

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 95 (1977)
Heft: 20

Artikel: Heisse Plasmasäule auf Herkules X-1: Messung der Magnetfeldstärke eines Neutronensterns
Autor: Hintsches, Eugen
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73375>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

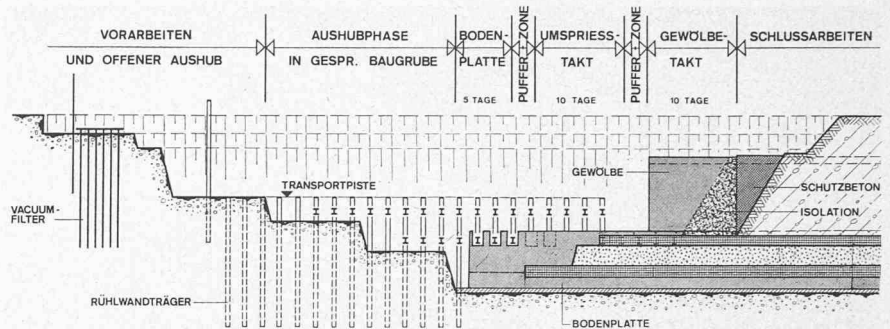
Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 09.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Bild 10. Längenprofil der Arbeitstakte



Der *Arbeitsablauf* erfolgte in einem Taktprogramm, das die Einhaltung der von Geologie und Flugsicherheit diktierten Randbedingungen gewährleistete (Abbildungen 9 und 10).

Für die Entwässerung der über den tonigen Silten liegenden Deckschichten wurde eine Vacuum-Grundwasserabsenkung installiert. Anschliessend erfolgte der Voraushub. Von diesem Planum aus wurden dann die 10 m langen HEB 300-Rühlwandträger im Abstand von 2,50 m gerammt. Der Aushub im Bereich der Rühlwandträger musste etappenweise sehr sorgfältig ausgeführt werden unter gleichzeitiger Ausfachung der Träger, und zwar abwechselnd mit Beton und Sickerbeton, um einen Aufbau von Wasserdruck hinter der Wand zu verhindern. Da wegen dem schlechten Baugrund eine spriessfreie Baugrube mittels Erdankern nicht möglich war, wurde jeder Rühlwandträger mit zwei HHH-Spezialsprissen auf den gegenüberliegenden abgestützt.

Nach einem teilweise von Hand getätigten Restaushub, abgedeckt mit Vliessmatte und 25 cm starkem Sickerbeton, konnte die Bodenplatte zusammen mit dem aufgehenden Gewölbeansatz betoniert werden.

In zwei Etappen wurde sodann auf das bereits erstellte Bauwerk umgespriess: Mittels Betonriegel in Höhe der Bodenplatte (zum Ausbau der untern Spriesslage) und mittels Ausspriessung zwischen dem aufgehenden Gewölbeansatz zusammen mit Hinterfüllung desselben und Spriessriegel (zum Ausbau der oberen Spriesslage) wurde die Voraussetzung zur Erstellung des Gewölbes geschaffen. Auf den Umspriesstakt folgte der Gewölbetakt mit Ausschalen, Vorfahren, Richten, Armieren, Stellen der Konterschaltung und Betonieren des Gewölbes.

Als letzte Phase wurden die Schlussarbeiten durchgeführt: Isolieren, Aufbringen des Schutzbetons und sorgfältiges Auffüllen der Baugrube.

Gemäss diesem vom Unternehmer vorgeschlagenen Taktprogramm konnten in 10 Arbeitstagen 20 m Tunnel erstellt werden.

Adresse der Verfasser: M. Glättli, dipl. Ing. ETH, Chef der Sektion Tiefbau, Bauabtlg. Kreis III, SBB, Kasernenstrasse 97, 8021 Zürich und J. Hasenfratz, dipl. Ing. ETH, Direktor in Firma Locher & Cie. AG, Pelikanplatz 5, 8001 Zürich.

