

Erdung

Das Stiefkind der Elektrotechnik?

Sachverständigenbüro für Elektrotechnik

Dipl. -Ing.(FH) Holger Niedermaier

Die elektrische Erde

Sie umgibt uns überall, ist Teil und relevanter Faktor jeder elektrischen Anlage, Grundlage vieler Schutzmaßnahmen, wird getrennt, verbunden und in sie alles Mögliche abgeleitet.

Obwohl sie eine so wichtige Rolle spielt, bleibt die elektrische Erde für viele vom Fach etwas eigenartig, mysteriös und aus elektrotechnischer Sicht langweilig. Dabei stellt das Thema Erdung nicht nur ein wichtiges, sondern vor allem auch spannendes Thema dar. Mit diesem Artikel möchte ich der elektrischen Erde etwas "zu ihrem Recht verhelfen" und Sie, verehrte Leserinnen und Leser ermutigen, sich mehr mit diesem Mysterium auseinanderzusetzen.

Dabei soll es weniger um die richtige Planung, Auslegung und Ausführung der Erdungsanlage gehen. Themen, mit denen sich viele Fachartikel und Fachbücher bereits beschäftigen. Vielmehr geht es um die spannende Physik, welche dieser elektrischen Erde zugrunde liegt und ihre theoretische sowie messtechnische Behandlung.

Begriffe

Lassen Sie mich zunächst einige Begriffe mit Ihnen abstimmen, damit wir uns im weiteren Verlauf dieses Lobliedes an die Erde auch immer richtig verstehen.

Erde: Unter Erde verstehen wir allgemein einen räumlichen Bereich, welchem wir ein elektrisches Potential φ , oft $\varphi = 0V$ zuordnen. Meist betrachten wir nur zwei Dimensionen, also eine Fläche und schreiben dieser das Potential φ zu. Technisch korrekt ordnen wir einem Punkt P_n dieser Fläche das Potential φ_n zu. Unterstellen wir, dass nicht nur der Punkt P_n sondern auch die ihn umgebende Fläche dieses Potential haben, wird diese Fläche als Äquipotentialfläche bezeichnet. In vielen Anwendungen und elektrischen Anlagen ist es das erklärte Ziel unserer Arbeit, solch eine Äquipotentialfläche durch technische Maßnahmen zu erzeugen.

Die Erde ist weiterhin ein elektrischer Leiter endlicher Ausdehnung, welchen wir

als elektrischen Zweipol beschreiben können. In der Wechselstromtechnik ist dieser Zweipol eine komplexe Größe.

Erder: Ein Erder ist die elektrische Verbindung zur Erde, welche wir auf verschiedene Weise herstellen können. Wir unterscheiden *Erder Typ A*, also Einzelerder vertikal oder horizontal und *Erder Typ B* welche sich aus der elektrischen Verbindung von Typ A Erdern ergeben.

ferne oder neutrale Erde: Ein sehr wichtiger Begriff ist die sog. ferne Erde. Er beschreibt eine Fläche, oder richtiger ein Gebiet, welches durch keine Erder beeinflusst wird. Die ferne Erde ist eine Äquipotentialfläche endlicher Ausdehnung, welcher wir in der Regel per Definition das Potential $\varphi_0 = 0V$ zuordnen.

1 Grundlegende Betrachtungen

Bringen wir nun einen Erdspies (Erder Typ A) in die ferne Erde ein, und verbinden diesen Erder mit dem Pol einer Stromquelle. Der zweite Pol der Stromquelle wird an einem weit entfernten Punkt ebenfalls mit Erde verbunden, dann wird es spannend.

Durch den Erder tritt der Strom, welcher durch die Quelle getrieben wird, in die Erde ein. Da die Erde einen elektrischen Leiter darstellt, fließt dieser Strom über das Erdreich und über die mit dem zweiten Pol verbundene Erdungsanlage zurück zur Quelle. Stromfluss bedeutet eine gerichtete Ladungsbewegung, wir erinnern uns,

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1)$$

wenn die Ladungsänderung ΔQ konstant über den Zeitraum Δt ist.

