

# Fehlerschutz bei Anlagen und Geräten der Schutzklasse I

H. Tribius, Berlin

**Salopp gesagt besteht die Schutzwirkung bei Anlagen und Geräten der SK I darin, im Fehlerfall schneller abzuschalten, als jemand durch diesen Fehler sterben kann. Ein weit verbreiteter Irrtum bei der Anwendung der SK I lautet aber schlicht und falsch: „... der grün/gelbe Schutzleiter hat die Aufgabe, das Erdpotential auf die Körper (die Gehäuse) der Anlagen und Geräte zu bringen. Selbst wenn die Isolation versagt, kann nichts Schlimmes passieren ...“**  
**Leser, die diesen Irrtum auch gerade begehen wollten, sollten sich einladen lassen, den folgenden Beitrag zu lesen. Lassen Sie uns über einen solchen Fehlerfall im TN-System und anschließend im TT-System nachdenken.**

## 1 TN-System

Wir stellen uns eine korrekt angeschlossene Waschmaschine vor, die jedoch einen Isolationsfehler habe (satter Körperschluss). Die Bedienerin der Waschmaschine (nennen wir sie mal Mutter *Krause*) berühre das Metallgehäuse dieser Waschmaschine (derweil sie patriotisch – aber eben leider auch gut geerdet – auf heimatlichem Boden steht), siehe Bild 1.

Die Summe der Widerstände im Weg des Fehlerstroms (Trafo – L – PE – Trafo) nennt man den Schleifenwiderstand  $R_{SCH}$ . Er ist bei solide aufgebauten TN-Systemen stets sehr klein – wir gehen in unserem Beispiel einmal von 1  $\Omega$  und einer etwa symmetrischen Aufteilung von je 0,5  $\Omega$  auf den Widerstand des L ( $R_L$ ) und den Widerstand des PE ( $R_{PE}$ ) aus. Darauf kommt es aber – wie wir sehen werden – gar nicht so genau an. Es ergibt sich dann ein symmetrischer Spannungsteiler, der aus diesen beiden 0,5- $\Omega$ -Widerständen besteht. Die angenommenen Widerstandswerte sollen etwa die Kupfer- und Klemmenwiderstände von L- und PE-Leiter repräsentieren.

Unsere Mutter *Krause* habe einen Körperwiderstand ( $R_{MK}$ ) von etwa 1000  $\Omega$  (auch das muss für unsere Betrachtung nicht genau stimmen). Sie berühre das Gehäuse der Waschmaschine (das tut der PE übrigens auch), und sie berühre die Erde (das tut der PE übrigens auch).  $R_{MK}$  und  $R_{PE}$  sind also parallelgeschaltet. Eine Parallelschaltung von 0,5  $\Omega$  und 1000  $\Omega$  ergibt einen Gesamtwiderstand von wiederum etwa 0,5  $\Omega$ . Mutter *Krause* beeinflusst den Spannungsteiler folglich (leider !!!) überhaupt nicht. Es

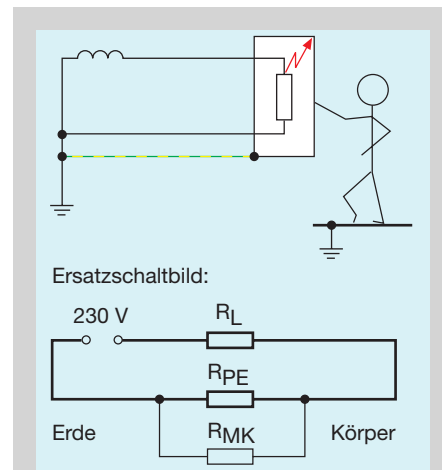
bleibt bei einer symmetrischen Spannungsaufteilung von je 115 V auf den Widerstand des L- und den Widerstand des PE-Leiters. Das heißt, auch Mutter *Krause* berührt zwischen dem Gehäuse der Waschmaschine und der Erde (bei korrekt angeschlossenem Schutzleiter!!) 115 V und erfährt eine Durchströmung mit

