

Vorermittlung von Erschütterungsimmissionen gemäß DIN 4150

Anwendung auf Windenergieanlagen



Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Einteilung der Erschütterungsquelle (Windenergieanlage) nach Kategorien

Quellentyp geometrisch	- Punktquelle
Quellentyp zeitlich	- kontinuierliche Quelle
Häufigkeit der Emission	- permanent, nicht zu beeinflussen
Frequenzverteilung	- 1 bis 10 Hz
Einwirkungsbereich (räumlich)	- unbegrenzt
Vorhandensein der Quelle	- dauernd
zeitliche Beeinflussbarkeit	- nicht beeinflussbar

Eine WEA ist ein Quelle an der Erdoberfläche und emittiert daher ganz vorrangig Oberflächenwellen und hier wieder vorrangig solche vom Typ Rayleigh. Bei diesen sind die Vertikalkomponenten der Schwingungsgrößen (wie v) am größten. v bezieht sich bei den folgenden Amplitudenbetrachtungen auf das v_{\max} der Rayleigh-Wellen oder auf I95.



Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

$$v = v_1 (R/R_1)^{-n} \exp^{-\alpha (R-R_1)}$$

oder

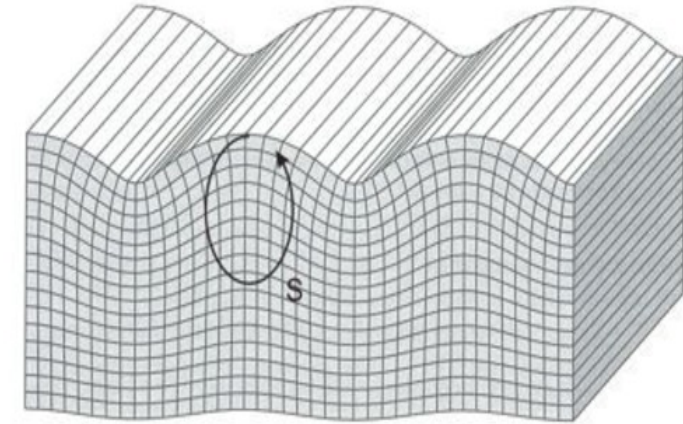
$$\log v = -n \log (R/R_1) - \alpha (R-R_1)$$

Die Abklingkurve der Erschütterungsimmission teilt sich auf in

- den Potentialterm $v_1 (R/R_1)^{-n}$
- den Exponentialterm $\exp^{-\alpha (R-R_1)}$

Der Potentialterm ist die geometrisch bedingte Amplitudenabnahme, für Oberflächenwellen ist $n = 0,5$

Der Exponentialterm ist die durch Dämpfung (Umwandlung in Wärme) bedingte Amplitudenabnahme



Anmerkung für Seismologen:

Die Aufteilung in einen Term der in log-log linear ist (Geometrie) und einen der in log-lin linear ist (Dämpfung) findet sich auch bei der üblichen Magnitudenbestimmung (Jiaspei):

$$M_L = \log_{10}(A) + 1,11 \log_{10}(R) + 0,00189 R - 2,09$$

Parameter, die die Erschütterungsimmission bestimmen

- v die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit in der Entfernung R [m s^{-1}]
- v_1 die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit in der Entfernung R_1 [m s^{-1}]
- R_1 der Bezugsabstand z.B. 100 m [m]
- R die Entfernung von der Quelle [m]
- n der Exponent, der von Wellenart, Quellengeometrie und Art der Schwingung abhängt (hier 0,5) [-]
- α der Abklingkoeffizient, in $\alpha = 2\pi D/\lambda$ [m^{-1}]
- D der Dämpfungsgrad [-]
- λ die maßgebende Wellenlänge, $\lambda = c_r/f$ [m]
- c_r die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle [m s^{-1}]
- f die Frequenz, in Hz [s^{-1}]
- \exp die Euler'sche Zahl [-]

