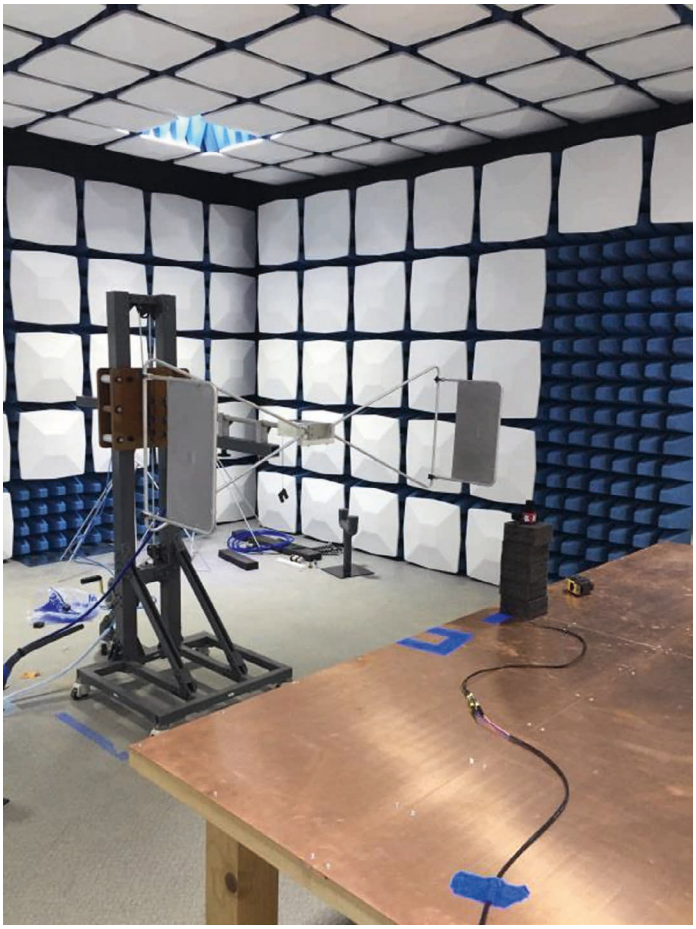
Verstärker für die EMV-Prüfung

Der Einfluss der Antennenanpassung

Eine Prüfquelle für den Störfestigkeitstest setzt sich aus EMC Amplifier, Antennenzuleitung und Antenne zusammen. Diese Zusammenschaltung darf man nicht unterschätzen.



Die Verwendung eines Verstärkers mit einem 1-dB-Kompressionspunkt, der deutlich über der maximalen Nennausgangsleistung liegt, ist ein einfacher Weg, um Nichtlinearitäten und mögliche Probleme mit einem EUT, das auf Störfrequenzen reagiert, zu vermeiden. Allerdings gibt es im Hinblick auf die Erzielung der erforderlichen Feldstärke noch einen weiteren wichtigen Faktor: die Antennenanpassung, definiert über das Stehwellenverhältnis (SWR).

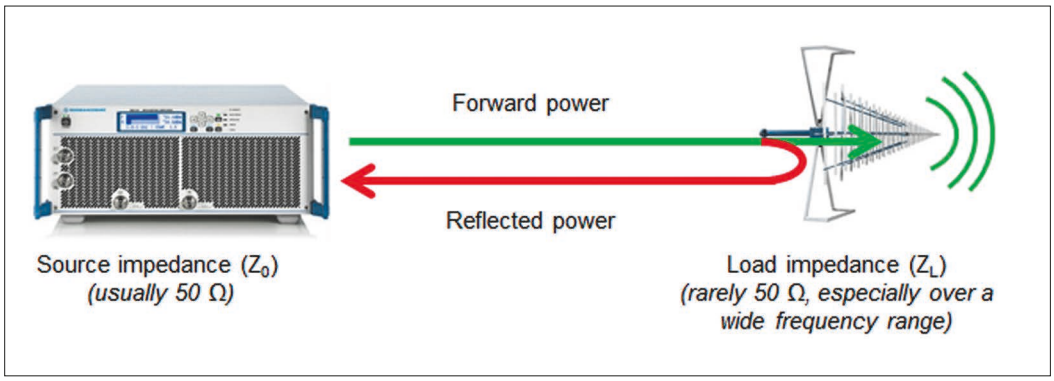
SWR: Basics, Bestimmung und Bedeutung

Bei den Themen „SWR“ und „Reflexionen“ können auch Profis aufs Glatteis geraten. Für ein besseres Verständnis seien die Quellen [1, 2, 3] empfohlen. Bei der EMC-Prüfung engt sich das Gebiet auf ein Grundverständnis und die Praxis der SWR-Bestimmung ein.