$$I_{MK} = \frac{115 \text{ V}}{1000 \Omega} = 115 \text{ mA}$$

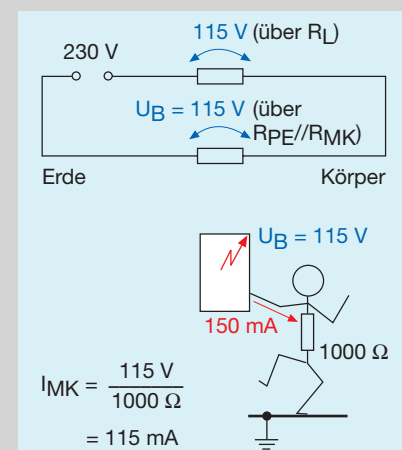
(Bild 2). Wir müssen uns nun fragen, welche Auswirkungen eine Durchströmung mit 115 mA hat. Dazu betrachten wir das Verträglichkeitsdiagramm (Bild 3). Es zeigt, welche Stromstärken bei welcher Einwirkdauer welche Wirkungen haben. Das Ergebnis ist erschreckend! Nach nur 100 ms muss mit gesundheitlichen Schädigungen gerechnet werden, und nach 500 ms (einer halben Sekunde !!!) ist man bereits im tödlichen Bereich.

1) Endstromkreise sind Stromkreise, in denen elektrische Energie umgesetzt wird oder umgesetzt werden kann (Steckdosenkreise und fest angeschlossenen Geräte gehören immer dazu).

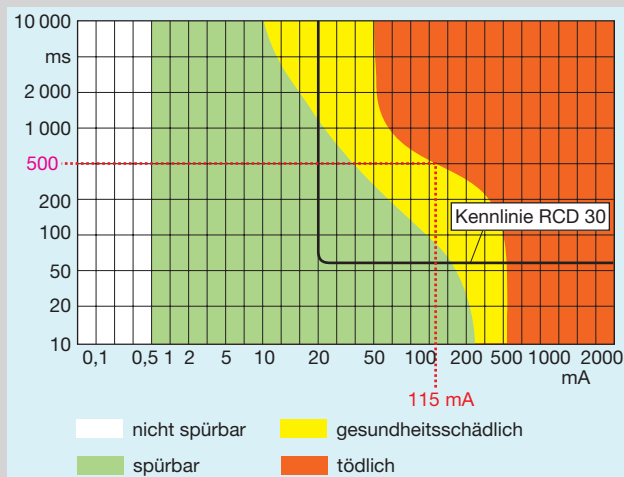
Freilich werden wir das Andenken an Mutter *Krause* stets in Ehren halten – aber man kann (nein, man muss!!!) viel mehr für sie tun! DIN VDE 0100 Teil 410 (darin geht es um Schutzmaßnahmen) verlangt, dass Endstromkreise<sup>1)</sup> mit einer Leiter-Erde-Spannung von 230 V so gestaltet, geprüft



1 Isolationsfehler einer Waschmaschine  
 a) Installation im TN-System  
 b) Ersatzschaltbild



2 Auftretender Körperstrom



3 Verträglichkeitsdiagramm

Autor  
 Dipl.-Ing. Hinrich Tribius ist freier Fachjournalist, Berlin.

und betrieben werden, dass sie im Fehlerfall in spätestens 0,4 s abschalten.

Die Abschaltung im Fehlerfall ist bei richtiger Dimensionierung eine gute und sehr bewährte Schutzmaßnahme. Bei einer Abschaltzeit von 0,4 s trauen wir uns allerdings bis auf 0,1 s an den tödlichen Bereich heran. Bereits ein geringer Mess-, Rechen-, Betrachtungs- oder Dimensionierungsfehler hätte fatale Folgen und darf nicht passieren!! Das sichere Beherrschen dieser Zusammenhänge gehört zum unverzichtbaren Handwerkszeug jeder Elektrofachkraft.

In fünf Schritten kann nachgewiesen werden, ob die Abschaltung durch das verwendete Überstrom-Schutzorgan schnell genug erfolgt. Für das o. g. Beispiel bedeutet dies:

### Schritt 1: Messung des Schleifenwiderstands $R_{SCH}$

Wir messen mit einem Anlagen-Prüfgerät den Schleifenwiderstand  $R_{SCH}$ . Das Prüfgerät schickt dazu über die Fehlerschleife L-PE einen Prüfstrom und ermittelt (über die Spannungsänderung zwischen L und PE) die Summe aller Widerstände in der Fehlerschleife (Bild 4).

