

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch



Kornel Köstli
Bundesamt für Umwelt, BAFU
Abteilung Lärm und NIS
3003 Bern

Aufarbeitung der CONOR Forschungsergebnisse für den Vollzug – Update des Berichts: Empa-Nr. 452'574

Untersuchungsbericht: Empa-Nr. 452'574-2
Ihr Auftrag vom: 30. Mai 2016
Anzahl Seiten inkl. Beilagen: 10

Inhaltsverzeichnis

- 1 Zusammenfassung
- 2 Auftrag
- 3 Begriffsklärung
- 4 Einfluss der Alterung oder gezielten Seilbehandlung auf den Koronalärm und dessen Beurteilung
- 5 A-Pegel Rechenmodell zur Koronalärmprognose
- 6 100 Hz Rechenmodell zur Koronalärmprognose
- 7 Bedeutung der 100 Hz-Komponente bei der Koronalärmbeurteilung
- 8 Hinweise für eine auf Berechnungen basierende LSV Beurteilung
- 9 Referenzen

Dübendorf, 10. Juni 2016

Der Projektleiter:

K. Heutschi

Abteilung Akustik / Lärminderung

Der Abteilungsleiter:

K. Eggenschwiler

Änderungen gegenüber dem Bericht Empa-Nr. 452'574 von 2010.

- **Kapitel 5, A-Pegel Rechenmodell zur Koronalärmprognose:** Hinweis auf Java-Applikation zur E-Feldberechnung, die auf der Bafu Homepage frei zur Verfügung steht.
- **Kapitel 7, Bedeutung der 100 Hz-Komponente bei der Koronalärmbeurteilung:** Neue Empfehlung zur Vergabe des Zuschlags für Tonhaltigkeit.
- **Altes Kapitel 8, Minimaldistanz für Planungswerteinhalten einer typischen 380 kV Leitung gemäss EPRI Ansatz:** Gestrichen, da konsequent eine individuelle Feldstärkeberechnung durchgeführt werden muss.
- **Altes Kapitel 9, jetzt Kapitel 8, Hinweise für eine auf Berechnungen basierende LSV Beurteilung:** Neue Empfehlung zur Vergabe des Zuschlags für Tonhaltigkeit.

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Lärmbekämpfung, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Empa, Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik / Lärminderung

Autor: Kurt Heutschi

Begleitung BAFU: Kornel Köstli

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Freigabe BAFU: 13. Juni 2016

1 Zusammenfassung

In den 2006 bzw. 2009 abgeschlossenen Forschungsprojekten CONOR I und II [1], [2] hat die Fachgruppe Hochspannungstechnologie der ETH Zürich bedeutende wissenschaftliche Erkenntnisse zum hörbaren Koronalärm von Hochspannungsfreileitungen erzielt. Als zentrales Element wurde ein physikalisches Modell zur Entstehung der 100 Hz Reintonkomponente entwickelt. Parallel dazu wurden umfangreiche Untersuchungen zu Form und Population der Wassertropfen auf einem Leiterseil durchgeführt. Es zeigte sich, dass hydrophile Oberflächen eine aus akustischer Sicht günstigere Wasserverteilung zur Folge haben, was insbesondere bei der 100 Hz Komponente signifikante Pegelreduktionen bewirken kann. Aus diesen Einsichten ergaben sich Strategien zur Erhöhung der Hydrophilie von Leiterseilen wie Beschichten oder Aufrauen. In Experimenten an bestehenden Leitungen zeigte sich, dass die Hydrophilie von Leiterseilen mit zunehmendem Alter anwächst. Gealterte Leitungen profitieren also nicht von einer Oberflächenbehandlung, eine solche Massnahme kann sich aber beim Einsatz neuer Seile günstig auswirken.

Im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche wurden in CONOR Formeln zur Abschätzung des A-Pegels untersucht. Dabei hat sich der von der US-amerikanischen Research Facility des Electric Power Research Institute publizierte EPRI-Ansatz als am geeignetsten herausgestellt. Er setzt sich zusammen aus einem Emissionsterm, der die Leitungsgeometrie, die effektiven elektrischen Feldstärken und die Regenintensität berücksichtigt und einem Ausbreitungsterm, der den Abstand von der Leitung zum Empfänger einbezieht. Der EPRI-Ansatz ist einfach handhabbar und könnte sich für künftige Prognosen von Koronalärm von Hochspannungsleitungen anbieten.

