auch die Frequenz maßgeblich die Überlegungen zur Auslegung eines elektrischen Gerätes.

4. Verhalten bei Verschmutzung (Umwelt)

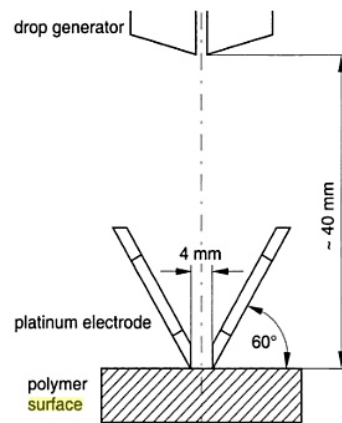
Werden Oberflächen von Isolierstoffen durch Feuchtigkeit und Staub verunreinigt, entstehen bei einsetzenden Gleitentladungen langsam aber sicher Leitpfade. Diese bestehen aus karbonisierten Überresten der Verschmutzung und dem zerstörten Isolationsstoff. Diese Leitpfade breiten sich meist in Verästelungen (treeing) immer weiter aus und können am Ende zum Versagen der Isolation führen.



Ausbildung eines leitfähigen Pfades auf oder in Isolationsmaterialien

Ein wesentlicher Aspekt dabei ist die mögliche Wasseraufnahme des Isolierstoffes, denn dadurch wird die Zerstörung auch innerhalb des Werkstoffes beschleunigt. Bestimmte Produkte, die mittels Polykondensation (z.B. Polyesterfolien) hergestellt werden, können bei Anwesenheit von Feuchtigkeit und Temperaturen ab 80°C sogar relativ schnell durch Hydrolyse geschädigt werden.

Um angeben zu können, wie leicht ein Werkstoff dazu neigt, auf der Oberfläche leitfähige Pfade auszubilden, verwendet man den sogenannten CTI-Wert. Der Comparative Tracking Index wird wie folgt gemessen: Zwei Elektroden werden auf die zu messende Oberfläche aufgelegt. Dazwischen wird eine leitfähige Salzlösung getropft und eine Spannung angelegt. Diejenige Spannung, bei der durch Überschläge die Oberfläche des Werkstoffes abgetragen wird, klassifiziert ihn dann in eine von 6 Stufen.

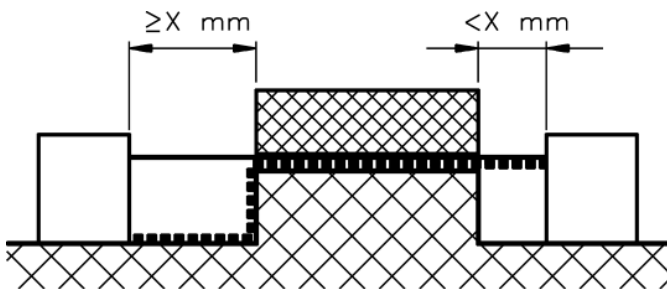


Messung des CTI-Wertes an Isolierstoffen

Diese besondere Kombination aus Gleitentladung und verschmutzter Oberfläche führt noch schneller wie tro-

ckene Teilentladungen zur Zerstörung des Isolationswerkstoffes. Besonders bei elektrischen Einrichtungen, die im Außenbereich mit der Möglichkeit zur Betauung eingesetzt werden, sind deswegen erhöhte Abstände vorgeschrieben (siehe u.a. IEC 61558)

5. Konstruktive Maßnahmen



Erhöhung von Luft- und Kriechstrecken zur Vermeidung von Alterungsbedingten Durchschlägen

Es gibt mehrere Möglichkeiten, um die elektrische Sicherheit auch nach Tausenden von Betriebsstunden sicherzustellen.

Die Erhöhung von Luft- und Kriechstrecken trägt wesentlich dazu bei, das bei gealtertem Isolationsmaterialien wegen der verringerten Spannungsfestigkeit etwas passiert. Daneben kann man zum Beispiel die Konstruktion fehlertoleranter gestalten. Relativ einfach und dennoch hochwirksam ist oft der Einsatz eines Isolationsstoffes der nächsthöheren Isolationsklasse. Die Zeit bis zum Versagen kann so normalerweise um mindestens das Doppelte erhöht werden.

6. Zusammenfassung:

Heutige Geräte werden unter der Maxime „kleiner, schneller, leistungsfähiger“ konstruiert. Entwickler versuchen durch möglichst kleine Isolationsabstände (bei erschwerter Entwärmung) und durch deutlich höhere Frequenzen diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Die Datenblattangaben von Isolierstoffen spiegeln den optimalen Wert der Isolationsfähigkeit unter standardisierten Bedingungen am Anfang der Einsatzzeit wieder.

Während des Betriebs beeinflusst Temperatur die Isolationsfolien durch beschleunigte Alterung / Versprödung und damit einhergehend verringerter Spannungsfestigkeit.

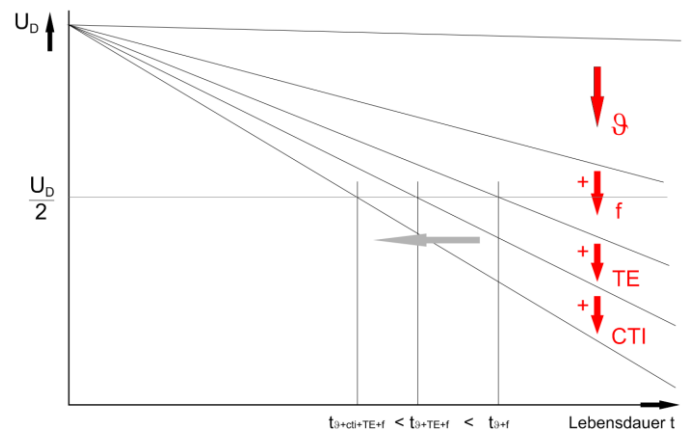
Hohe Spannung schädigt das Material z.B. durch Gleitentladungen und elektrischen Stress.

Bei höheren Frequenzen bricht die Spannungsfestigkeit besonders bei polaren Materialien stark ein.

Verschmutzungen und Feuchtigkeit können zur Ausbildung leitfähiger Pfade an der Oberfläche führen.

Für die sichere Auslegung eines elektrischen Gerätes ist es also notwendig, alle auftretenden Einflussgrößen in ihrer Wirkung aufzusummieren. Dabei betrachtet man idealerweise, welche Spannungsfestigkeit am Ende der Lebensdauerbetrachtung noch vorhanden sein muss. Und rechnet von da ausgehend, welches Material im Neugerät eingesetzt werden müsste.

Da aber die Summe der Einflussgrößen am konkreten elektrischen Bauteil meist weder rechnerisch noch durch Tests ermittelbar ist, helfen Bauteilnormen wie die IEC 61558, Materialnormen wie die UL 510 oder IEC 60674 und Normen zur Messung wie die IEC 61934 oder UL746 dabei, geeignete und praxiserprobte Lösungen zu finden.



Reduktion der möglichen Einsatzdauer durch Reduktion der Durchschlagsspannung aufgrund von Temperatur, Frequenz, Teilentladung (elektrischer Stress) und Umweltbedingungen

Sie haben die Idee, wir bringen sie auf die Folie

CMC Klebtechnik GmbH
Rudolf-Diesel-Straße 4 - 67227 Frankenthal

Tel. 0049/6233-872-356

www.cmc.de friederici@cmc.de