**Praxisbeispiel:** Es würde ein Wert von  $1 \Omega$  angezeigt werden.

### Schritt 2: Berechnung des theoretischen Fehlerstroms $I_{F1}$

Der theoretische Fehlerstrom  $I_{F1}$  errechnet sich nach dem Ohmschen Gesetz aus der Leiter-Erde-Spannung  $U_0$  und dem Schleifenwiderstand  $R_{SCH}$ :

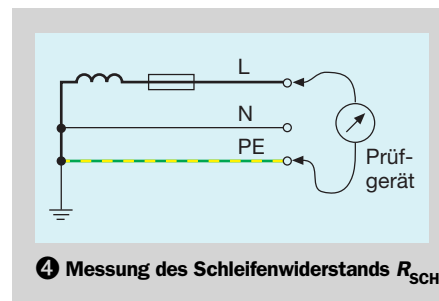
$$I_{F1} = U_0 / R_{SCH}$$

(Die meisten Prüfgeräte geben diesen Fehlerstrom gleichzeitig mit dem Schleifenwiderstand über das Display aus – seine Berechnung erübrigt sich dann.)

**Praxisbeispiel:**  $I_{F1} = 230 \text{ V} / 1 \Omega = 230 \text{ A}$

### Schritt 3: Berechnung des korrigierten Fehlerstroms $I_{F2}$

Wir dürfen uns nicht darauf verlassen, dass der von uns ermittelte Strom im



Fehlerfall auch wirklich in dieser Höhe fließt, denn

- unser Messgerät darf einen Fehler (von bis zu 30 %) haben;
- Kupferleitungen erhöhen ihren Widerstand, wenn sie erwärmt werden (z. B. durch Betriebsströme);
- andere Umgebungseinflüsse könnten die Größe des Fehlerstroms ebenfalls beeinflussen haben.

Deshalb muss aus Sicherheitsgründen der theoretische Fehlerstrom  $I_{F1}$  rechnerisch um 30 % vermindert werden (das ist eine sehr bescheidene Forderung der Norm DIN VDE 0100 Teil 410).

**Anmerkung:** Im Fehlerfall bedeutet nicht ein kleiner, sondern ein großer Fehlerstrom mehr Sicherheit – denn das Überstrom-Schutzorgan schaltet bei großer Fehlerstromstärke schneller ab. Wir müssen also (um o. g. Einflussfaktoren zu berücksichtigen und eine gewisse Sicherheit einzuplanen) den errechneten Fehlerstrom bei der Korrektur um 30 % vermindern und nicht vergrößern.

$$I_{F2} = I_{F1} \cdot 0,7$$

**Praxisbeispiel:**  $I_{F2} = 230 \text{ A} \cdot 0,7 = 161 \text{ A}$

**Schritt 4: Division durch den K-Faktor des Überstrom-Schutzorgans**

Der K-Faktor eines Überstrom-Schutzorgans sagt aus, beim wievielfachen Nennstrom eine Abschaltung in der geforderten Zeit (von 0,4 s) erfolgt. Beispiele:

Überstromschutzorgan	K-Faktor
Sicherung (bis 25 A)	8
LS (Z)	3
LS (B)	5
LS (C)	10
LS (K)	15
LS (D)	20

Eine 10-A-Sicherung würde also die erforderliche Abschaltgeschwindigkeit bei einem Strom von 80 A erreichen, ein Leitungsschutzschalter LS(D) 6 A benötigt 120 A und ein LS(Z) 50 A braucht dafür mindestens 150 A. Wir wollen die Division durch den K-Faktor für alle o. g. Überstrom-Schutzorgane durchführen:

- Praxisbeispiel Si :  $161 / 8 = 20,1 \text{ A}$
- Praxisbeispiel LS(Z) :  $161 / 3 = 53,7 \text{ A}$
- Praxisbeispiel LS(B) :  $161 / 5 = 32,2 \text{ A}$
- Praxisbeispiel LS(C) :  $161 / 10 = 16,1 \text{ A}$
- Praxisbeispiel LS(K) :  $161 / 15 = 10,1 \text{ A}$
- Praxisbeispiel LS(D) :  $161 / 20 = 8,0 \text{ A}$

**Schritt 5: Auswahl des Überstrom-Schutzorgans**

Es dürfen in dem betrachteten Stromkreis alle Überstrom-Schutzorgane eingesetzt werden, deren Nennstrom kleiner oder gleich dem in Schritt 4 berechneten Wert ist – also:

- Praxisbeispiel Si :  $20 \text{ A}$
- Praxisbeispiel LS(Z) :  $50 \text{ A}$
- Praxisbeispiel LS(B) :  $32 \text{ A}$
- Praxisbeispiel LS(C) :  $16 \text{ A}$
- Praxisbeispiel LS(K) :  $10 \text{ A}$
- Praxisbeispiel LS(D) :  $6 \text{ A}$

Diese Überstrom-Schutzorgane garantieren im Fehlerfall eine Abschaltung in maximal 0,4 s. Natürlich muss außerdem ermittelt werden, ob die Leitungen sicher vor zu großer Erwärmung geschützt sind und ob der zulässige Spannungsfall eingehalten wird – aber das ist nicht Inhalt dieses Beitrags.