Wichtiges Grundlagenwissen: Nur wenn der Wellenwiderstand der Antennenleitung nicht mit der Impedanz der Antenne übereinstimmt, kommt es zu einer Reflexion und damit zu einer sogenannten stehenden Welle auf der Übertragungsleitung. Für eine effiziente Leistungsübertragung ist ein möglichst keiner Innenwiderstand des Verstärkers anzustreben, also keine Leistungsanpassung, denn bei dieser beträgt der Wirkungsgrad bereits theoretisch nur 50%. Das SWR ist gemäß seinem Namen das Verhältnis der Spannungen oder Ströme der hinlaufenden zur rücklaufenden Welle. Da jede Leitung dämpft, ist es am Verstärker immer kleiner als an der Antenne. Zur Angabe des SWRs gehören also der Messort und bei Ermittlung über die Leitung deren Dämpfung.

Zur Praxis der SWR-Bestimmung. Üblich sind heute sogenannte Antennenanalysatoren. Sie liefern eine grafische Darstellung des SWRs über der Frequenz. Bei der Messung zu beachten ist, dass diese Antenna Analyzers oft mit geringen HF-Leistungen arbeiten und daher leicht selbst gestört werden können, da die Antenne ja auch Signale aus der Umgebung empfängt. Auf Störarmut ist daher zu achten. Misst man mit einem Richtkoppler und erhält die Leistungen der vor- und rücklaufenden Welle, so ist aus diesen vor der Verhältnisbildung die Wurzel zu ziehen, da sich Leistungen bekanntlich quadratisch zu Spannungen und Strömen verhalten. Maßgebend ist immer das SWR direkt an der Antenne!

Zur Bedeutung des SWRs: Befreit vom Einfluss der Leitungsdämpfung entspricht das SWR immer den beteiligten Impedanzen. Beträgt das SWR beispielsweise 2 mit einem 50-Ohm-Kabel, dann kann die Antennenimpedanz 25 oder 100



Vorwärts gerichtete und reflektierte Leistung

Quelle:
An Introduction to EMC Amplifiers, White Paper,
Autor:
Paul Denisowski
Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG
www.rohde-schwarz.com

Teilübersetzung von FS

Großer metallischer Prüfling mit dem Potenzial, das SWR zu beeinflussen

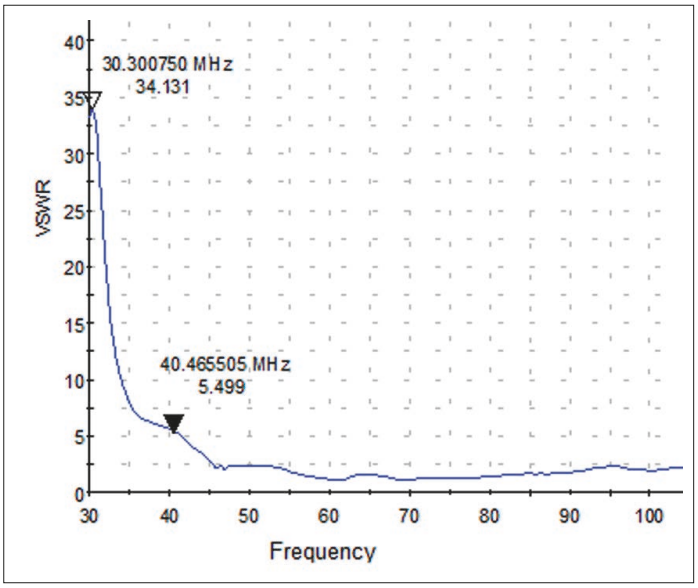
Ohm betragen. Das erscheint ziemlich verhängnisvoll, ist es aber nicht. Denn da bei Fehlanpassung entweder zu wenig Spannung an der Last mit mehr Strom kompensiert wird als bei Leistungsanpassung oder zu wenig Strom in die Last mit mehr Strom als bei Leistungsanpassung, bleibt die Leistung in die Last recht hoch. Etwa beim SWR von 2 muss man lediglich 11% Leistungsverzicht gegenüber Leistungsanpassung hinnehmen.