Heisse Plasmasäule auf Herkules X-1

Messung der Magnetfeldstärke eines Neutronensterns

Zum ersten Mal haben Wissenschaftler bei einem Neutronenstern das Magnetfeld gemessen: Seine Stärke beträgt 4,6 Billionen (10^{12}) Gauss und ist damit das stärkste bisher im Kosmos beobachtete Magnetfeld (das der Sonne misst ungefähr 100, das der Erde nur einige Zehntel Gauss).

Diese von Fachleuten als die «vielleicht bedeutendste Beobachtung deutscher Astronomen seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs» (Rudolf Kippenhahn, Direktor am Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik) gefeierte Entdeckung gelang einer gemeinsamen Arbeitsgruppe der Universität Tübingen und des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik in Garching bei München. Mit Hilfe einer am Rand der Erdatmosphäre fliegenden Ballonsonde untersuchten Wolfgang Pietsch, Klaus Reppin, Bruno Sacco und Joachim Trümper vom Max-Planck-Institut sowie Eckhard Kendzorra und Rüdiger Staubert vom astronomischen Institut der Universität Tübingen die regelmässigen Röntgenblitze aus dem Doppelsternsystem Herkules X-1.

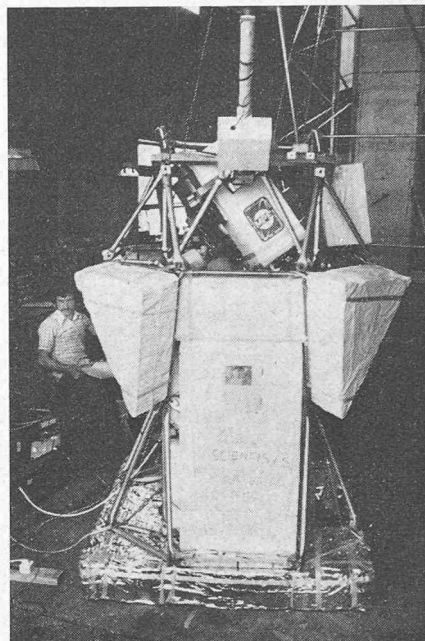
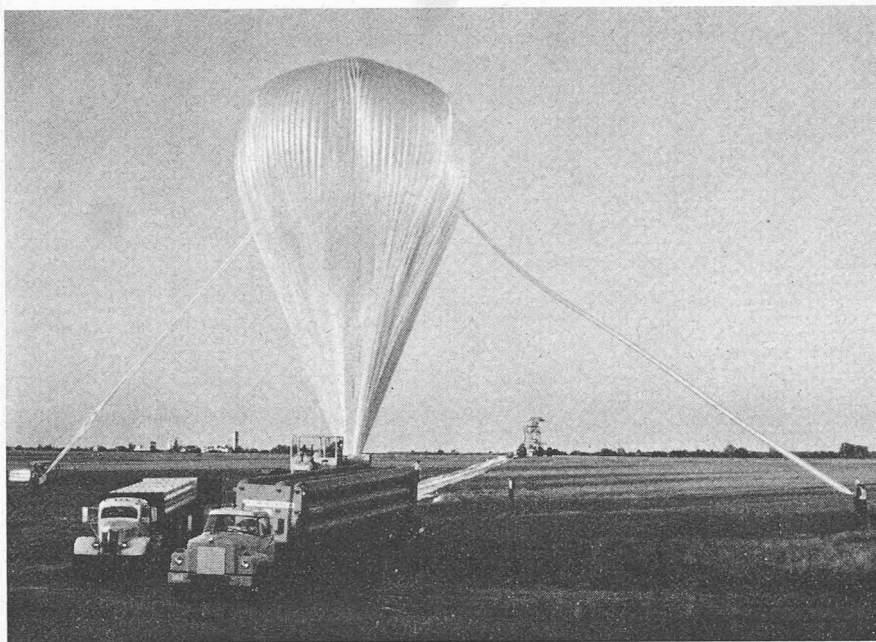
Bei der Auswertung der von zwei unabhängig voneinander arbeitenden Röntgenteleskopen gelieferten Daten bestimmten die Wissenschaftler jetzt zum ersten Mal «bis auf ungefähr 10 Prozent genau» die Stärke des Magnetfelds eines Neutronensterns. «Damit haben wir einen Schlüssel für das Verständnis der bizarren Physik auf der Oberfläche von Neutronensternen in der Hand», meint der Leiter der gemeinsamen Arbeitsgruppe, Joachim Trümper. «Wir hoffen,

dass wir damit noch weitere Eigenschaften dieser Exoten unter den Sternen jetzt nicht mehr nur abschätzen, sondern genau berechnen können.»