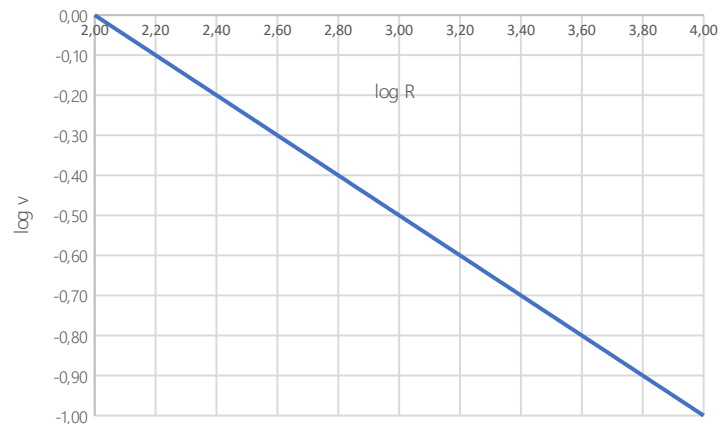
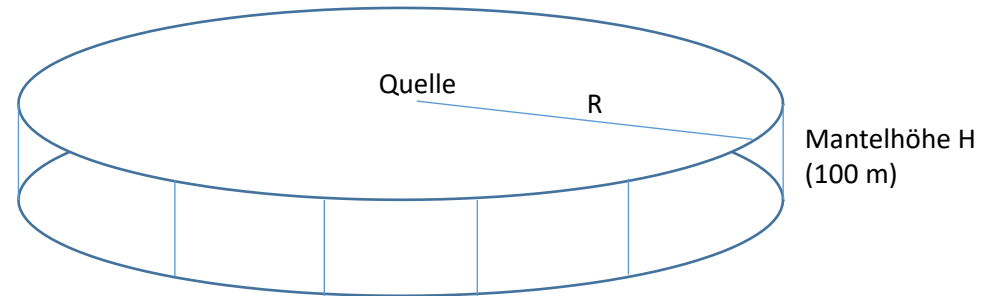


Die geometrische Amplitudenabnahme:

$$v = v_1 (R/R_1)^{-n} \text{ oder } \log v = -n \log (R/R_1) = -0,5 \log (R/ R_1)$$

Die Physik dahinter:

- Oberflächenwellen breiten sich zylinderförmig aus
- Die Wellenenergie verteilt sich auf die Mantelfläche des Zylinders
- Die Größe der Mantelfläche ist $2\pi R$
- Die Energie nimmt mit $n = 1$ ab
- Die Entfernung R steht in der Basis des Potentialterms
- Die Schwinggeschwindigkeiten nehmen mit $n = 0,5$ ab
- In einer log-log Darstellung ist die geometrische Amplitudenabnahme eine Gerade
- Die geometrische Amplitudenabnahme ist frequenzunabhängig
- Die geometrische Amplitudenabnahme ist unabhängig von der Geologie
- Die geometrische Abnahme lässt sich leicht als Geometriekorrektur bei Messdaten berücksichtigen

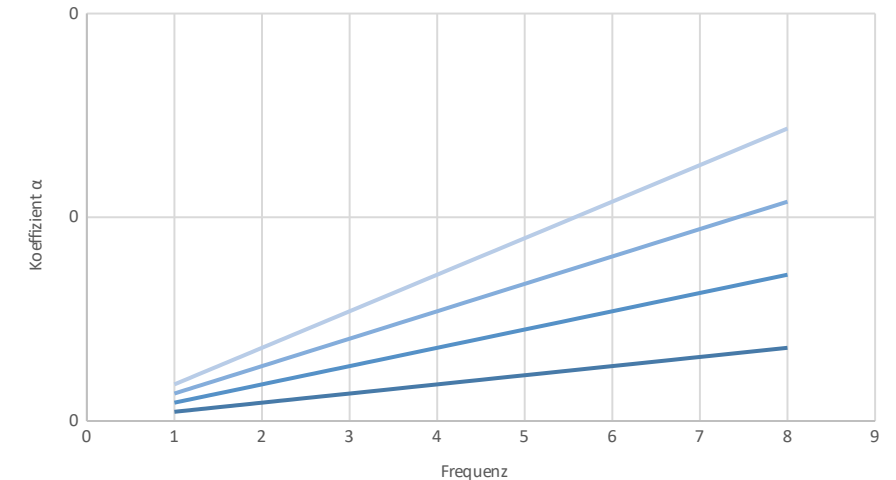


Amplitudenabnahme durch Dämpfung:

$v = v_1 \exp^{-\alpha (R-R_1)}$ oder $\log v = -\alpha ((R-R_1))$

Die Physik dahinter

- Die Formel beschreibt die exponentielle Amplitudenabnahme durch Umwandlung der Wellenenergie in Wärme (Absorption)
- Die Entfernungszunahme $(R-R_1)$ steht im Exponenten des Exponentialterms
- Die Abnahme wird bestimmt durch den Abklingkoeffizienten $\alpha = 2\pi D/\lambda$ [m^{-1}]
- Dabei ist D das Dämpfungsmaß, der Kehrwert von D ist die Güte Q
- Durch die Formel $\alpha = 2\pi D/\lambda$ ergibt sich, dass α linear von λ damit von der Frequenz f abhängt.



Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



2014 EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung



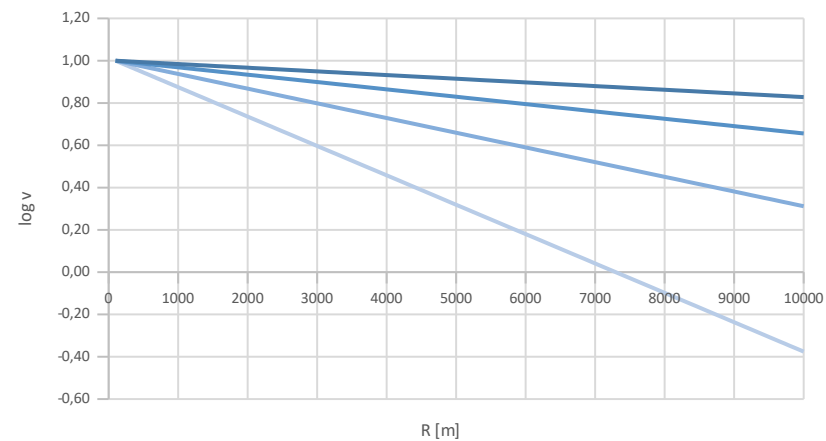
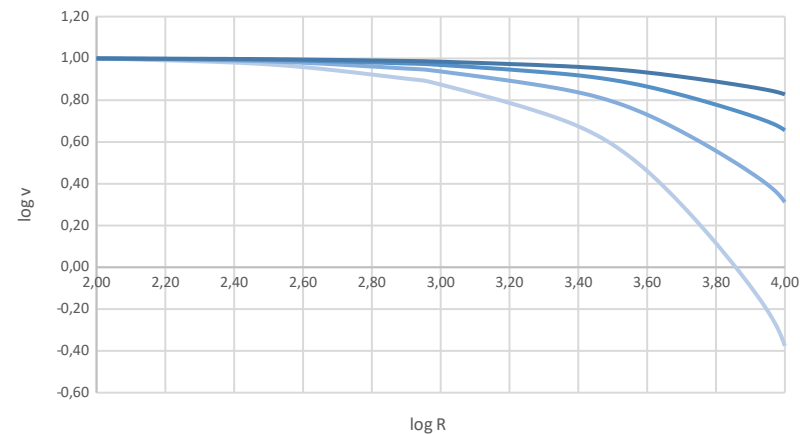
EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Amplitudenabnahme durch Dämpfung:

$$v = v_1 \exp^{-\alpha (R-R_1)} \text{ oder } \log v = -\alpha ((R-R_1))$$

Die Amplitudenabnahme durch Dämpfung ist

- Exponentiell
- Frequenzabhängig
- Abhängig von der lokalen Geologie (ausgedrückt durch D)
- In einer log-lin-Darstellung ist die Amplitudenabnahme durch Dämpfung eine Gerade