Obwohl eine perfekte Anpassung der Antenne an das Kabel höchst wünschenswert ist, da sie die Leistungsübertragung maximiert und reflektierte Leistung, die dem EMC Amp schaden könnte, vermeidet, ist diese bei der praktischen Prüfung der Störfestigkeit meist nicht erreichbar. Ursache ist die Frequenzabhängigkeit der Impedanz von Antennen.

Antennen und SWR

EMV-Verstärker bieten normalerweise eine recht frequenzunabhängige nicht-reaktive Quellenimpedanz von 50 oder 75 Ohm. Dies deshalb, damit eventuelle an der Antenne reflektierte Leistung nicht auch noch am Verstärker (rück-)reflektiert wird. Von daher gibt es also keine Probleme für die Prüfung der Strahlungsimmunität.

Die Herausforderung bei der Störfestigkeitsprüfung ist die extreme Variabilität der Antennenimpedanz. Im Gegensatz zu einer rein ohmschen Dummy-Last ist die Impedanz von Antennen, die bei der Störfestigkeitsprüfung verwendet werden, eine Funktion der Frequenz. Denn es ist schwierig, wenn nicht gar unmöglich, Antennen zu entwickeln, die ein niedriges SWR (<2) selbst über mäßig große Frequenzbereiche aufweisen. Doch viele Störfestigkeitsprüfungen umfassen einen Frequenzbereich von mehreren Megahertz bis mehreren Gigahertz, und selbst über viel kleinere Frequenzbereiche ist die Antennenimpedanz stark variabel. Selbst bei gut konstruierten und ordnungsgemäß gewarteten Antennen für die Prüfung der Störfestigkeit kann das SWR in ihrem Nennfrequenzbereich leicht 6 überschreiten.



Typischer SWR-Bereich lt. MIL-STD Application

Eine mögliche Lösung zum Erreichen vernünftiger SWR-Werte besteht darin, den gesamten Frequenzbereich in Teilbereiche zu unterteilen und für jeden dieser Bereiche eine andere Antenne zu verwenden. Aus praktischen Erwägungen heraus ist die Anzahl der Teilbereiche je nach Norm in der Regel auf sechs oder weniger begrenzt.

Diese Methode ist in der Störfestigkeitsprüfung recht verbreitet, obwohl sie entweder manuelles oder elektronisches Umschalten zwischen den Antennen (mit entsprechenden Auswirkungen auf die Prüfzeit und die Effizienz) erfordert. Dennoch kann es schwierig sein, ein gutes SWR auch nur über einen Teilbereich zu erreichen, vor allem wenn das SWR auf Faktoren außerhalb der Antenne zurückzuführen ist.

Eine andere mögliche Lösung besteht daher darin, die Antenne anzupassen. Obwohl Anpassungsnetzwerke in vielen Anwendungen erfolgreich eingesetzt werden, ist es schwierig, Ausführungen zu entwerfen, die über weite Frequenzbereiche wirksam und/oder effizient sind.

Externe Faktoren, die das SWR beeinflussen

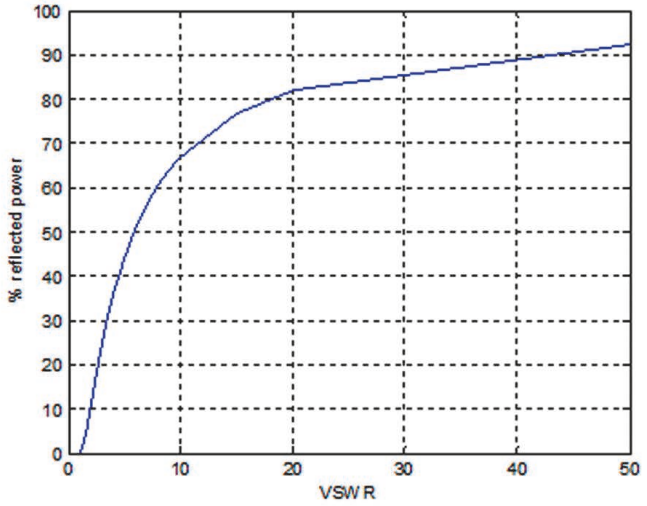
In einer idealen Prüfumgebung gäbe es keine Wechselwirkung zwischen dem Prüfling und der abstrahlenden Antenne: Feldstärke und SWR wären gleich gut, ob der Prüfling vorhanden ist oder nicht. In der Realität gibt es jedoch oft eine gewisse Kopplung zwischen der Antenne und dem Prüfling, da der Prüfling Strahlung zur Antenne zurück reflektiert, und dies kann einen nicht-trivialen Einfluss auf das SWR haben.