2 Auftrag

Im Rahmen der von der ETH-Zürich bearbeiteten Forschungsprojekte CONOR I und CONOR II sind bedeutende wissenschaftliche Ergebnisse zum hörbaren Koronalärm von Hochspannungsfreileitungen erzielt worden. Das Hauptaugenmerk lag auf der physikalischen und rechnerischen Modellierung der tonalen 100 Hz Komponente sowie der Entwicklung möglicher Massnahmen zu deren Reduktion. Zur Berechnung des breitbandigen Knistergeräusches (A-Pegel) wurde eine umfassende Literaturrecherche angestellt. Mit Vertrag vom 28.5.2009 beauftragte das Bafu die Empa Abteilung Akustik, die in den Projekten CONOR I und II gewonnenen Erkenntnisse für den Lärmschutz-Vollzug aufzuarbeiten. Insbesondere waren folgende Aspekte zu beleuchten:

- Bedeutung einer Veränderung der Stärke der 100 Hz Komponente (durch Massnahmen wie Beschichtung oder durch Alterung) hinsichtlich der Beurteilung nach LSV. Dabei interessieren der Einfluss auf den A-Pegel sowie der Tonhaltigkeitszuschlag.
- Anwendbarkeit des CONOR-Rechenmodells zur Abschätzung der 100 Hz Komponente in der Praxis.
- Anwendbarkeit des aufgrund der Literaturstudie vorgeschlagenen A-Pegel Rechenmodells (EPRI) in der Praxis und Implementierbarkeit in bestehende Umgebungen wie z.B. Cadna.

Überdies interessiert, ob generell eine Massnahme gefordert werden soll, wenn neue Leiterseile installiert werden, z.B. Beschichtung oder Aufrauen.

3 Begriffsklärung

Koronageräusch

Koronageräusche können an Hochspannungsfreileitungen unter gewissen Wetterbedingungen wie Nebel, Regen oder Schnee entstehen. Das Geräusch setzt sich meistens aus einer breitbandigen Knisterkomponente und einer 100 Hz Reintonkomponente zusammen. Hinter den beiden Anteilen stehen unterschiedliche Entstehungsmechanismen, so dass sie nicht zwingend gleichzeitig auftreten müssen.

Hydrophilie

Hydrophilie ist eine Oberflächeneigenschaft und bedeutet „wasserliebend“ oder „wasseranziehend“. Bei der Benetzung von hydrophilen Oberflächen bilden sich kaum Tropfen, das Wasser verteilt sich in Form eines Films. Die Tangenten an die Wasserränder bilden mit der Körperoberfläche einen sehr kleinen Winkel (sogenannter Kontaktwinkel).

Elektrische Feldstärke

Körper mit einem von ihrer Umgebung verschiedenen elektrischen Potenzial sind von einem elektrischen Feld umgeben. Dieses Feld wird durch die lokal variable Feldstärke charakterisiert. Die elektrische Feldstärke ist ein Mass für die Fähigkeit, eine elektrische Kraft auf ein geladenes Teilchen auszuüben.

4 Einfluss der Alterung oder gezielten Seilbehandlung auf den Koronalärm und dessen Beurteilung

Basierend auf der CONOR Literaturrecherche und anhand im Projekt gewonnener Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die Hydrophilie der Leiterseiloberflächen einen wesentlichen Einflussfaktor für die Koronageräuschemission darstellt. Hohe Hydrophilie reduziert das Koronageräusch, wobei diese Reduktion umso grösser ausfällt, je geringer die Regenrate und je geringer die Randfeldstärke ist. Der Einfluss der Hydrophilie ist vor allem bei der 100 Hz Reintonkomponente zu beobachten, bei hohen Feldstärken, wie sie bei Zweierbündeln auf der 380 kV Spannungsebene auftreten, ist der Einfluss auf das A-bewertete Gesamtgeräusch praktisch nicht vorhanden.

Neue, unbehandelte Seile weisen typisch eine geringe Hydrophilie auf. Mit zunehmendem Alter nimmt dann auf Grund von Korrosionsprozessen die Hydrophilie zu.

Im Rahmen des Projekts wurde gezeigt, dass das Aufbringen einer hydrophilen Beschichtung oder mit leicht verminderter Wirkung das Aufrauen mit einer Glasperlenbehandlung neue Seile schneller in den akustisch günstigen Zustand einer gealterten Leitung überführen kann. Da von Koronalärm betroffene Anwohner stark auf Veränderungen der akustischen Landschaft reagieren, bietet sich die Empfehlung an, bei neuer Beseilung einer Leitung auf dem 380 kV Spannungsniveau eine entsprechende Behandlung vorzunehmen um den Pegelanstieg (insbesondere die 100 Hz Komponente) möglichst gering zu halten. Wie durch die messtechnische Untersuchung an der Lukmanierleitung gezeigt werden konnte, bringt dagegen eine Behandlung bei gealterten Seilen aus akustischer Sicht keine Verbesserung.

5 A-Pegel Rechenmodell zur Koronalärmprognose

Im Rahmen von CONOR wurde eine umfassende Literaturrecherche zu publizierten Methoden der Berechnung des Gesamtgeräusches (A-Pegel) durchgeführt. Nach Würdigung verschiedener Unzulänglichkeiten einzelner Ansätze empfehlen die CONOR Autoren die Verwendung des EPRI Formelwerks [3], da dieser Ansatz als einziger eine plausible Abhängigkeit von der Regenstärke formuliert. Die Bedeutung von Nebel oder Schnee oder der Leiterseiltemperatur wird auf Grund fehlender Daten und mit dem Hinweis auf den relativ geringen Einfluss ignoriert. Die EPRI Formel setzt sich aus einem Emissionsterm und einem sehr einfachen Ausbreitungsterm zusammen und liefert damit direkt einen Immissions-Schalldruckpegel. Die totale Immission ergibt sich aus der energetischen Überlagerung der Teilimmissionen aller einzelnen Bündel.

Ausgehend von einem Bündel bestimmt sich der Immissionspegel L_p zu

$$L_p = \text{Emissionswert} - \text{Ausbreitungsdämpfung} \quad (1)$$

Emissionswert

Der Emissionswert ist abhängig von der Anzahl Teilleiter n des Bündels, vom Durchmesser d der Teilleiter in [cm], vom Durchmesser D des Bündels in [cm], von der effektiven Feldstärke E in [$kV_{\text{eff}}/\text{cm}$] und von der Regenintensität r in [mm/h] (Abbildung 1).

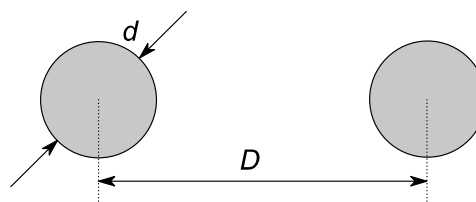


Abbildung 1: Parameter zur Beschreibung der Leiterseilgeometrie am Beispiel eines Zweierbündels.

Die effektive Feldstärke E entspricht dem arithmetischen Mittel aller einzelnen maximalen (entlang der Kontur des Leiterseils) effektiven Randfeldstärken der Teilleiter über das ganze Bündel. Für die Abschätzung dieser Randfeldstärken existieren unter vereinfachenden Geometrieannahmen analytische Formeln, z.B. [4]. Da sich aber zeigt, dass die akustische Emission sehr sensitiv auf diese Grösse reagiert, ist unbedingt zu empfehlen, hierzu Simulationsprogramme zur numerischen Lösung der Elektrostatik-Differenzialgleichungen einzusetzen. Solche Simulationen stellen für die Leitungsbetreiber keine Schwierigkeit dar und man darf davon ausgehen, dass diese Grösse bereitgestellt werden kann. Überdies stellt das Bafu auf seiner Homepage eine Java-Applikation zur Verfügung, die diese Feldberechnung vornehmen kann. Da E proportional mit der Betriebsspannung zusammenhängt, muss diese genau bekannt sein. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass diese Spannung typisch einige Prozent über dem Nominalwert liegt.

Im Original-EPRI Formelsatz werden Statistikpegel L_5 und L_{50} angegeben. Diese Differenzierung bildet eine bestimmte Verteilungsfunktion der Regenintensität ab. Zusätzlich zeigen Diagramme Anpassungen an andere Regenraten. Aus der Spezifikation in EPRI geht die Bezugszeit des L_{50} Pegels nicht völlig klar hervor.

Mit Wissen um einen monotonen Zusammenhang zwischen Regenintensität und Koronapegel wird hier aber angenommen, dass der L_{50} von EPRI als Momentanpegel interpretiert werden darf. Mittels Kurvenanpassung der Diagramme (siehe Anhang) lässt sich für den Emissionsterm als Momentanpegel bei der Regenintensität r in [mm/h] schreiben:

für $n < 3$:

$$\text{Emissionswert} = 20\log_{10}(n) + 44\log_{10}(d) - 39.1 - \frac{665}{E} + K_n + A_{wc} + D_r + 114.3 \quad (2)$$

mit

$$K_n = 7.5 \text{ dB(A)} \text{ für } n = 1 \text{ bzw. } K_n = 2.6 \text{ dB(A)} \text{ für } n = 2$$

$$A_{wc} = 8.2 - \frac{346.5}{E \cdot d^{0.24}} \text{ [dB(A)]}$$

$$D_r = -4.0 + 4.0 \cdot r^{0.34} \text{ [dB(A)]}$$

für $3 \leq n \leq 8$:

$$\text{Emissionswert} = 20\log_{10}(n) + 44\log_{10}(d) - 46.4 - \frac{665}{E} + 22.9(n-1)\frac{d}{D} + A_{wc} + D_r + 114.3 \quad (3)$$

mit

$$A_{wc} = 10.4 - \frac{346.5}{E \cdot d^{0.24}} + 8(n-1)\frac{d}{D} \text{ [dB(A)]}$$

$$D_r = -4.0 + 4.0 \cdot r^{0.34} \text{ [dB(A)]}$$

Ausbreitungsdämpfung

Das Ausbreitungsmodell ist äusserst einfach formuliert:

$$\text{Ausbreitungsdämpfung} = 10\log_{10}(R) + 0.02R \quad (4)$$

mit R : Abstand in [m]

Nebst der geometrischen Verdünnung für eine Linienquelle wird eine distanzproportionale Dämpfung angesetzt, die eine A-bewertete Luftdämpfung abbildet. Eine Bodenreflexion wird generell nicht berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass die durchschnittliche Wirkung des Bodens im Emissionswert abgebildet ist.

Jahres-Leq

Mit obigen Formeln und einer jährlichen Auftretenshäufigkeit von Regenintensitätskategorien lässt sich ein Jahres-Leq für den Koronalärm bestimmen. Da keine ausgeprägten Tag/Nacht Unterschiede in der Regenhäufigkeit existieren und die Nachtgrenzwerte wesentlich tiefer liegen, genügt für Grenzwertbetrachtungen die Untersuchung der Nachtperioden.

Insgesamt erscheint das EPRI-Formelwerk plausibel und könnte in der hier modifizierten Version künftig als Standard zur rechnerischen Prognose in der Schweiz empfohlen werden. Die Formeln sind einfach und daher leicht von Hand auswertbar bzw. in bestehende Modelle wie z.B. Cadna implementierbar (unter Ausschaltung des Bodeneffekts).

Zahlenbeispiel:

(Situation Lukmanierleitung bei Sedrun)

	Bündel L1	Bündel L2	Bündel L3
Anzahl Teileiter des Bündels n	2	2	2
Teileiterdurchmesser d [cm]	3.05	3.05	3.05
Durchmesser des Bündels D [cm]	40	40	40
Effektive Feldstärke E [kVeff/cm] *	16.7	17.7	16.7
Regenintensität r [mm/h]	1.5	1.5	1.5
Abstand zum Immissionspunkt [m]	13.3	12.1	17.8
Teilergebnisse			
K_n	2.60	2.60	2.60
A_{wc}	-7.68	-6.78	-7.68
D_r	0.59	0.59	0.59
Emissionsterm	58.22	61.37	58.22
Immissionspegel [dB(A)]	46.72	50.30	45.36
Totaler Immissionspegel [dB(A)]	52.8		

* bei angenommener Betriebsspannung von 410 kV

Bemerkung:

Der im Zahlenbeispiel gefundene totale Immissionspegel von 52.8 dB(A) vergleicht sich sehr gut mit der durch die Empa im Rahmen von CONOR durchgeführten Messung an der Lukmanierleitung in Sedrun. Diese hat in den Regenperioden bei einer durchschnittlichen Regenintensität von 1.5 mm/h einen Wert von 51.9 dB(A) ergeben.

6 100 Hz Rechenmodell zur Koronalärmprognose

Im Rahmen von CONOR wurde ein Rechenmodell zur Prognose der Stärke der 100 Hz Komponente entwickelt. Dieses Modell erlaubt allerdings keine Absolutpegelangabe, sondern beschreibt die Einflussfaktoren auf die elektrische Koronaverlustleistung. Die Umrechnung auf akustische Pegel kann dann unter Ausnutzung der Proportionalität zwischen dieser Verlustleistung und dem akustischem Schalldruck erfolgen. Das Modell ist sehr gut geeignet um Systemunterschiede zu beschreiben und unterstützt damit eher Forschungs- und Entwicklungsbemühungen, die z.B. dahin zielen, günstigere Leiterseilanordnungen zu finden, die weniger Koronaverluste und damit eine geringere 100 Hz Komponente emittieren.

7 Bedeutung der 100 Hz-Komponente bei der Koronalärmbeurteilung

Im Rahmen von CONOR wurde grosses Gewicht auf die 100 Hz-Reintonkomponente des Koronageräusches gelegt. Es konnte gezeigt werden, dass sich bei neuen, mechanisch unbehandelten Leitern eine die Hydrophilie steigernde Beschichtung akustisch sehr günstig bemerkbar macht. Bei älteren Leitungen verschwindet die Wirkung einer Beschichtung, da mit dem Alter die Hydrophilie stark zunimmt.

Anhand eigener Messungen an verschiedenen Leitungen kann ausgesagt werden, dass die unbewertete Koronalärmleistung der 100 Hz Komponente etwa gleich gross ist wie der A-bewertete Koronalärm-Summenpegel. Unter Berücksichtigung der A-Bewertung steuert die 100 Hz Komponente also nur rund 1 % zum A-bewerteten Summenpegel bei. Ein kompletter Wegfall der 100 Hz Komponente würde so gut wie keine Veränderung des A-Summenpegels bewirken, eine Erhöhung der 100 Hz Komponente um 10 dB würde sich in einer Erhöhung des Summenpegels von 0.4 dB(A) widerspiegeln. Insgesamt kann der Einfluss der 100 Hz Reintonkomponente auf den für die LSV-Beurteilung relevanten A-bewerteten Summenpegel vernachlässigt werden.

Dagegen ist die Anwesenheit der 100 Hz Komponente bedeutend für die Vergabe der LSV-Pegelkorrektur K2 zur Berücksichtigung des Tongehalts (LSV-Anhang 6). Es wird empfohlen, bei der Beurteilung von Koronalärm von alten bzw. neuen beschichteten Leitungen in der Regel ein K2 von 4 dB einzusetzen. Bei einer neuen unbehandelten Leitung ist ohne weitere Kenntnisse von einem K2 von 6 dB auszugehen.

8 Hinweise für eine auf Berechnungen basierende LSV Beurteilung

- Die mit dem EPRI Formelwerk berechneten Pegel sind für moderat gealterte Seile (Grössenordnung 1..2 Jahre) als gültig zu betrachten. Neue Zweierbündelleitungen können leicht höhere Pegel verursachen, ebenso führen extreme Verschmutzungen, austretendes Fett und Ziehmittelreste oder Seilbeschädigungen wie aufstehende Drähte zu erhöhter Koronaschallemission.
- Die berechneten Pegel reagieren sehr empfindlich auf die Eingangsgrösse E (Feldstärke). Ausgehend von 16 kV/cm führt eine Änderung von E um 1 % auf eine Pegeländerung von 0.6 dB. Da E linear von der Betriebsspannung abhängt, muss diese genau bekannt und dokumentiert sein. Es wird empfohlen, die Feldstärke mittels eines Simulationsprogramms für die jeweilige Leiterkonfigu-

ration und das gefahrene Spannungsniveau zu bestimmen. Ein gutes Werkzeug ist die von der ETH-Zürich entwickelte und auf der Bafu Homepage bereitgestellte Java-Applikation HVLNoise 1.0.

- Die Berechnung des Jahres-Leq's sollte auf einer lokalen Regenstatistik (Intensität und Auftretenshäufigkeit) basieren. Die Intensitätskategorien können relativ grob eingeteilt sein, da die entsprechende Sensitivität der Emission relativ gering ist. Ausgehend von 1 mm/h führt eine Verdoppelung bzw. Halbierung zu einer Veränderung um rund 1 dB. Für eine erste quantitative Einschätzung kann von einer 8 % Häufigkeit der Niederschlagsintensität 1mm/h ausgegangen werden (gilt für Zürich), entsprechend einer zeitlichen Verdünnung von -11 dB.
- Wie oben angesprochen reduziert eine geeignete Beschichtung die tonale Komponente einer neuen Leitung deutlich. Es wird daher empfohlen, bei behandelten und alten Leitungen K2 mit 4 dB einzusetzen, für neue unbehandelte Leitungen ist K2 = 6 dB anzunehmen.

9 Referenzen

- [1] U. Straumann, T.H. Teich, C. Roero, M. Semmler, H.-J. Weber: Schlussbericht des Projekts CONOR, ETHZ, Fachgruppe Hochspannungstechnologie, 2006.
- [2] U. Straumann, H.-J. Weber, Abschlussbericht zum Projekt Corona Noise Reduction CONOR II, ETHZ, Fachgruppe Hochspannungstechnologie, 2009.
- [3] M. Comber, R. J. Nigbor, L. E. Zaffanella: Transmission Line Reference Book – 345 kV and above, Kapitel 6, p. 267-318. Electric Power Research Institute, 3412 Hillview Avenue, Palo Alto, California, 1987.
- [4] A. Larsson, A Special-Case Surface Voltage Gradient Formula, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, p. 1771-1775 (1996).

Anhang: Kurvenanpassung zur Regenabhängigkeit

In [3] werden Korrekturwerte der akustischen Emission zur Berücksichtigung der Regenintensität r angegeben. Diese Korrektur D_r lässt sich wie in Abbildung 5 gezeigt in guter Näherung als funktionaler Zusammenhang wie folgt approximieren:

$$D_r = -4.0 + 4.0 \cdot r^{0.34} \quad [\text{dB(A)}] \quad (5)$$

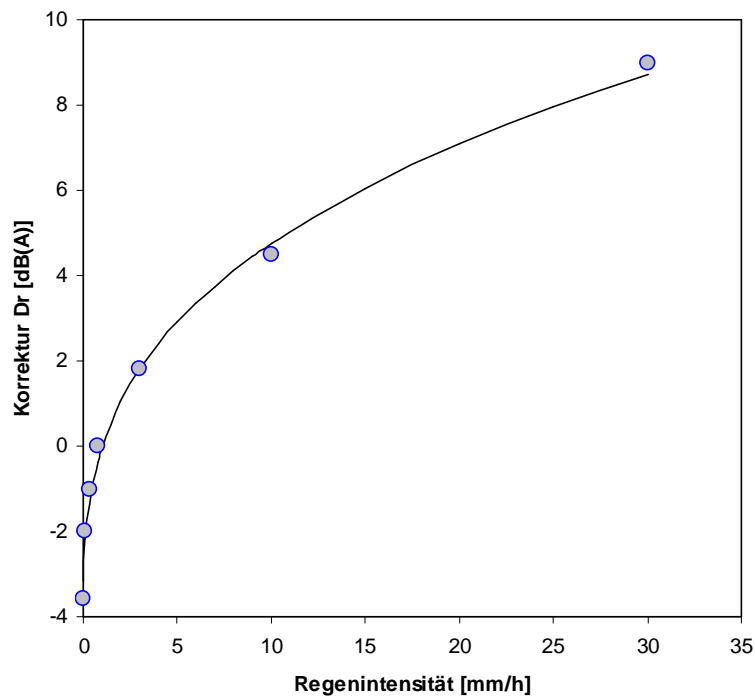


Abbildung 5: Funktionaler Zusammenhang nach Gl. 5 für die Beschreibung der Regenabhängigkeit. Die Punkte repräsentieren die Korrekturwerte aus [3].