Oft wird bei der Erörterung solcher Probleme folgende Frage gestellt: Was passiert, wenn der Isolationswiderstand nicht völlig zusammenbricht, sondern noch ein (wenn auch sehr kleiner) Rest des  $R_{ISO}$  wirksam bleibt – findet dann noch eine schnelle Abschaltung statt?

Die Frage ist berechtigt, denn eine Abschaltung in 0,4 s findet wahrscheinlich wirklich nicht mehr statt – muss sie aber auch nicht! Die Situation ist ungefährlich geworden. Mit Hilfe des Ersatzschaltbilds ist auch das leicht zu erkennen:

Eine intakte Isolation hat in der Regel einen Widerstandswert, der im M $\Omega$ - oder G $\Omega$ -Bereich liegt. Wir wollen uns einen

(wirklich kläglichen) Rest von nur 10  $\Omega$  vorstellen und fügen ihn im Eratzschaltbild zwischen  $R_L$  und dem Körper der Waschmaschine ein (Bild 5).

Man erkennt, dass sich bei diesem Fehlerbild (also selbst bei einem wirklich verschwindend kleinen Rest des Isolationswiderstands) der Spannungsteiler so geändert hat, dass die Berührungsspannung bei indirektem Berühren aktiven Potentials auf völlig ungefährliche Werte reduziert wird. Die Abschaltung in  $\leq 0,4 \text{ s}$  ist also nur bei völligem Isolationsverlust notwendig – aber da ist sie eben dringend erforderlich und muss von der Elektrofachkraft sicher beherrscht werden!

Wie gefährlich sich hingegen defekte (oder auch nur unkorrekt angeklebte) Schutzleiter auswirken, wird im nächsten Beispiel klar. Unterstellt man einen – wenn auch geringen – Widerstand von nur 5  $\Omega$  im PE (z. B. am Übergang vom PE zum Körper der Waschmaschine), dann verschlechtert sich die Situation in gefährlicher Weise (Bild 6)!

Die zu erwartende Berührungsspannung beträgt nun gut 210 V. Daraus ergibt sich (wiederum 1000  $\Omega$  Körperwiderstand vorausgesetzt) eine Durchströmung mit gut 210 mA. Eine Abschaltung in 0,4 s wäre (siehe Verträglichkeitsdiagramm) schon gar nicht mehr ausreichend – aber noch nicht einmal die findet statt, denn der Fehlerstrom wird durch den hohen Schleifenwiderstand unter 40 A bleiben.

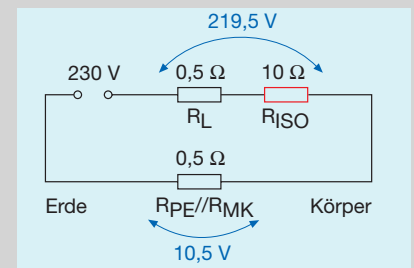
**Fazit:** Schlechte Schutzleiter führen (im Falle eines Isolationsfehlers) nicht nur zu größeren Berührungsspannungen (das wäre schon schlimm genug!), sie verhindern zusätzlich die dringend erforderliche schnelle Abschaltung.

Dem Nachweis der Niederohmigkeit von Schutzleitern sollte die prüfende Elektrofachkraft also ganz besondere Aufmerksamkeit schenken.

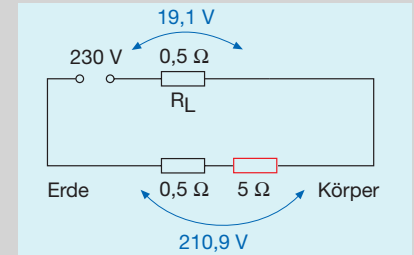
**2 TT-System**

Im TT-System ergibt sich eine völlig andere Situation als im TN-System (das gilt sinngemäß auch beim Verlegen langer, dünner Leitungen im TN-System). Der PE ist im TT-System mit einem Erder verbunden, der wiederum einen Übergangswiderstand zum Erdreich hat. Selbst bei sehr guten Erdern wird also der Widerstand des PE viel größer sein, als das im TN-System zu erwarten ist (Bild 7).