Der Grad der Kopplung ist eine Funktion vieler Faktoren, wie z.B. dem Abstand zwischen dem Prüfling und der Antenne, dem Einfallswinkel und der Zusammensetzung/Konstruktion des Prüflings. Diese Faktoren sind meist auch (stark) frequenzabhängig.

In ähnlicher Weise wird das SWR oft von der Größe der Kammer beeinflusst. Generell gilt: Je kleiner die Kammer, desto größer die Auswirkung auf das SWR. Etwa kann es zu einem starken Anstieg des SWRs kommen, wenn die Wellenlänge des übertragenen Signals in die Nähe einer oder mehrerer linearer Innenabmessungen der Kammer kommt. Faktoren wie die Größe, die Lage und die elektrischen Eigenschaften der Grundplatte können sich ebenfalls auf das SWR auswirken.

Obwohl die nominale SWR-Kurve einer bestimmten Antenne bekannt sein mag, kann es schwierig sein, externe Effekte auf das SWR vorherzusagen oder zu modellieren, insbesondere wenn diese Effekte wie üblich frequenzabhängig sind. Mit anderen Worten, wir können nicht wissen, wie stark ein bestimmtes EUT das SWR beeinflusst, bis wir das Gerät tat-

VSWR	(Γ)	% reflected power
1.0	0.000	0.00
1.5	0.200	4.0
2.0	0.333	11.1
2.5	0.429	18.4
3.0	0.500	25.0
3.5	0.556	30.9
4.0	0.600	36.0
5.0	0.667	44.0
6.0	0.714	51.0
7.0	0.750	56.3
8.0	0.778	60.5
9.0	0.800	64.0
10.0	0.818	66.9
15.0	0.875	76.6
20.0	0.905	81.9
50.0	0.961	92.3



SWR und reflektierte Leistung in %

sächlich in die Kammer stellen und mit dem Testen beginnen.

Beachten Sie, dass die Kopplung zwischen der Antenne und dem Prüfling fast immer zu einer Erhöhung (und nicht zu einer Verringerung) des SWRs führt. Daher ist es ratsam, ein potenziell höheres SWR zu berücksichtigen, wenn man eine Prüfung der abgestrahlten Emissionen plant, und wir werden sehen, wie sich dies wiederum auf die Auswahl eines EMV-Verstärkers auswirkt.

Beachten Sie, dass wir zwar Antennen und Kammern als getrennte Einheiten in Bezug auf ihren Beitrag zum SWR und/oder zur Verstärkung diskutiert haben, es in Wirklichkeit jedoch komplexe Wechselwirkungen zwischen ihnen gibt, deren Grad stark von Frequenz, Platzierung und Ausrichtung der Antenne abhängt.

Auswirkungen des SWRs bei Störfestigkeitsprüfungen

Manchmal wird übersehen, dass es bei der Prüfung der Störfestigkeit weniger um die HF-Leistung als vielmehr um die HF-Feldstärke geht. Antennen wandeln leitungsgebundene Leistung in elektromagnetische Felder um. Je höher das SWR ist, desto geringer ist der Prozentsatz der Verstärkerleistung, der erfolgreich durch die Antenne übertragen wird, und desto geringer ist damit auch die resultierende Feldstärke. Daher muss mit steigendem SWR die Verstärkerausgangsleistung erhöht werden, um eine bestimmte Feldstärke aufrechtzuerhalten.

Probleme können hier entstehen, wenn ein Breitbandverstärker bei einem hohen SWR nicht in der Lage ist, die notwendige Ausgangsleistung zur Erzeugung die gewünschte Feldstärke zu liefern. Es müssen sorgfältige Berechnungen durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass der Verstärker genügend Vorwärtsleistung liefern kann, um die gewünschte Feldstärke über den gesamten Frequenzbereich bei allen wahrscheinlichen SWR-Werten zu erzeugen. Schlechte Linearität, ungleichmäßige Leistung (insbesondere an den Bandrändern) und unerwartet hohes SWR aufgrund von Kopplung zwischen Antenne und Prüfling können dazu führen, dass die erforderliche Feldstärke nicht erreicht wird, weil der Verstärker zu schwach ist.

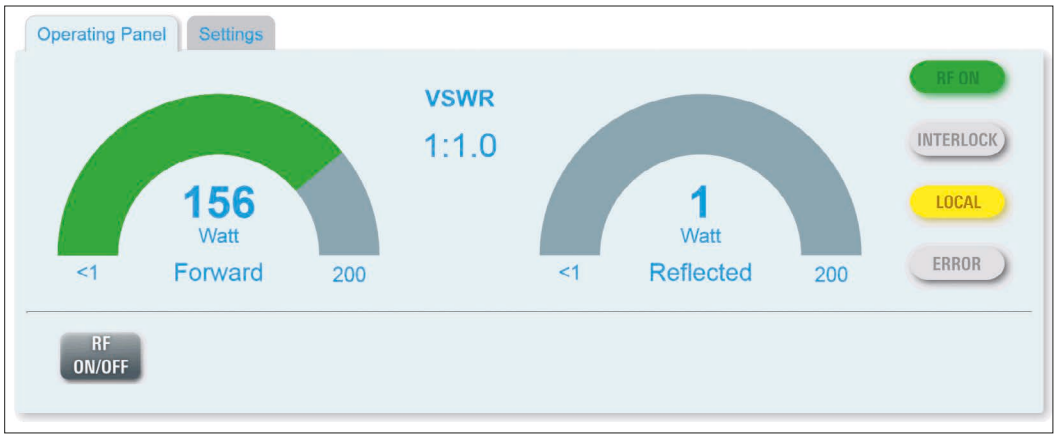
Die andere Komplikation eines hohen SWRs ist die Auswirkung der reflektierten Leistung auf den Verstärker selbst. Ein SWR von 6 bedeutet eine reflektierte Leistung von 50%, und beim SWR 15 werden mehr als 75% der übertragenen Leistung zum Verstärker zurückreflektiert.

Ein hohes Maß an reflektierter Leistung kann für einen Verstärker sehr schädlich sein: Unmittelbare Schäden am Verstärker können durch interne Lichtbögen oder Transistorausfälle verursacht werden. Eine Beschädigung oder Verschlechterung der Verstärkerleistung kann auch allmählich auftreten, wenn die reflektierte Energie übermäßige Hitze im Verstärker erzeugt.

Die einfachste Möglichkeit, einen Verstärker vor reflektierter Leistung zu schützen, ist die Verwendung eines festen Dämpfungsglieds. Dadurch reduziert sich natürlich auch die übertragene Leistung.

Eine ausgefeiltere Methode zur Vermeidung von Schäden durch hohe reflektierte Leistung ist bekannt als Foldback: Wenn der Pegel der reflektierten Leistung ansteigt, verringert der Verstärker automatisch seine Ausgangsleistung, bis der Wert der reflektierten Leistung auf ein sicheres Niveau fällt. Vorausgesetzt, die Foldback-Schaltung kann eine übermäßige reflektierte Leistung schnell erkennen und darauf reagieren, ist dieser Ansatz recht einfach und zuverlässig.

Foldback hat jedoch einen gravierenden Nachteil: Es reduziert die an die Last gelieferte Leistung und damit auch die Feldstärke. Foldback kann einen Verstärker vor Verschlechterung



Anzeige der vorwärts gerichteten/reflektierten Leistung und des SWRs

oder Beschädigung schützen, allerdings um den Preis einer (oft erheblich) verringerten Leistung und der Unfähigkeit, die angestrebte Feldstärke zu erreichen.