Die Frage ist jedoch, warum bewegen sich die Ladungen eigentlich in diesem Fall durch die Erde? Sie bewegen sich, weil Kräfte auf sie wirken. Diese Kräftewirkung schreiben wir dem elektrischen Feld zu. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich durch Anlegen der Quelle an den Erder und den Gegenerder, ein elektrisches Feld ausgebildet hat. Den ungestörten Feldverlauf eines solchen Einzelerders, zeigt Abbildung 1. Das Feld ist radialsymmetrisch. Die Feldstärke nimmt mit der Entfernung zum Erder ab.

Gleichzeitig bildet auch der Gegenerder, wir unterstellen hier einen Erder gleichen Typs, an den wir die Quelle angeschlossen haben, ein solches, elektrisches Feld aus. Beide Felder überlagern sich nun, man spricht von einer Superposition der Einzelfelder. Das resultierende Feldbild zeigt Abbildung 2.

Durch das elektrische Feld wirken also Kräfte auf die im Material des Erdreiches vorhandenen, freien, negativen Ladungsträger und rufen einen räumlich verteilten Stromfluss, ein sogenanntes elektrisches Strömungsfeld, hervor. Die negativen Ladungen bewegen sich in diesem Feld vom Punkt niedrigsten Potentials zum Punkt höchsten Potentials. In Abbildung 2 wird deutlich, dass es eine senkrechte Fläche zwischen den beiden Erdern gibt, durch welche alle elektrischen Feldlinien senkrecht durchtreten. Diese Fläche

liegt theoretisch exakt in der Mitte zwischen den Erdern. Sie markiert auch den Bereich geringster Feldstärke zwischen den beiden Erdern. Dieser senkrechten Fläche weisen wir das Potential $\varphi_0 = 0V$ zu. Die φ_0 Linie stellt die weit entfernte Erde dar. Die elektrische Feldstärke auf dieser senkrechten Fläche ist $E = E_{min}$. Den Verlauf der elektrischen Feldstärke¹ und des elektrischen Potentials¹, bei einer Anordnung wie in Abbildung 2, zeigen Abbildung 3 und Abbildung 4. Doch wie hängen jetzt der Strom und die Feldstärke zusammen? Sie ahnen es wahrscheinlich schon, auch in der Erde gilt das ohmsche Gesetz. Dieses angewendet ergibt:

$$J = \kappa \cdot E \quad (2)$$

wobei J die Stromdichte in $\frac{A}{m^2}$ und κ der *spezifische Leitwert* des Erdbodens ist. Mit diesem spezifischen Leitwert werden wir uns später noch kurz auseinandersetzen. Wenden wir uns noch einmal kurz der Stromdichte zu. Die Interpretation von Gleichung 2 auf Abbildung 3 liefert uns einen wichtigen Zusammenhang. Der über den 1. Erder eingespeiste Strom I verteilt sich demnach mit wachsender Entfernung von diesem über die Querschnittsfläche der ihn umgebenden Erde. Die Stromdichte J nimmt mit wachsender Entfernung vom Erder immer weiter ab. Ihr Minimum erreicht sie genau in halbem Abstand zwischen dem ersten und dem zweiten Erder. Danach wirkt sozusagen der zweite Erder und beginnt den Stromfluss wieder zu bündeln, bis die Stromdichte wieder ihren Anfangswert annimmt.

Gleichung 2 liefert jedoch noch einen weiteren, sehr wichtigen Zusammenhang. Bei gegebenem Erdstrom, z.B. dem Erdschlussreststrom einer Mittelspannungsanlage, ist die sich einstellende Feldstärke maßgeblich vom spezifischen Leitwert des Erdbodens im Bereich der Erder abhängig. Jetzt wird es, im wahrsten Sinne des Wortes, spannend. Vielleicht ist dem ein oder anderen geneigten Leser der Zusammenhang

$$U_{nm} = \int_n^m \vec{E} \cdot \vec{ds} \quad (3)$$

noch in grausiger Erinnerung aus der Meister-/oder Technikerschulzeit. Gleichung 3 drückt vereinfacht aus, dass die Spannung zwischen einem Punkt P_n und einem Punkt P_m im elektrischen Feld der Erder gleich der Fläche ist, welche die Feldstärkekurve, siehe Abbildung 3, zwischen dem Punkt P_n und dem Punkt P_m mit der x-Achse einschließt². Und hier lauert eine wichtige Fragestellung für uns Elektriker. Wird, bei gegebenem Erdstrom und spezifischem Leitwert des Erdbodens diese Spannung im Abstand des Schrittes eines Menschen (ein Fuß steht auf dem Punkt P_n , ein anderer auf dem Punkt P_m) zu groß, kommt es zu einer gefährlichen Durchströmung des menschlichen Körpers³.