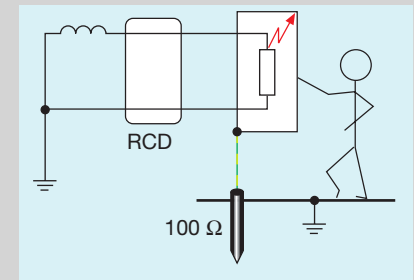
Wir wollen bei unserer Betrachtung von einem Erderwiderstand von etwa 100  $\Omega$  ausgehen (auch dieser Wert ist nicht so entscheidend) und zunächst – wie im TN-System – versuchen, unsere fünf Schritte abzuarbeiten.



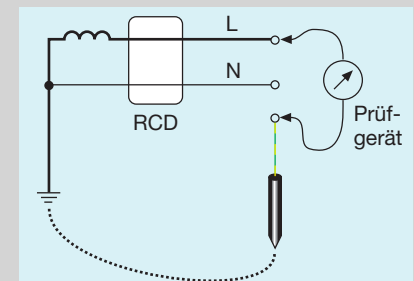
5 Ersatzschaltbild für den Fall, das der Isolationswiderstand nicht Null wird



6 Auswirkung eines erhöhten Widerstands des Schutzleiters, z. B. durch mangelhafte Klemmverbindung



7 Verhältnisse im TT-System



Achtung:  $R_{SCH}$  kann über RCDs hinweg nicht mit dem – sonst üblichen – Prüfstrom von 1 A gemessen werden. Die Messung erfolgt (um die RCD nicht auszulösen) mit 1/3 des Nennfehlerstroms der RCD.

8 Messen des Schleifenwiderstands im TT-System

**Schritt 1:** Gemessen werden  $R_{SCH} \approx 100 \Omega$  (Bild 8)

**Schritt 2:**  $I_{F1} = 230V / 100 \Omega = 2,3 \text{ A}$

**Schritt 3:**  $I_{F2} = 2,3 \text{ A} \times 0,7 = 1,6 \text{ A}$

**Schritt 4:**  $1,6 \text{ A} / 8 = 0,2 \text{ A}$

(bei Einsatz einer Sicherung ist  $K = 8$ )

**Schritt 5:** Auswahl einer Sicherung mit einem Nennstrom von 200 mA.

Bei Einsatz einer Sicherung mit einem Nennstrom von maximal 200 mA wird beim Auftreten eines Isolationsfehlers auch das

vorliegende TT-System in der geforderten Zeit von 0,4 s abgeschaltet – prima, aber das Waschen bereitet hinter einer solchen Sicherung wenig Freude!

**Fazit:** Im TT-System ist die schnelle Abschaltung im Fehlerfall mittels Überstromschutzorgan lediglich theoretisch möglich. In der Praxis hat diese Methode keine Bedeutung.

DIN VDE 0100 Teil 410 verlangt im TT-System (alternativ zur schnellen Abschaltung) im Fehlerfall eine Begrenzung der Berührungsspannung auf 50 V~ bzw. 120 V= (in medizinischen und landwirtschaftlichen Bereichen gilt 25 V~/60 V=). Wenn die Berührungsspannung diese Grenzen übersteigt, muss abgeschaltet werden. Es darf hier nur zwei Zustände geben:

- Entweder ist der Fehlerstrom so klein, dass die maximal zulässige Berührungsspannung (das ist ja auch der Spannungsabfall am Erder) nicht erreicht wird, oder
- es muss abgeschaltet werden.

Eine Lösung des Problems ist mit dem Einsatz von FI-Schutzschaltern (RCDs) möglich. Von RCDs werden nur Fehlerströme erfasst – Betriebsströme heben sich im Summenwandler selbst wieder auf und haben auf das Verhalten des RCD keinen Einfluss.

Zur Ermittlung der zum Erder ‚passenden‘ RCD brauchen wir kein 5-Schritte-Programm mehr. Es ist lediglich das Ohmsche Gesetz anzuwenden. Die Frage muss jetzt lauten: Welchen Fehlerstrom kann man sich maximal leisten, ohne die zulässige Berührungsspannung (z. B. 50 V) am Erder zu überschreiten? Oder anders herum gefragt: Ab welchem Fehlerstrom muss abgeschaltet werden, weil die Berührungsspannung sonst zu groß würde?