Supernova-Explosion sprengt -Stern-Hülle ab

Für Astrophysiker gehören Neutronensterne zu den faszinierendsten Objekten im Kosmos – sie entstehen am Ende der Entwicklung von Himmelskörpern, die mehr Masse als unsere Sonne haben. Wenn ein solcher Stern seinen Kernbrennstoff erschöpft hat, geht in seinem Inneren der Kernfusions-Ofen – der auch unsere Sonne leuchten lässt – aus. Eine gewaltige Supernova-Explosion sprengt seine äussere Hülle in den Weltraum ab und lässt den sterbenden Stern noch einmal für wenige Tage millionenfach heller als jemals zuvor aufleuchten.

Nach dieser Explosion wird für den Sternrest die Gravitation übermächtig. Weil das erloschene «Sternfeuer» keinen Widerstand mehr entgegensetzen kann, bricht der Stern unter der Wirkung seiner eigenen Schwerkraft in sich zusammen, bis Elementarteilchen-Kräfte der Materie diesen Kollaps stoppen. Es bleibt eine ausgebrannte Stern-Leiche übrig, in der die gesamte Masse einer Sonne zu einer Kugel von nur noch etwa 20 Kilometer Durchmesser zusammengepresst ist – bei entsprechender Materiedichte hätte die Erde ungefähr 300 Meter Durchmesser.



Links: Start bei Sonnenuntergang in Palestine (Texas): Das Helium strömt aus Tankzügen in den Ballon und bläht seine Hülle für den Flug bis in 42 Kilometer Höhe. Von dort aus beobachteten Wissenschaftler mit Hilfe von zwei Röntgenfernrohren die regelmässigen Blitze aus dem Doppelsternsystem Herkules X-1. Rechts: Letzte Tests an der Ballongondel und an den beiden Röntgenfernrohren (Bildmitte).

Dabei werden im Inneren des Kompaktsterns die elektrisch negativen Elektronen in die positiv geladenen Atomkerne hineingequetscht, so dass die Materie im wesentlichen nur noch aus elektrisch neutralen Neutronen besteht. Solche *Rest-Sterne* sind deshalb unvorstellbar *eng gepackt* – ihre Dichte ist bis zu zehnmal grösser als das Innere von Atomkernen. Ein einziger Kubikzentimeter dieser ausgeglühten Sternasche würde auf der Erde 100 Millionen Tonnen wiegen. Entsprechend gewaltig ist die Anziehungskraft: Ein aus grosser Höhe fallender Gegenstand schlägt mit ungefähr halber Lichtgeschwindigkeit – das sind 150000 Kilometer pro Sekunde – auf der Oberfläche eines Neutronensterns auf.

Nadelförmige Atome

Und noch ein zweites Extrem bestimmt die Vorgänge auf dem kompakten Himmelskörper: ein aussergewöhnlich starkes Magnetfeld. Es ist beim Sternkollaps zu ungeheuren Werten angewachsen. Nach den Gesetzen der Physik nimmt es nämlich um so mehr zu, je stärker der Magnetkörper schrumpft. Unsere im Durchmesser etwa 1,4 Millionen Kilometer grosse Sonne hat an ihrer Oberfläche ein etwa 100 Gauss starkes Magnetfeld – es würde auf etwa 1 Billion Gauss anwachsen, wenn sich ihr Durchmesser plötzlich auf die 20 Kilometer eines Neutronensterns zusammenzöge. In diesem starken Magnetfeld nimmt die Materie ungewöhnliche Formen an: Die an der Sternoberfläche existierenden Atome, die normalerweise rund sind, werden zu langgestreckten, nadelförmigen Gebilden zusammengequetscht.