Befindet sich ein leitfähiges Teil, z.B. der Pfahl eines Zaunes, im elektrischen Feld der

¹vereinfachte Darstellung

²die integrale Schreibweise ist hier notwendig, da sich mit der Entfernung auch die Größe der Feldstärke ändert

³noch kritischer sind diese Schrittspannungen oft für Nutztier z.B. Kühe, da diese mit ihrem Schritt eine länger Strecke überbrücken. Dies ist z.B. der Grund, warum es immer wieder zu toten Kühen auf Weiden bei Blitzschlag kommt

Erder, so nimmt auch dieser das Potential seines Standpunktes an. Wird ein solches fremdes, leitfähiges Teil berührt kann es ebenfalls zum Überbrücken einer gefährlichen Potentialdifferenz und einer resultierenden, gefährlichen Körperdurchströmung kommen. Die beschriebenen Spannungen werden als *Schrittspannung* und *Berührungsspannung* bezeichnet. Sie lassen sich messtechnisch erfassen und durch spezifische Erdungsmaßnahmen steuern⁴.

2 Messtechnische Bewertung der Erde und der Erdung

Im vorangegangene Text habe ich versucht, Ihnen einen Vorstellung über die elektrotechnischen "Abläufe" oder besser Zusammenhänge der elektrischen Erde zu geben. Unter Ausnutzung dieses Wissens können wir mit Hilfe geeigneter Messverfahren die Erde bzw. die Erdungsanlage messtechnisch untersuchen und eine Aussage darüber ableiten, "wie gut die Erdung" unserer Anlage ist.

Durch Anwendung der Zusammenhänge aus Gleichung 2 und Gleichung 3, ist eine messtechnische Bestimmung des spezifischen Leitwertes bzw. Widerstandes der Erde möglich. Meist wird hierzu das sog. *WENNER Messverfahren* angewendet. Mit diesem lässt sich der *spezifische Erdwiderstand* in verschiedenen Tiefen messtechnisch erfassen. Der spezifische Erdwiderstand ist dabei definiert als Durchgangswiderstand eines Würfels mit der Kantenlänge 1m. Es kann sehr hilfreich sein, diesen Wert vor der Planung einer Erdungsanlage zu ermitteln.

Um eine bestehende Erdungsanlage zu beurteilen, lässt sich der *Erdungswiderstand* der Anlage messtechnisch erfassen. Hierzu wird ein, seiner Größe nach bekannter, elektrischer Strom über die Erdungsanlage und die Erde hin zu einem Gegenerder eingespeist, wie oben beschrieben, und der Verlauf des Potentials messtechnisch erfasst. Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, nimmt das elektrische Potential mit wachsendem Abstand zum zu messenden Erder dem Betrage nach ab. Der zwischen diesem Erder und einem beliebigen Punkt auf einer Strecke zwischen diesem und dem Gegenerder gemessene Betrag der elektrischen Spannung, nimmt demnach zu. Dabei wird die Zunahme mit wachsender Entfernung immer geringer. Bei genügend großer Entfernung zwischen dem zu messenden Erder und dem Gegenerder, lässt sich ein Bereich identifizieren, in welchem die gemessene Spannung über einige Meter Strecke nahezu konstant bleibt. Wir befinden uns nun in dem sehr flachen Verlauf in Abbildung 4 und demnach in der *fernen/neutralen Erde*. Die gemessene Spannung ist die Erdungsspannung der Anlage bei gegebenem Erdstrom. Aus dem Zusammenhang

$$R_A = \frac{U_e}{I_e} \quad (4)$$

kann der Erdungswiderstand des zu prüfenden Erders berechnet werden. Die Berechnung erledigt meist schon das Messgerät für uns. Da in der Regel nicht mit Gleichstrom, sondern mit niederfrequenten Wechselströmen gemessen wird, ist der ermittelte Wert eigentlich kein ohmscher Widerstand R_A sondern eine *Impedanz* Z_A der Erdungsanlage. Bewegen wir uns nun, auf gedachter Linie zwischen Erder und Gegenerder, weiter

⁴sog. Potentialsteuerung

Richtung Gegenerder, so nimmt nach Abbildung 4 der Betrag der gemessenen Spannung wieder zu. Wir bewegen uns sozusagen aus der neutralen Erde in den Einflussbereich des Gegenerders. Wie wir bereits in Abbildung 3 und Abbildung 4 erkennen können, ist die Abmessung des Bereichs, in dem sich das elektrische Potential nur sehr gering ändert, abhängig von der Entfernung der beiden Erder zueinander.

Ist die Entfernung zu gering, ist eine Identifikation des Bereichs nicht möglich. Ist die Entfernung zu groß lässt sich das Gebiet nicht mehr richtig eingrenzen. Ist der Abstand zwischen Erder und Gegenerder richtig gewählt, bleiben die Messwerte um den Punkt P_{φ_0} nahezu konstant. Dies lässt sich durch schrittweise Messung des Potentialverlaufs sehr gut feststellen. DIN VDE 0100-600 schlägt z.B. einen Bereich $\pm 6\text{m}$ um den Punkt P_{φ_0} vor. In Abbildung 5 sind zwei schrittweise gemessene Potentialverläufe⁵ dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass sich in der Messkurve mit 50m Erderabstand der Bereich um P_{φ_0} nicht sicher identifizieren lässt. In der Kurve der Messwerte bei einem Abstand zum Gegenerder von 75m hingegen, zeigt sich dieser Bereich deutlich. Der Widerstand der Erdungsanlage kann aus dieser Kurve an dieser Stelle entnommen werden.

Fazit

Die elektrische Erde ist keinesfalls so langweilig, wie es auf den ersten Blick scheint. Betrachtet man die physikalischen Grundlagen, welche sich hinter dem Thema verbergen, etwas genauer, stellt man fest, dass man sich in mitten spannender Elektrotechnik befindet. Unter Anwendung dieser lassen sich messtechnische Verfahren entwickeln und verstehen, welche es dem Fachmann ermöglichen, eine bestehende Erdungsanlage oder die Erde detailliert zu beurteilen und Maßnahmen zu deren Verbesserung abzuleiten. Gleichzeitig wird das Zusammenspiel einer Erdungsanlage im Wirkungsfeld weiterer Erdungsanlagen⁶ deutlich.

Durch das Wissen über die physikalischen Grundprinzipien lassen sich geeignete Messanordnungen aufbauen und Messfehler vermeiden.

⁵Messwert bereits in Ohm umgerechnet

⁶ein sogenanntes globales Erdungssystem

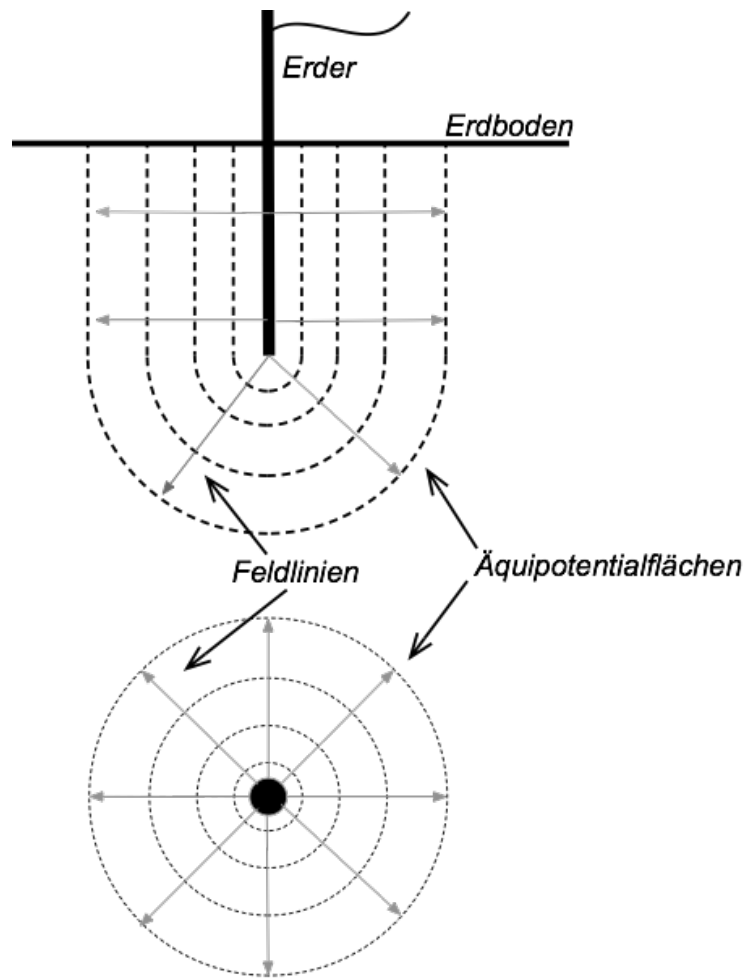


Abbildung 1: Feldbild und Potentialverlauf eines Staberders

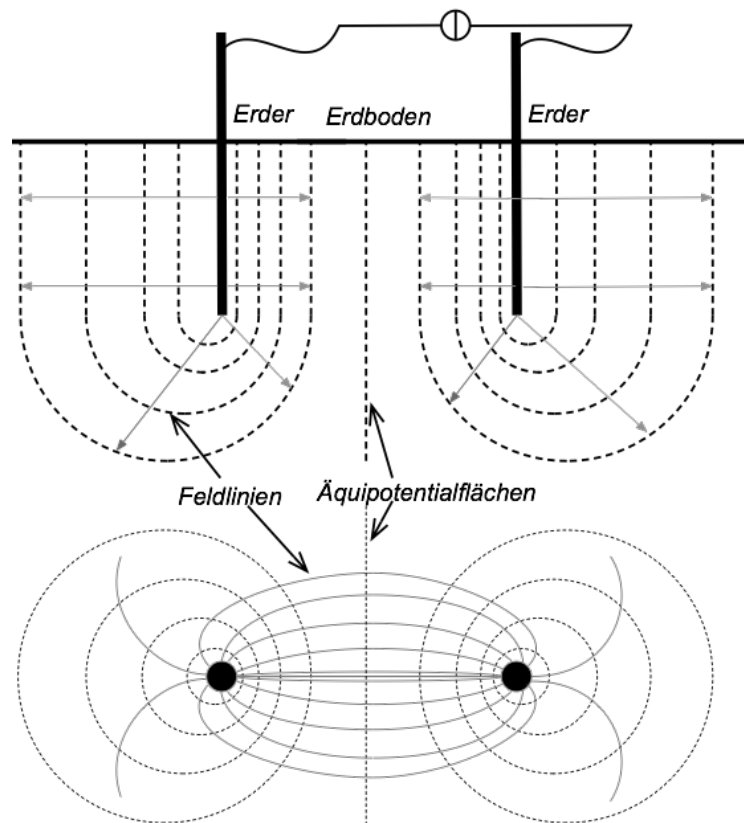


Abbildung 2: Feldbild und Potentialverlauf eines Staberders

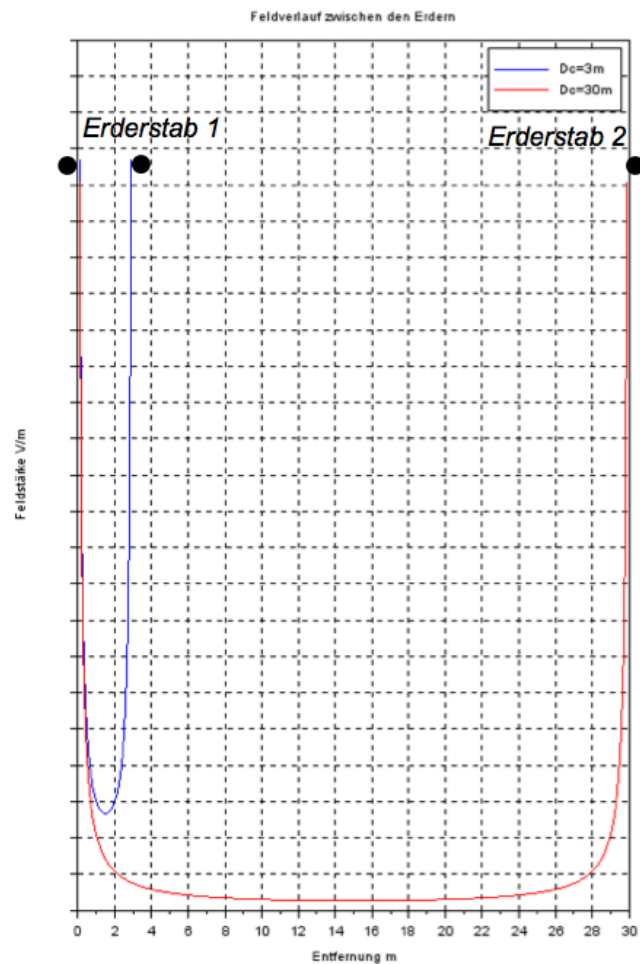


Abbildung 3: Verlauf der Feldstärke zwischen zwei tief eingebrachten Staberden für eine Entfernung von 3 bzw. 30m

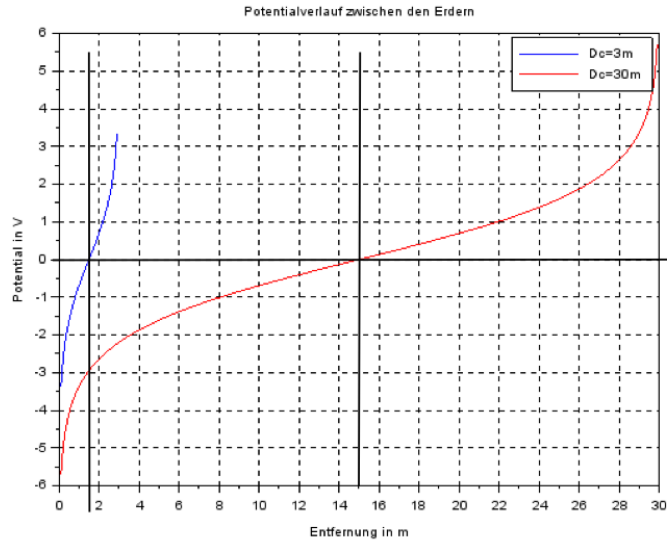


Abbildung 4: Verlauf des elektrischen Potentials zwischen zwei tief eingebrachten Sta-
berdern für eine Entfernung von 3 bzw. 30m

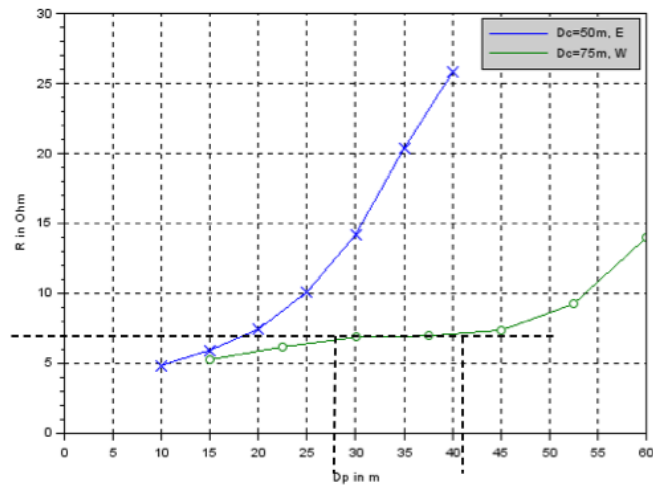


Abbildung 5: Messwerte Verlauf des Widerstandes über die Entfernung vom Erder