Dämpfungsgrade D = 0,01, 0,1, 1, 2, 3, Frequenz 8 Hz



Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



2014 EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung

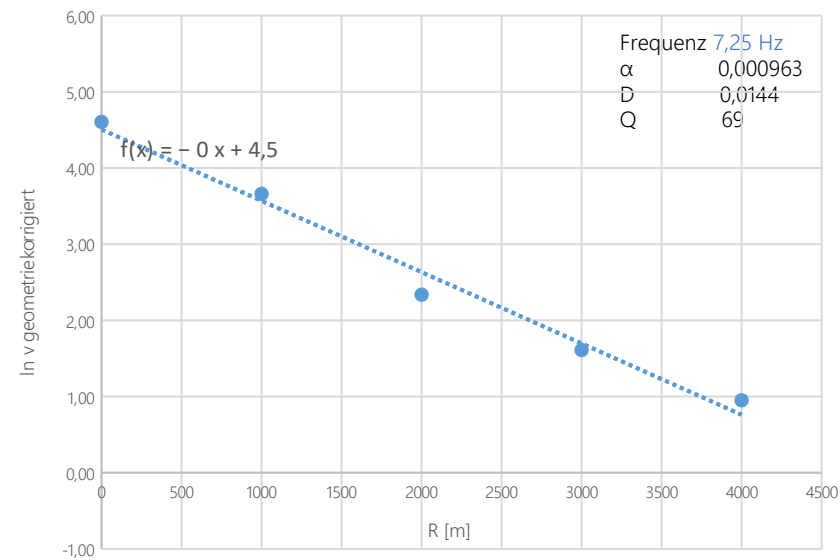
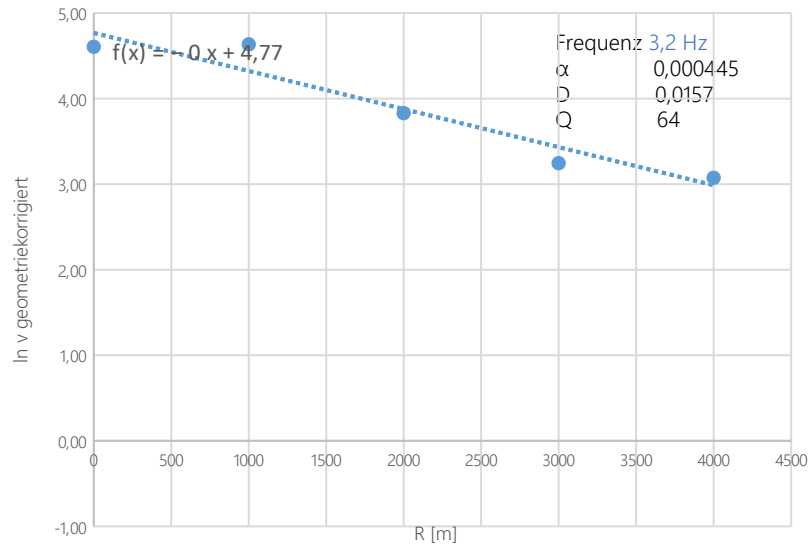


EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Amplitudenabnahme durch Dämpfung: Beispiel

Vorgehensweise:

- Geometriekorrektur
- Auftragen der korrigierten Messwerte in log-lin Darstellung
- Ausgleichgerade α