Gleichwohl sind die Sternleichen nur optisch tot – wegen ihrer geringen Grösse sind sie zwar mit dem Fernrohr nicht zu erkennen. Dennoch verraten sie sich den Astronomen durch erstaunliche Aktivität – durch *starke, regelmässige Röntgenblitze*. Um diese zu untersuchen, müssen die Wissenschaftler allerdings hoch hinaus: Kosmische Röntgenstrahlen bleiben in den dichten Luftschichten der Erdatmosphäre stecken und können deshalb nur in sehr grossen Höhen oder im Weltraum beobachtet werden. Wegen des im Vergleich zu Satelliten-Missionen geringeren Aufwands und der wesentlich kürzeren Vorbereitungszeit unternimmt das Garching/Tübingen

ger Forscher-Team *Röntgenbeobachtungen von hochfliegenden Stratosphären-Ballons* aus. Von Palestine/Texas aus, dem grössten Ballonflugzentrum der Welt, starteten die Wissenschaftler eine insgesamt 380 Kilogramm schwere Messgerät-Gondel mit zwei Röntgenteleskopen. In drei Stunden trug ein im Durchmesser fast 100 Meter grosser, heliumgefüllter Ballon diese Last bis in 42 Kilometer Höhe.

Ein ausgeklügelter Regelmechanismus sorgte während der acht Stunden dauernden Beobachtungszeit für Stabilität: Feinfühliges Magnetometer orientierten die Messgerät-kapsel am Magnetfeld der Erde. Sobald auch in 42 Kilometer Höhe noch wehende Winde die Ballongondel aus der vorgesehenen Lage wegzudrehen versuchten, begannen Schwungräder zu rotieren und hielten damit die Nutzlast in ihrer ursprünglichen Position. Von dieser «magnetometerstabilisierten Plattform» aus wurden die beiden Röntgenfernrohre auf das *Doppelsternsystem Herkules X-1* gerichtet. Es ist 12000 Lichtjahre von der Erde entfernt und ähnlich wie unser Sonnensystem aufgebaut: Um einen normalen Stern kreist – wie unsere Erde – ein Objekt; allerdings ist dies kein Planet, sondern ein Neutronenstern.

Während die Erde durchschnittlich 150 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt ist, kreist in Herkules X-1 der 20 Kilometer im Durchmesser kleine Begleitstern «hautnah» – im Abstand von nur 3 Millionen Kilometern – um einen schätzungsweise 2 Millionen Kilometer dicken Zentralstern. Ein Jahr auf dem Kompaktstern dauert deshalb nur 1,7 Tage – in dieser kurzen Zeit hat er also seine «Sonne» einmal umrundet. Gleichzeitig dreht er sich dabei ungewöhnlich schnell um seine eigene Achse – ein Tag auf dem Neutronenstern ist nur 1,24 Sekunden lang.

Genau in dieser Zeit, alle 1,24 Sekunden, zuckt aus Herkules X-1 ein starker Röntgenblitz: Er entsteht bei gewaltigen Bewegungen von Materie. Ähnlich wie der «Sonneneindringling» von unserem Zentralgestirn, so strömt auch vom Herkules-Hauptstern ständig gasförmiges Plasma weg. Ein Teil davon sammelt sich zunächst in einer etwa 100000 Kilometer breiten Scheibe um den rotierenden Neutronenstern. Er wirkt wegen seiner starken Anziehungs- und Ma-

gnetkräfte auf die Materiescheibe wie ein riesiger Staubsauger: Ein ständiger Strom gasförmigen Plasmas wird von der enormen Schwerkraft des Kompaktsterns angezogen. In dem intensiven Magnetfeld kann das Plasma nur im Bereich der magnetischen Pole des Neutronensterns eindringen, hier wird es zu einer schmalen Säule zusammengepresst und schliesslich freifallend mit ungeheurer Wucht auf einen verhältnismässig kleinen Fleck auf die Polkappe des Neutronensterns geschmettert. In dieser «heisser Fleck» genannten Aufschlagzone erreicht die Temperatur den auch für die Astrophysik ungewöhnlich hohen Wert von 100 Millionen Grad – eine Hitze, bei der Materie nur noch überwiegend Röntgenstrahlung aussenden kann. Zum Vergleich: Im Inneren der Sonne herrschen «nur» 15 Millionen Grad.

Leuchtturm-Effekt

Die Rotationsachse des Neutronensterns in Herkules X-1 ist zu seinem Magnetfeld hin so geneigt, dass man – von der Erde aus gesehen – nur einen der beiden Pole sehen kann. Durch die Rotation des Kompaktsterns verschwindet auch der andere «heisse Fleck» bei jeder Umdrehung des Neutronensterns für kurze Zeit hinter dem Horizont. Durch diesen «Leuchtturm-Effekt» setzt die Röntgenstrahlung von Herkules X-1 alle 1,24 Sekunden aus. Eine weitere Unterbrechung geschieht alle 1,7 Tage: Dann befindet sich der kleine Begleiter auf seiner Bahn hinter dem grossen Zentralstern. Ungeklärt ist bisher, weshalb die Röntgenpulse jeweils 12 Tage lang «an-» und 23 Tage lang «ausgeschaltet» bleiben.

Diese regelmässigen Röntgenblitze aus Herkules X-1 untersuchten die Wissenschaftler aus Garching und Tübingen jetzt beim Ballonflug mit Hilfe von zwei *Festkörper-Szintillationszählern*: Das sind im wesentlichen Platten aus Natriumjodid, 87 bzw. 102 Quadratzentimeter gross. Schlägt ein Röntgenquant in dieses Material ein, entsteht ein messbarer Lichtblitz, der um so stärker leuchtet, je grösser die Energie des ankommenden Röntgenquants ist. Dabei beobachteten die Astronomen die Röntgenpulse von Herkules X-1 zum ersten Mal bis zu Energien von ungefähr 80000 Elektronenvolt – der amerikanische Röntgensatellit SAS-3 kann diese Pulse nur bis etwa 30000 Elektronenvolt messen.

«Wir haben Glück gehabt, dass genau in dem Bereich, den wir neu erschlossen haben, eine so aufregende Sache steckt», sagt Prof. Trümper. Inmitten der gemessenen Röntgenquanten unterschiedlicher Energie fanden die Forscher auffallend viele mit 53000 Elektronenvolt (53 keV) – die Fachleute sprechen von einer Emissionslinie im Röntgenspektrum von Herkules X-1 bei dieser Energie.

«Das ist nicht nur die härteste Röntgenemissionslinie, die man bisher gefunden hat», erklärt Prof. Trümper. «Wir sind auch auf ein neues Phänomen gestossen, denn diese Linie entsteht bei Quantensprüngen von Elektronen im superstarken Magnetfeld.» Elektronen vollführen nämlich in einem Magnetfeld Kreisbewegungen, deren Bahnradialen und Bahnbewegungen nicht beliebig sein können, sondern nach den Gesetzen der Quantenmechanik genau festgelegt sind. Wenn nun ein Elektron durch Stoss mit einem anderen Teilchen auf eine «höhere» Bahn angehoben wird, fällt es nach kurzer Zeit in seine ursprüngliche Position zurück und gibt die dabei freiwerdende Energie in Form eines Quants ab. Man nennt diese Strahlung «quantisierte Zyklotronstrahlung». Bei der 53-keV-Röntgenstrahlung von Herkules X-1 handelt es sich um den Übergang vom ersten angeregten Zustand in den Grundzustand der Elektronen, und man kann aus der beobachteten Quantenenergie von 53 keV direkt die Stärke des Magnetfelds berechnen: Es ergibt sich ein Wert von 4,6 Billionen (10^{12}) Gauss. Unter diesen Bedingungen sind die Bahndurchmesser der Elektronen ausserordentlich klein: Sie

betragen nur noch winzige Bruchteile eines Atomdurchmessers. «In einer solchen Linie stecken jedoch sehr viel mehr Detailinformationen, die wir jetzt herauszuholen versuchen», meint Prof. Trümper. «Ähnlich wie durch die Deutung der Fraunhofer-Linien im Sonnenlicht die Eigenschaften der Atmosphäre unseres Zentralgestirns, zum Beispiel ihre chemische Zusammensetzung, enträtselt werden konnten, sind wir jetzt weiteren Geheimnissen der Neutronensterne auf der Spur.»

Schon jetzt wissen die Forscher Einzelheiten über den «heissen Fleck» auf dem Neutronenstern von Herkules X-1: Die Säule, in der gasförmiges Plasmamaterial – «vom Magnetfeld wie in einem Schlauch kanalisiert» (Trümper) – auf die Oberfläche des 20 Kilometer grossen Neutronensterns mit schätzungsweise 150000 Kilometer pro Sekunde Geschwindigkeit niederprasselt, hat einen Durchmesser von 1 Kilometer. «Doch spritzt da trotz der hohen Aufprallgeschwindigkeit nichts an den Seiten weg, da fliesst nichts auseinander, das enorme Magnetfeld hält alles zusammen. Lediglich die Röntgenstrahlung kann ungehindert aus dem Magnetfeld entweichen.»

Der Fuss dieser Säule auf der Oberfläche des Neutronensterns sendet bei 100 Millionen Grad Temperatur äusserst intensive Röntgenstrahlung aus, wobei die leuchtende Zone wahrscheinlich nicht grösser als etwa 1 Quadratkilometer ist. Trotzdem strahlt diese für kosmische Massstäbe winzige Fläche etwa 10000mal mehr Energie ab als unsere Sonne mit ihrem über 1,4 Millionen Kilometer grossen Durchmesser. Aus diesem heissen Fuss der Plasmasäule auf Herkules X-1 stammt auch die 53-keV-Zyklotronstrahlung: «Allein die in dieser Linie steckende Energie ist einige 100mal grösser als die gesamte Leuchtkraft unserer Sonne. «Das zeigt, welche

Suche nach der Fallgeschwindigkeit

Derzeit versuchen die Wissenschaftler in Garching und Tübingen vor allem herauszufinden, mit welcher Geschwindigkeit das Plasma auf die Oberfläche des Herkules-X-1-Neutronensterns fällt. Wenn es gelingt, diesen Wert zu messen, lassen sich weitere wesentliche Eigenschaften dieser Sternexoten bestimmen. Joachim Trümper: «Insbesondere hoffen wir, die bestehenden Unsicherheiten über Masse und Radius der Neutronensterne weiter einzuengen. Während das jetzt erstmals gemessene Magnetfeld einen Schlüssel für die Physik an der Oberfläche eines Neutronensterns darstellt, wäre eine genauere Kenntnis von Masse und Radius für das Verständnis der überdicht gepackten Materie im Sterninneren von grosser Bedeutung.»

Eugen Hintsches, München

Umschau

Fehlerstromschutzschaltung auf Baustellen

Eine sorgfältige Untersuchung der *Elektronenfälle* auf Baustellen hat gezeigt, dass bei Anwendung der Fehlerstromschutzschaltung jährlich etwa 30 Unfälle, davon sieben mit tödlichem Ausgang, vermeidbar wären. Die volkswirtschaftlichen Kosten dieser Unfälle liegen bei rund 6 Mio Franken.

Die Fehlerstromschutzschaltung wird im Ausland seit Jahrzehnten angewendet. Kinderkrankheiten sind längst ausgemerzt und Anwendungsprobleme sind gelöst. In der Schweiz wird die Fehlerstromschutzschaltung seit etwa zehn Jahren als zusätzliche Schutzmassnahme zur *Nullung oder Schutzerdung* verwendet. Auch bei uns sind die gemachten Erfahrungen sehr gut.