Wir wollen auch diese Überlegung wieder an unserem Praxisbeispiel durchführen:

$$I_{\text{MAX}} = U_{\text{MAX}} / R_E$$

$$I_{\text{MAX}} = 50 \text{ V} / 100 \Omega = 0,5 \text{ A.}$$

Bei einem Fehlerstrom < 0,5 A wäre die Berührungsspannung kleiner als 50 V (und damit zulässig), aber ein Fehlerstrom ab 0,5 A muss abgeschaltet werden (und zwar in maximal 200 ms – hier gilt zusätzlich die RCD-Norm DIN VDE 0664).

Wir setzen in unserem Praxisbeispiel daher eine RCD mit einem Nennfehlerstrom von maximal 500 mA ein. Fließt ein Strom von 500 mA (oder mehr), dann schaltet diese RCD ab. Fließt ein Fehlerstrom von weniger als 500 mA, dann muss nicht abgeschaltet werden, weil die Berührungsspannung an unserem 100-Ω-Erder unter 50 V bleibt.

**Achtung!** Die Norm kann hier keine festen (z. B. 30 % igen) Sicherheitsaufschläge vorgeben. Erder ändern ihren Widerstandswert (vorrangig durch Schwankungen der Feuchte im Erdreich, aber auch durch andere Einflussfaktoren) in derart weiten Grenzen, dass keine festen Vorgaben ge-

macht werden können. Die Elektrofachkraft hat selbst zu berücksichtigen, dass große Schwankungen des Erderwiderstandes möglich sind. Es ist durchaus sinnvoll, auf solche Erder, die in feuchtes Erdreich eingebracht werden, einige 100 % Sicherheit aufzuschlagen. Ebenso zulässig ist es aber auch, auf einen Erder, der nach einer langen Trockenperiode eingebracht wird, eine viel kleinere (oder auch gar keine) Sicherheit aufzuschlagen. Auf diese Betrachtungen darf erst dann verzichtet werden, wenn der Erder so tief ins Erdreich eingebracht wird, dass mit Schwankungen seiner Eigenschaften durch äußere Einflüsse nicht mehr gerechnet werden muss (davon geht man aber erst bei einer Tiefe > 8 m aus). Die beiden Varianten zur Realisierung des Fehlerschutzes bei Anwendung der Skl. I

- schnelle Abschaltung im Fehlerfall
- Begrenzung der Berührungsspannung sollte jede Elektrofachkraft mühelos beherrschen. Kann sie es nicht, lebt sie (aber nicht nur sie selbst) sehr gefährlich!

### 3 Grenzen der Schutzwirkung von FI-Schutzschaltern

Es gibt einen weiteren (leider auch weit verbreiteten) Irrtum beim Einsatz von RCDs – er lautet (wiederum schlicht und falsch):

„... Hinter einer RCD mit einem Nennfehlerstrom von 10 oder 30 mA ist Sicherheit immer gewährleistet, weil der Fehlerstrom durch die RCD (bei direktem oder indirektem Berühren aktiven Potentials) auf den angegebenen Wert des Fehlerstroms begrenzt wird ...“ **Aber das ist leider nicht so!** Eine RCD begrenzt den Strom gar nicht! Die Höhe des Fehlerstroms ergibt sich ausschließlich aus dem Ohmschen Gesetz. Eine RCD kann nur die Zeit des Fließens eines Fehlerstroms begrenzen, nicht aber dessen Größe. Fließt ein großer Fehlerstrom (z. B. durch direktes Berühren aktiven Potentials mit nassen Händen und leitfähigem Standort), dann gibt es trotz einer vorgeschalteten RCD keine Rettung! (Die Bezeichnung ‚Personenschutzschalter‘ ist – wenn man sie wörtlich nimmt – irreführend).

Auch diesen Zusammenhang kann man gut aus dem abgebildeten Verträglichkeitsdiagramm (Bild 3) und der darin eingetragenen Kennlinie einer 30-mA-RCD die Gefährdung ablesen. Es ist leider immer möglich, unterhalb der Kennlinie der RCD in den tödlichen Bereich der Durchströmungen zu geraten. Eine RCD ist ein geniales Schutzorgan – es handelt sich um eine der besten Erfindungen, die auf dem Gebiet der elektrischen Schutztechnik je gemacht wurden – aber es gibt trotzdem keinen Grund, ihr unser Leben anzuvertrauen (und bitte auch nicht das von Mutter Krause!) ■