Während das SWR den Prozentsatz der reflektierten Leistung beschreibt, ist es die absolute Höhe der reflektierten Leistung, die den Foldback-Mechanismus auslöst. Zum Beispiel bei einem SWR von 6 werden 50% der Leistung reflektiert, aber die absolute reflektierte Leistung hängt vom Ausgangspegel ab: 50% von 100 W sind weitaus weniger schädlich als 50% von 1000 W. Daher reicht es nicht aus, einfach anzugeben, bei welchem SWR die Rückkopplung auftritt, sondern entscheidend ist, bei welchen Leistungspegeln Foldback bei einem bestimmten SWR auftritt. Ein 1000-W-Verstärker, der auf 500 W bei einem SWR von 6 zurückfaltet, ist einem Verstärker, der bei einem SWR von 3 auf 500 W zurückfaltet, deutlich überlegen.

Ein klares Verständnis darüber, wie und wann Foldback in einem bestimmten Verstärker-Design eingesetzt wird, ist wichtig für die Auswahl eines Verstärkers, der die Feldstärke über den gewünschten Frequenzbereich auch unter ungünstigen SWR-Bedingungen erzeugen soll.

Glücklicherweise sind aber sogenannte Leistungsausgleichsalgorithmen häufig Teil der EMV-Prüfautomatisierungsumgebungen, obwohl Geschwindigkeit und Effizienz dieser proprietären Algorithmen von Plattform zu Plattform sehr unterschiedlich sein können.

Verstärkerbelastung bei offenem oder kurzgeschlossenem Kabel

Ist das Kabel auf der Antennenseite infolge eines Fehlers offen oder kurzgeschlossenen, gibt es eine Totalreflexion und alle Leistung kehrt zum Verstärker zurück. Dabei können sich an seinem Ausgang jeweils Spannungs-/Stromverhältnisse zwischen den Fällen nahe Leerlauf und Kurzschluss des Verstärkerausgangs herausbilden. Ganz werden diese Verhältnisse infolge der Leistungsdämpfung nicht erreicht. Die Spannweite zwischen nahe Leerlauf und Kurzschluss resultiert aus der Transformationswirkung der Leitung. Die Länge der Leitung entscheidet also über die Spannungs-/Stromverhältnisse, die sich am Verstärker einstellen.

Die praktischen Folgen von 100% reflektierter Leistung (entweder aufgrund eines Kurzschlusses oder einer Unterbrechung) können, gelinde gesagt, dramatisch sein. Breitbandverstärker unterscheiden sich enorm in Bezug auf die Zeit, wie lange sie dann ohne Schaden weiterarbeiten können. Leider sind einige Breitbandverstärker nicht für diese extremen (aber leider nicht seltenen) Situationen gerüstet, und Beschädigung oder vollständige Zerstörung folgen oft innerhalb von Minuten. Eine permanente Messung der vorwärts gerichteten und reflektierten Leistung ist daher zu empfehlen. Verstärker, die dieses Feature eingebaut haben, sind einfacher und sicherer zu handhaben. Auch hier kann es Unterschiede zwischen den Verstärkern geben, insbesondere in Bezug auf die Richtwirkung des Kopplers und den Grad der Isolierung zwischen den Anschlüssen.

Sicherheitsmerkmale wie Verriegelungen (zur automatischen Abschaltung der Stromversorgung, wenn z.B. eine Kammertür geöffnet wird) sind bei den meisten Verstärkern Standard, obwohl mehrere unabhängige Verriegelungen ein nützliches Merkmal für Verstärkersysteme sein können, die mehrere Wege zu verschiedenen Kammern haben.

Modulare Verstärker, die für verschiedene (oder mehrere) Frequenzbänder konfiguriert werden können, bieten Vorteile sowohl in Bezug auf die Flexibilität als auch des einfachen Austauschs. Man sollte aber auch nicht die physischen Dimensionen des Verstärkers selbst, wie Größe und Gewicht, außer Acht lassen. Idealerweise möchten wir einen Verstärker, der eine maximale Ausgangsleistung bei minimalem Platzbedarf bietet.

Und schließlich kann die Fähigkeit des Fernzugriffs und der Ferndiagnose eines Verstärkers sehr hilfreich sein, insbesondere bei geografisch verteilten Teams und Testlabors.

Literaturtipps

[1] Antennenanpassung ohne Formeln erklärt, Einkaufsführer 2022/2023 hf-praxis, S. 28ff

[2] Irritationen um Reflexionen, CQ DL 2/2022, S. 26ff

[3] HF-Leitungen verstehen und nutzen, DARC-Verlag ◄