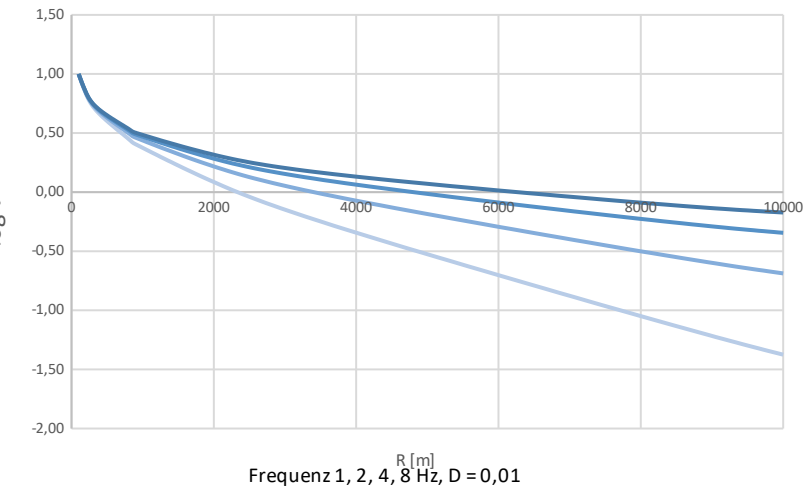
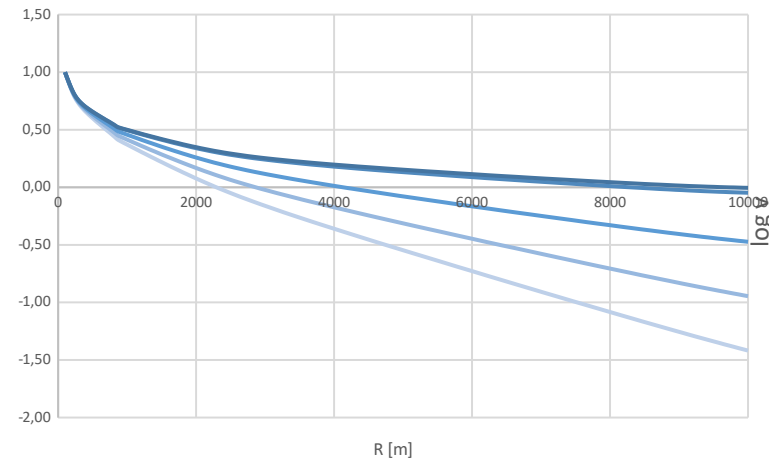
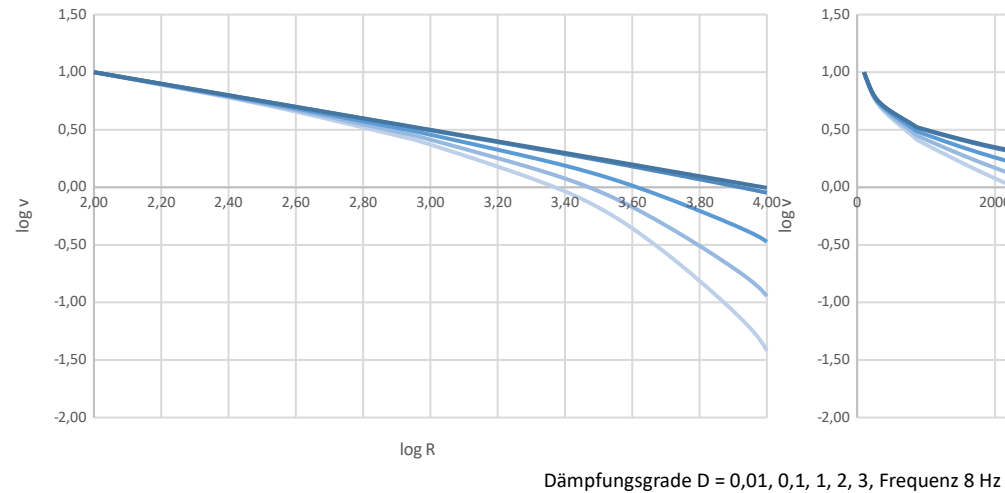


Beide Terme wirken (multiplikativ) zusammen:

$$v = v_1 (R/R_1)^{-n} \exp^{-\alpha(R-R_1)}$$

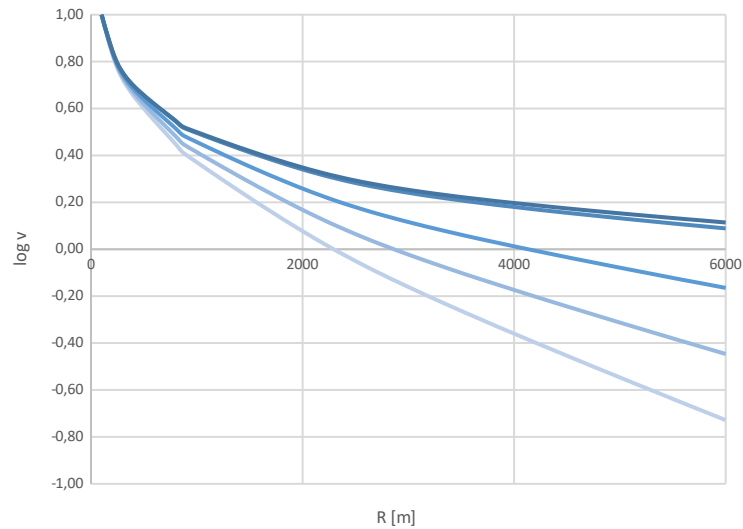
Nochmals zur Physik

- Die Terme Geometrie und Dämpfung haben unterschiedliche physikalische Grundlagen
- Sie lassen sich mathematisch nicht zusammenfassen
- In der hier beschriebenen vereinfachten Form wird die Immissionsausbreitung ausreichend beschrieben, durch die Zylinderform der Wellenausbreitung (Oberflächenwellen) und das Dämpfungsmaß D
- Dies beinhaltet auch die Frequenzabhängigkeit, die als linear angenommen wird

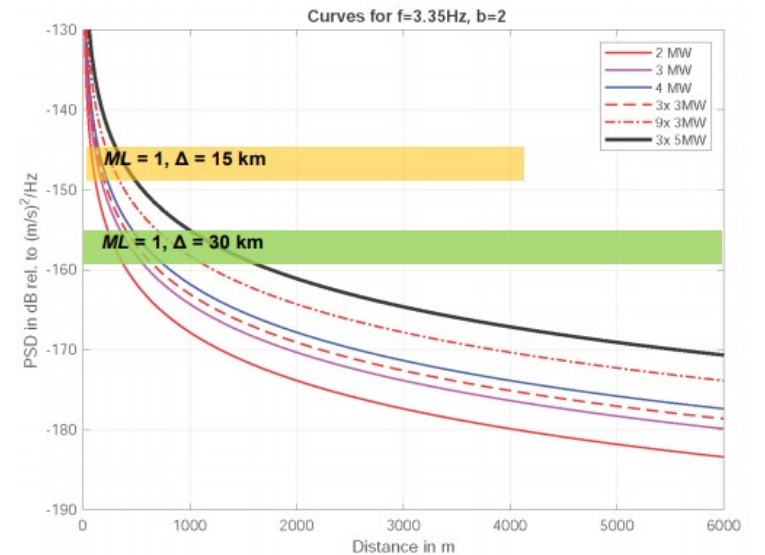
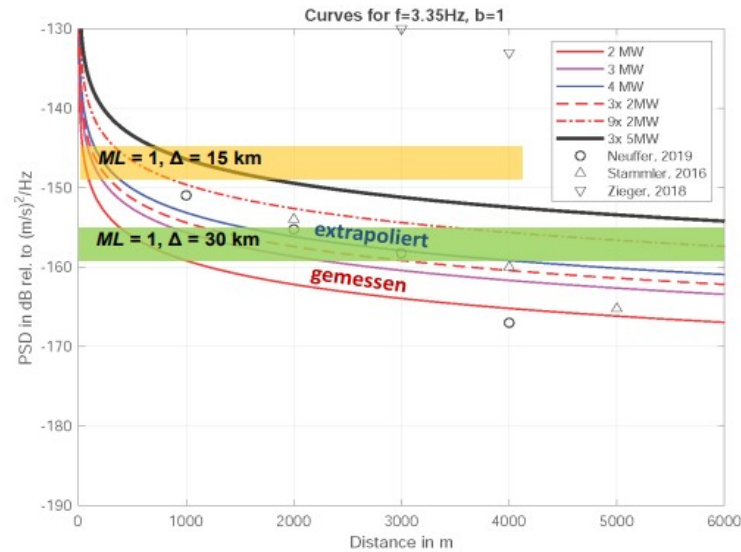


Vergleich der Abklingkurven

$v = v_1 (R/R_1)^{-n} e^{-\alpha (R-R_1)}$ (DIN 4150, Teil1) und PSD (in dB) $\sim R^{-b}$ (Ritter 2021)



Dämpfungsgarde D = 0,01, 0,1, 1, 2, 3, Frequenz 8 Hz



Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



2014 EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Danke



Leitmarkt
Agentur.NRW

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



2014

EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung