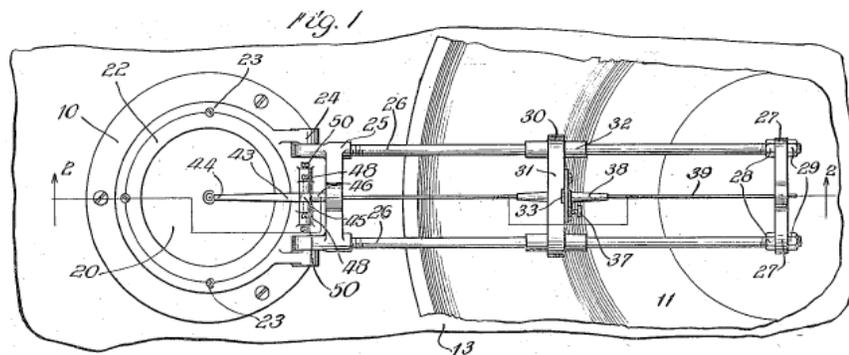


Tonarmgeometrie

1. Einleitung

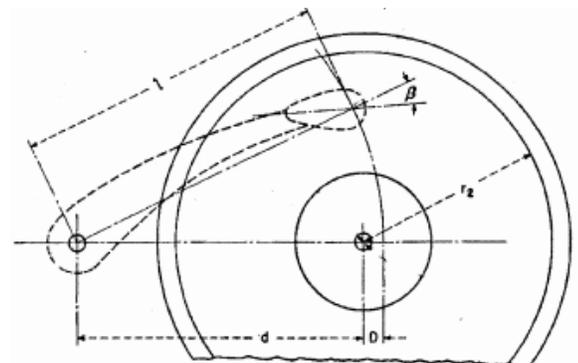
Bekanntermassen wird im ersten Schritt der Schallplattenherstellung, d.h. beim Schneiden der Originalmatrize, der Schneidstichel radial von außen nach innen geführt, so daß er sich immer tangential zu der entstehenden Rille bewegt. Die konsequenterweise beste Art bei der Wiedergabe wäre es, einen Tonarm zu benutzen, der den Tonabnehmer ebenfalls radial über die Platte führt. Aus technischen und Kostengründen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, hat sich der Tangentialtonarm allerdings nicht durchsetzen können.

Interessanterweise wurden schon zu Anfang der Grammophon-Ära, die mit Emil Berliners Erfindung im Jahre 1887 (Deutsches Patent Nr. 45048 vom 8. November 1887) begann, Tangentialarme verwendet, siehe Abb.1.



Der gebräuchlichste Tonarm ist der in einem Drehpunkt gelagerte, endlich lange Tonarm. Der ideale Tonarm wäre unendlich lang, unendlich steif und besäße keine Masse. Aus praktischen Gründen haben heutige Tonarme eine Länge von bis zu ca. 320 mm (gemessen vom Tonarmdrehpunkt bis zur Nadelspitze).

Ein Drehtonarm beschreibt eine kreisbogenförmige Bahn, wobei sich der Tonabnehmer relativ zur Rille (sprich Tangentialrichtung der Rille) dreht, siehe Abb.2. Es entsteht eine Winkelabweichung der Nadelebene von der Tangentialrichtung der Rille, der horizontale Spurfelhwinkel δ , welcher zu Wiedergabeverzerrungen in Form von harmonischen Obertönen (Klirr) sowie Kombinations-, d.h. Summations- und Differenztönen (nach Löfgren).



Die ersten Drehtonearme waren gerade, was zu unerwünscht hohem Plattenverschleiß sowie Wiedergabeverzerrungen führte. Der Kreisbogen, den die Nadel während des Abspielens beschrieb, verlief in der Regel derart, daß er durch den Plattenmittelpunkt ging : der maximale Spurfehlwinkel betrug in etwa 7 Grad, bei Armen, bei denen der Bogen zwischen Plattenmitte und Armlager verlief, bis zu 30 Grad.

Der vermutlich erste analytische Ansatz zur Lösung des Problems stammt von Percy Wilson, der sich die Aufgabe gestellt hatte, den Fehlwinkel auf der gesamten Plattenseite erst möglichst einheitlich zu machen und in einem zweiten Schritt zu minimieren.

Dazu führte Wilson das Konzept des Überhangs und des Kröpfungswinkels ein. Mit diesem Ansatz war bei einem 9-Zoll Arm der Fehlwinkel kleiner als 2 Grad [1]. In Folge wurden Tonarme mit abgewinkeltem Kopf verwendet. Wilson versuchte, den absoluten Spurfehlwinkel möglichst klein zu halten. Während bald darauf in Europa Arme mit abgewinkeltem Kopf die Regel waren, dauerte es in den USA noch etwa 20 Jahre, bis gekröpfte Arme auf den Markt kamen.

Eine Variante des Dreharms, bei der der Spurfehlwinkel fast gleich Null ist, ist der 1954 von Burne-Jones entwickelte Pantograph Arm, welcher Typ später im Garrard Zero 100 wiederzufinden war (Abb.3). Der Garrard Arm weist einen maximalen Fehlwinkel von ca. 0,022 Grad auf (zum Vergleich: SME 309 - 0,486 Grad).



Wie erstmals in 1938 von Löfgren dargelegt, verhält sich jedoch die Höhe der Verzerrungen ϵ umgekehrt proportional zum Rillendurchmesser, d.h. bei gleichem Fehlwinkel sind die Verzerrungen im Innenbereich der Platte prozentual höher als im Außenbereich, sie nehmen also von aussen nach innen zu. Daher müsse, so Löfgren, nicht der absolute, sondern der auf den Rillendurchmesser bezogene, gewichtete Fehlwinkel δ/r betrachtet werden [2].

NEEDLE-TRACK ALIGNMENT

By P. WILSON

Our object must therefore be to find first of all the condition that the tracking error should be as uniform as possible, however great, and then reduce it to a minimum by applying the constant divergence. We shall therefore look for the

Über die nichtlineare Verzerrung bei der Wiedergabe von Schallplatten infolge Winkelabweichungen des Abtastorgans

Von Erik Löfgren, Stockholm

$$(22) \quad \epsilon \cong \frac{V}{\Omega} \cdot \frac{\delta}{r}$$

Der erste Faktor ist unabhängig von der jeweiligen Lage des Abtastpunkts auf der Platte, während der zweite Faktor sich dauernd verändert. Es sei hier darauf aufmerksam gemacht, daß in den äußeren Rillen ein größerer Fehlwinkel δ zulässig ist als in den inneren, denn nicht δ , sondern $\frac{\delta}{r}$ ist maßgebend für den Klirrfaktor. Wenn man sich die Sache näher

Es gab in Folge mehrere Ansätze zur Lösung dieses Problems:

ANALYTIC TREATMENT OF TRACKING ERROR AND NOTES ON OPTIMAL PICK-UP DESIGN*

H. G. BAERWALD**

Baerwald 1941 [3]

Summary.—A complete analysis is given of the non-linear distortions due to the tracking error of the pick-up mechanism in the reproduction of lateral-cut disk recordings. The separate treatment of tracking distortion is permissible as long as the overall distortion of the reproduction is tolerable, the system being "almost linear," or the various distortion products superposable.

* Presented at the 1941 Spring Meeting at Rochester, N. Y.; received May 1, 1941.

** The Brush Development Co., Cleveland, Ohio.

Bauer 1945 [4]

Tracking Angle



Distortion due to tracking error can be minimized by bending the pickup arm and overhanging the needle. Equations are developed for determining optimum bending and overhang for any given conditions, and a design chart is provided for use with 12-inch records

By B. B. BAUER

Chief Engineer
Sears Brothers
Chicago, Ill.

Example of well-designed modern tone arm. Proper choice of tilt, set angle and needle overhang reduce tracking-error distortion to a negligible value

point) be mounted on a motor-board with its pivot d inches away from the center of the record, as shown in Fig. 1(a). When the needle point is r inches away from

Seagrave 1956 [5]

by Dr. JOHN D. SEAGRAVE

Part I

MINIMIZING PICKUP TRACKING ERROR

Stevenson 1966 [6]

PICKUP ARM DESIGN—1

DESIGN AND MOUNTING OF ARMS FOR
MINIMUM DISTORTION DUE TO LATERAL
TRACKING ERROR

By J. K. STEVENSON,
B.Sc., Grad. Inst. P., Grad. I.E.E.

11-55

1983 analysierte Graeme F. Dennes diese bekannten Lösungsansätze [7] und fasste seine Ergebnisse in einem Leserbrief (Mai 1983) an das US-Magazin „Audio“ zusammen. Die wichtigste seiner Schlußfolgerungen ist:

„Löfgren, Baerwald, Seagrave und Stevenson produzierten identische und exakte Gleichungen für optimalen Kröpfwinkeln und optimalen Überhang.“

Tonearm Geometry

Dear Editor:

The article "Tonearm Geometry and Setup Demystified," by Martin D. Kessler and B. V. Pisha (Jan. 1980), should be understood as a historical survey as well as a survey of tonearm geometry.

Graeme F. Dennes
Member A.E.S., Member I.E.E.E.
104 Whippoorwill Drive
Warner Robins, Ga. 31093

2. Baerwalds Analyse

Kommt das Thema Tonarmgeometrie, Nullpunkte, Einstellschablonen zur Sprache, wird in der Regel der Name „Baerwald“ genannt als derjenige, auf dessen Analyse die in diesem Zusammenhang notwendigen Gleichungen zurückzuführen sind. Auch werden die fast universell verwendeten Nullpunkte bei 66 und 120.9 mm „Baerwald-Nullpunkte“ genannt.

Zum Beispiel wird in den Patentschriften der Einstellschablonen von Dennesen, Townshend, Shure, Geodisc explizit erwähnt, daß Baerwald der erste gewesen sei, der dieses Problem gelöst habe, auch daß in seiner Veröffentlichung die Nullpunkte bei 66 und 120.9 mm festgelegt würden.

Der bei der Konzeption heutiger Tonarme (d.h. seit ca. 1977) gebräuchliche Ansatz ist der von Baerwald [3]. Verzerrungen auf Grund von tangentialem Spurfehlwinkel betreffen ausschließlich die in reiner Seitenschrift (d.h. in Mono) geschnittenen Rillen bzw. den horizontalen Anteil einer 45/45 Stereo-Rille (Kombination aus Seiten- und Tiefenschrift), da sie proportional zur seitlichen Auslenkung bzw. Amplitude der Sinusschwingungen sind. Die (bei Baerwald bzw. Löfgren) angegebenen Verzerrungswerte in Prozent sind deshalb mit 0.707 (= sin 45 Grad) zu multiplizieren.

Erschwerend für genaue Berechnungen kommt hinzu, daß gemäß der RIAA Schneidkennlinie bei Frequenzen unterhalb 500 Hz mit konstanter Amplitude, zwischen 500 und 2122 Hz mit konstanter Schnelle, und darüber wiederum mit konstanter Amplitude geschnitten werden. Auf Grund der bei der RIAA Entzerrung im Phonovorverstärker auftretenden Pegelabsenkung im Höhenbereich von ca. 3.87 dB pro Oktave (von der die harmonischen Obertöne 2ter Ordnung naturgemäß betroffen sind), werden die Verzerrungswerte nochmal auf ca. 64 % abgesenkt. Rechnerisch ergibt sich somit, ausgehend von einem Verzerrungswert von 1 Prozent (laut Gleichung für den Klirrfaktor weiter unten im Text) ein Wert von ca. 0,45 % am Verstärkerausgang. Bei einem typischen Fehlwinkel von 1,75 Grad ergibt sich ein Klirrfaktor von ca. 0,3 %.

Angesichts der Tatsache, daß viele Lautsprecher höhere Verzerrungswerte aufweisen und weiterhin, daß harmonische Verzerrungen 2ter Ordnung in der oben angegebenen Größenordnung das ohnehin vorhandene Obertonspektrum nur leicht und somit wahrscheinlich unhörbar verändern (jedes Musikinstrument erzeugt Grundtöne + harmonische Obertöne), kann man diese durch Fehlwinkel bei der Abtastung erzeugten Verzerrungen getrost vernachlässigen, vorausgesetzt, der Tonabnehmer ist optimal eingestellt.

Was die Kombinationstöne betrifft, so können die Pegel dieser Töne, abhängig von den Frequenzen der erzeugenden Grundtöne, derart unterhalb der Pegel der Grundtöne liegen (Löfgren gibt als Beispiel 27 bzw. 34 dB, je nach Berechnungsmethode, an), daß sie angesichts der bekannten Wahrnehmungsschwellen [10] nicht weiter ins Gewicht fallen.

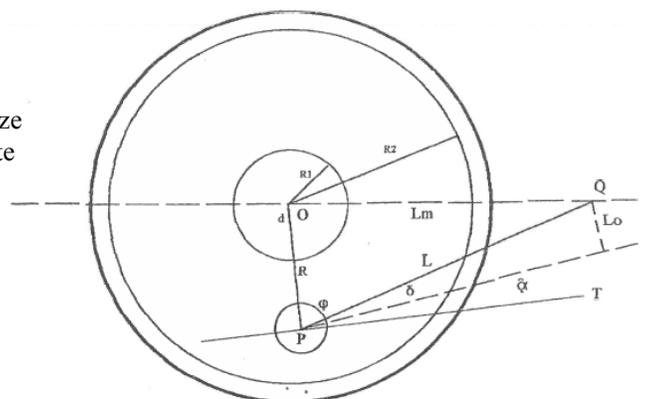
Der Tonabnehmer erzeugt auf Grund seiner Konstruktion selber harmonische Obertöne bzw. Kombinationstöne (Resonanzen, Biege- und Torsionsschwingungen des Nadelträgers, Inhomogenitäten des Magnetfeldes etc.). Weitere Quellen für Verzerrungen sind z.B. nicht-optimale Einstellung des Tonabnehmers hinsichtlich vertikalem Abspielwinkel, Antiskating usw., Abweichungen der Form des Wiedergabediamanten von der des Schneidstichels, auflagekraftbedingte Amplitudenverluste (elastische Verformungen der Modulationen).

Eine verzerrungsfreie Wiedergabe ist allein auf Grund der Vielfalt der Möglichkeiten für eine Erzeugung von Verzerrungen sowieso nicht möglich. Da sich einige der Einstellungsparameter des Tonabnehmers gegenseitig beeinflussen (z.B. hat eine Veränderung des vertikalen Abspielwinkels eine Veränderung des Überhangs zur Folge), sollte man dem einzelnen Parameter eine angemessene, aber nicht übertriebene Beachtung schenken.

In seiner Arbeit analysiert Baerwald die Verzerrungen, die durch einen Dreharm beim Abspielen einer durch einen radial geführten Schneidstichel in Seitenschrift geschnittenen Platte erzeugt werden.

Die geometrischen Verhältnisse und Größen bei der Plattenwiedergabe gehen aus Abb.4 hervor :

- Q = Tonarmdrehpunkt
- O = Plattenmitte
- P = Nadelspitze
- T = Rillentangente
- L = effektive Armlänge = Abstand Tonarmdrehpunkt - Nadelspitze
- Lm = Zentrumabstand = Abstand Tonarmdrehpunkt - Plattenmitte
- d = Überhang = Abstand Nadelspitze - Plattenmitte
- δ = Kröpfungswinkel
- α = Spurfehlwinkel
- φ = Winkel OPQ
- Lo = Verstellungsabstand = $L \cdot \sin \delta$
- R = Plattenradius
- R1, R2 = innerer bzw. äußerer bespielter Plattenradius
- N1, N2 = innerer bzw. äußerer Nullpunkt



andere verwendete Größen

A = Amplitude der seitlichen Auslenkung

β = maximaler Steigungswinkel der seitlichen Auslenkung, Maß für die Schnelle

λ = Wellenlänge

ω = Winkelgeschwindigkeit

Ω = Rotationsgeschwindigkeit = $\pi/30 \cdot \text{rpm}$

R = Plattenradius

R_m = mittlerer Plattenradius = $\sqrt{R_1 + R_2}$

x = numerischer Plattenradius = R/L

$x_m = R_m/L$

D = numerischer Überhang = d/L

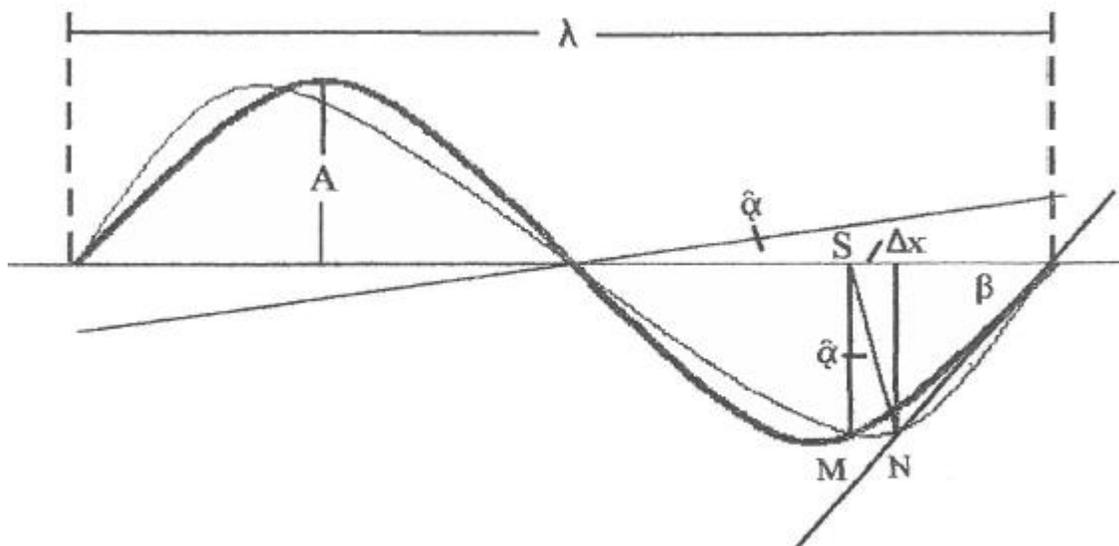
Der Fehlwinkel α wird beschrieben durch $\alpha = \frac{\pi}{2} \cdot (\varphi + \delta)$ (nach Löfgren)

wobei φ durch die Gleichung

$$\cos \varphi = \frac{1}{2LR} \cdot (L^2 - Lm^2 + R^2)$$

gegeben ist (nach Löfgren).

Betrachtet man eine in Seitenschrift geschriebene Rille von oben (Abb. 5), so ist in einem gegebenen Augenblick S die Lage der Nadelspitze ohne Modulation, M die Lage bei tangentialer Abtastung und N die durch den Spurfehlwinkel α erzeugte, um Δx entgegen der Drehrichtung nach hinten versetzte Lage. Bei der zur Plattenmitte gerichteten Auslenkung der Rille ist diese Versetzung Δx in Drehrichtung nach vorne. Die von der Nadelspitze durchlaufene Kurve weicht von der vom Schneidstichel geschnittenen Sinuskurve (durchgezogenen Linie) ab und entspricht der gestrichelten Linie. Diese resultierende Wiedergabekurve ist gegenüber der ursprünglichen Kurve frequenzmoduliert und weist Amplitudenabweichungen auf, d.h. Änderungen in der Wiedergabelautstärke.



Die mathematische Funktion $f(x)$ bzw. $f(t)$ zur Beschreibung dieser frequenzmodulierten Kurve führt letztendlich zum Verzerrungsparameter ε oder Klirrfaktor.

$$\varepsilon = \frac{2\pi A}{\lambda} \cdot \tan \alpha \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon = \tan \beta \cdot \tan \alpha \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon = \frac{\omega A}{r\Omega} \cdot \tan \alpha$$

Wie zu erkennen ist, nehmen die Verzerrungen mit steigender Amplitude (Höhe der seitlichen Auslenkung), mit steigender Schnelle sowie zum Platteninneren hin zu.

Das Ziel der folgenden Optimierung der Tonarmparameter, d.h. Überhang und Kröpfwinkels, ist es, die Wiedergabeverzerrungen im bespielten Bereich der Schallplatte zu minimieren. Dieses stimmt nicht überein mit einer Minimierung des Spurfelhwinkels.

Es stellt sich nun die Frage, was unter minimaler Wiedergabeverzerrung zu verstehen ist.

Es wird der Begriff des gewichteten Fehlwinkels α' eingeführt :

$$\alpha' = \frac{Rm}{R} \cdot \alpha \quad \text{bzw.} \quad \alpha' = \frac{xm}{2 \cos \delta} \left[1 - \frac{2D+2D^2}{x^2} - \frac{2 \sin \delta}{x} \right]$$

Idealerweise wäre α' gleich Null. Es gilt, eine Funktion $\alpha'(x)$ mit den Parametern δ und d zu finden, die dem Ideal am nächsten kommt. Die sogenannte Tchebychev-Näherung basiert auf dem Kriterium, daß das Maximum der absoluten Differenz zwischen den beiden Funktionen minimal wird. Da die erste Funktion α' (idealerweise) gleich Null ist, gilt es, die Maxima der Näherungsfunktion $\alpha'(x)$ zu minimieren, was in diesem Fall gleichbedeutend ist mit einer Minimierung des maximalen gewichteten Fehlwinkels bzw. des maximalen Klirrfaktors. Für einen gekröpften Arm führt diese Näherung zu zwei Nullpunkten N1 und N2 (gewichteter Fehlwinkel α' gleich Null) sowie einer Kurve für den Klirrfaktor ε mit drei Maxima gleichen Absolutwertes bei den Plattenradien R1, R2 sowie einem dritten, zwischen den Nullpunkten liegenden Radius Ro.

$$\text{Innerer Nullpunkt} \quad N1 = \frac{2 \cdot R1 \cdot R2}{\left[1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right] \cdot R2 + \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right] \cdot R1}$$

$$\text{Äußerer Nullpunkt} \quad N2 = \frac{2 \cdot R1 \cdot R2}{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right] \cdot R2 + \left[1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right] \cdot R1}$$

Wie aus den Gleichungen ersichtlich, ist die Lage der Nullpunkte vom verwendeten Arm (d.h. seiner effektiven Länge) völlig unabhängig und hängt lediglich vom bespielten Bereich der Platte ab, für den die Wiedergabeverzerrungen minimiert werden sollen.

Für den Einzweckarm (d.h. eine Drehzahl, ein Plattendurchmesser) ergeben sich folgende exakten Gleichungen für optimalen Überhang und Kröpfungswinkel :

$$\text{Überhang} \quad d = 1 - \sqrt{1 - \frac{2xm^2}{p^2+1}} \quad \text{wobei} \quad p = \frac{x1+x2}{2 \cdot xm}$$

$$\text{Umgeschrieben und vereinfacht wird daraus} \quad d = L - \sqrt{L^2 - N1 \cdot N2}$$

$$\text{Kröpfungswinkel} \quad \sin \delta = \frac{R2+R1}{L \cdot \left(\frac{\left(\frac{R1+R2}{2} \right)^2}{R1 \cdot R2} + 1 \right)}$$

In obigen Gleichungen für Nullpunkte, Überhang und Kröpfungswinkel sind die Parameter in Zoll einzusetzen (1 Zoll = 25,4 mm).

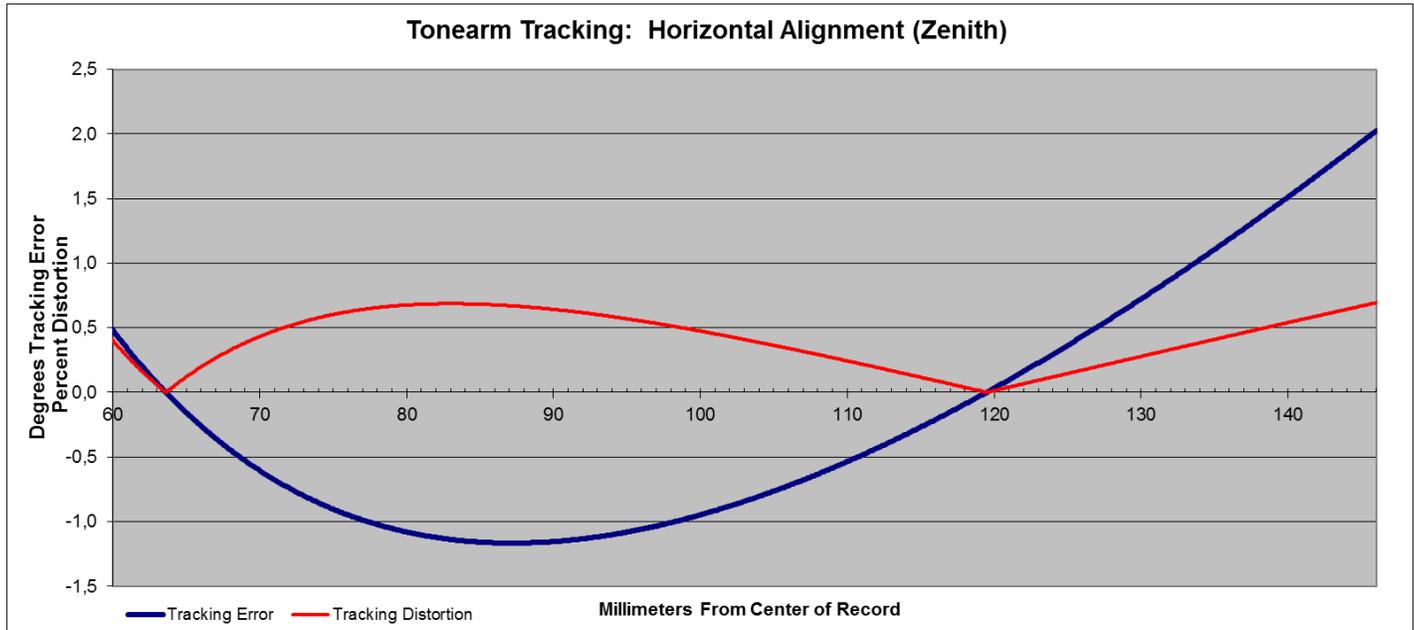
Als Standardwerte für die Berechnungen werden am häufigsten 60,325 und 146,05 mm als innerer und äußerer bespielter Radius genommen (IEC Standard). Die Nullpunkte ergeben sich zu 66 und 120,9 mm.

Nach dem DIN Standard wird 57,5 mm als innerer Radius benutzt. Die Nullpunkte liegen hier bei 72,2 und 118,3 mm.

Als Beispiel sollen hier Einstelldaten des SME 309 gegeben werden:

SME 309, L = 232,32 mm (9,14 Zoll)				
	Innerer Nullpunkt	Äußerer Nullpunkt	Überhang	Kröpfungswinkel
R1 nach IEC (60,325 mm)	66 mm	120,9	17,86 mm	23,72 Grad
R1 nach DIN (57,5 mm)	63 mm	118,3 mm	16,63 mm	23,1 Grad
R1 nach SME (58 mm)	63,6 mm	119,5 mm	16,98 mm	23,2 Grad

Abbildung 6 zeigt die Kurven für Fehlwinkel und Klirrfaktor für den SME 309 für SME-Radien.



Im folgenden einige nützliche Gleichungen :

Aus den Tonarmdaten effektive Länge L , Überhang d bzw. Zentrumabstand L_m und Krüpfungswinkel δ lassen sich die Nullpunkte N_1 , N_2 sowie die zugrundeliegenden innerer und äußerer bespielter Radius R_1 , R_2 berechnen.

$$N_1 = L \cdot \sin \delta - \sqrt{(L \cdot \sin \delta)^2 - (L^2 - L_m^2)}$$

$$N_2 = L \cdot \sin \delta + \sqrt{(L \cdot \sin \delta)^2 - (L^2 - L_m^2)}$$

$$\frac{2}{R_1} = \frac{A}{N_1} + \frac{B}{N_2}$$

$$\frac{2}{R_2} = \frac{B}{N_1} + \frac{A}{N_2}$$

$$A = 1 + \sqrt{2}$$

$$B = 1 - \sqrt{2}$$

3. Löfgren's Analyse

Zum besseren Verständnis des Folgenden ein Hinweis: bei Baerwald heißen Fehlwinkel und gewichteter Fehlwinkel α bzw. α' , bei Löfgren δ bzw. δ/r .

In einigen Fällen wird neben dem Namen „Baerwald“ auch der Name „Löfgren“ genannt, bzw. die Einstellung des Tonarms wahlweise nach Baerwald oder Löfgren, wodurch zwangsläufig der Eindruck entsteht, daß die eine Lösung von Baerwald, die andere von Löfgren stammt. Bekannte Beispiele hierfür sind die Einstellschablone von Wally Malewicz (Wally Tractor), der SPJ-Tonarm des Spothem La Luce Laufwerks, oder die Tonarme von Robert Graham.

Tatsächlich schlug Löfgren zwei Lösungen A und B vor, von denen die erste mit jener von Baerwald identisch ist. Bei der ersten Lösung ging es darum, die Verzerrungen, und somit δ/r , innerhalb engstmöglicher Grenzen zu halten, d.h. δ/r sollte in Aussen- und Innenrille (r_1, r_2) gleich gross sein, gleichzeitig dem maximal möglichen Wert $(\delta/r)_{\max}$ bei einem zw. den beiden Nullpunkten liegenden Radius r^* entsprechen, insgesamt jedoch so klein wie möglich sein:

Bedingungen kleinster Klirrfaktor-
toleranz

Für die uns interessierende Größe $\frac{\delta}{r}$ erhalten wir somit

$$(33) \quad \frac{\delta}{r} \cong \frac{1}{r \sin \varphi_0} \left(\frac{R^2 - D^2 + r^2}{2 R r} - \cos \varphi_0 \right).$$

Damit dieser Ausdruck für $r = r_1$ und $r = r_2$ gleich groß wird, muß

daher unverändert stehen bleiben.) Sein Maximum erreicht $\frac{\delta}{r}$ bei dem Radius

$$(36) \quad r^* = \frac{R^2 - D^2}{R \cos \varphi_0},$$

oder, wenn gleichzeitig $\frac{\delta_1}{r_1} = \frac{\delta_2}{r_2}$ ist,

$$(37) \quad r^* = \frac{2 r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Setzt man nun $\frac{\delta_1}{r_1} = - \left(\frac{\delta}{r} \right)_{\max}$, so ergibt sich

Für bespielte Radien nach IEC von 146.05 und 60.325 mm ergeben sich die bekannten Nullpunkte von 66 und 120.9 mm: Löfgren's „A“-Lösung (Abb.7).

Löfgren war im folgenden der Meinung, daß den durch Lösung A erzeugten Maxima der Kurve des gewichteten Fehlwinkels δ/r (und damit des Klirrfaktors ε) verschieden große Bedeutung zukommen sollte. Seine zweite Lösung fußt auf der Überlegung, daß δ/r in der Umgebung des mittleren Radius r^* (siehe Gleichung 36 oben) nur langsam, bei Aussen- und Innenradius dagegen sehr rasch abfalle, man also bei den Grenzdicken etwas grössere Werte erlauben könne: es gelte, den quadratischen Mittelwert der Verzerrung so klein wie möglich zu machen: dem Wert bei r^* würde also grössere Bedeutung beigemessen, er solle in Folge so klein wie möglich sein.

Das hierzu benutzte Verfahren ist das der kleinsten Quadrate. Es wird im folgenden der effektive Klirrfaktor E eingeführt, welcher ein Maß für das Maximum bei r^* darstellt:

$$E = \sqrt{\frac{1}{R_2 - R_1} \cdot \int_{R_1}^{R_2} \varepsilon^2 dR}$$

Es gilt nun, für einen gegebenen Verstellabstand L_0 , d.h. einem gegebenem, beispielsweise nach Löfgren A bzw. Baerwald (in Abhängigkeit von der effektiven Armlänge) berechneten, Kröpfungs-
winkel denjenigen Überhang zu bestimmen, bei dem der effektive Klirrfaktor minimal wird. Der
Kröpfungs-
winkel ist bei dieser zweiten Lösung unverändert, der Überhang um etwa 0.5 mm
größer. Für die IEC-Radien ergeben sich die Nullpunkte bei 70.29 und 116.6 mm: Löfgren's
„B“-Lösung (Abb.8).

Da die Berechnung des B-Überhangs von einem gegebenen Kröpfungs-
winkel ausgeht, muss man
lediglich diesen Überhang, gegenüber dem nach Löfgren A/Baerwald berechneten um ca. 0,5 mm
größer, einstellen. Dies erfolgt durch eine Verschiebung des Tonabnehmers im Halter um 0,5 mm
längs der durch die Achse des Nadelträgers verlaufenden Linie nach vorn (bei gegebenem festem
Zentrum-
abstand L_m).

Bei Armen vom SME-Typ kann der B-Überhang durch Verminderung des Zentrumsabstandes
eingestellt werden, der vorher eingestellte Kröpfungs-
winkel und Verstellabstand bleiben
unverändert.

Lösung B führt dazu, daß bei Innen- und Außenradius R_1 und R_2 ein höherer Klirrfaktor vorliegt
als bei Lösung A, während der Klirrfaktor bei r^* , d.h. zwischen den beiden Nullpunkten (die für
IEC-Radien bei 70,29 und 116,6 mm liegen) geringer ist.

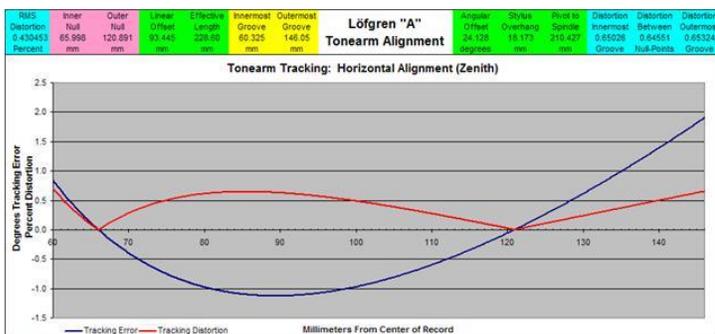


Abb.7

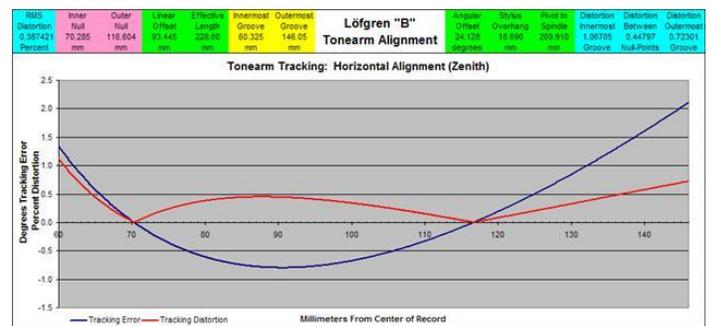


Abb.8

Die blaue Kurve stellt den Spurfehl-
winkel dar, die rote die Verzerrung. Man sieht deutlich, daß bei
Lösung A die Verzerrungswerte bei den drei Radien gleich gross sind, während bei Lösung B der
Wert zwischen den beiden Nullpunkten niedriger als bei Lösung A, in Aussen- und Innenrinne
hingegen höher ist.

Da bei klassischer Musik oft am Plattenende höhere Pegel vorliegen als auf dem Rest der bespielten
Plattenfläche, würde eine Tonabnehmereinstellung nach Lösung B dort zu höheren Wiedergabe-
verzerrungen führen als eine Einstellung nach Lösung A/Baerwald.

Die oben erwähnten Tonarme von SPJ und Graham, sowie die Einstellschablone von Wally Malewicz (Wally Tractor) erlauben die Einstellung nach Löfgren A/Baerwald und Löfgren B. Der SpJ-Tonarm besitzt eine Mikrometerschraube, mit deren Hilfe zwischen Löfgren A/Baerwald und Löfgren B gewechselt werden kann, der Graham Tonarm wird mit einer Einstellschablone geliefert, auf der die Überhänge nach Löfgren A/Baerwald und Löfgren B markiert sind, der Wallytractor weist zwei Kreisbögen (nach Löfgren A/Baerwald bzw. Löfgren B) auf.

Die zweite wichtige Schlußfolgerung von Dennes [7] ist die folgende:

„Es sollte jedoch deutlich gesagt werden, daß wir, wäre Löfgrens Artikel der einzige gewesen, der jemals zu diesem Thema veröffentlicht worden ist, trotzdem dieselben optimalen Bemessungs-gleichungen zur Reduzierung von Wiedergabeverzerrungen gehabt hätten, wie wir sie heute haben.“

Ein diesem Sinne
verfasster Artikel erschien
1983 in Audio Critic [11].

Lateral Tracking Alignment Revisited (Maybe Your Overhang Is Wrong After All)

A reexamination of the key papers published so far on lateral tracking geometry in pivoted tonearms reveals total consensus and consistency, but the granddaddy of all the researchers also suggested an alternative optimization that tends to rock the boat, as it may well be superior to what everybody is blithely using today.

Löfgrens Artikel erhielt auf Grund der damaligen Umstände wahrscheinlich wenig Beachtung.

Was jedoch auffällt ist, daß seine Analyse von Baerwald zitiert wird, wobei inhaltlich auf die wesentliche Erkenntnis Löfgrens, nämlich daß nicht der Fehlwinkel, sondern die Verzerrungen und somit der auf den

Plattenradius bezogene Fehlwinkel betrachtet werden müsse, eingegangen wird. Baerwalds Arbeit wird in Folge von Bauer, Seagrave sowie Stevenson zitiert.

mental material. E. G. Löfgren,¹ who first pointed out the error in reference 2 is, as far as the writer is aware, the only author who attacked the subject analytically and also discussed design questions on this basis.

Zum Thema Nullpunkte im allgemeinen, und „Baerwald-Nullpunkte“ im besonderen, bleibt folgendes anzumerken: laut Baerwald gab es seinerzeit zwei Plattentypen: 33 1/3 U/min (40 cm Durchmesser) für den Rundfunk (transcription disks) und 78 U/min (30 cm Durchmesser) für den Musikliebhaber (commercial disks). Die Nullpunkte auf der 78 U/min-Platte (Grensradien bei 50.8 und 152.4 mm) wären 55.96 und 117.87 mm, also sehr verschieden von 66 und 120.9 mm, letztere haben demnach mit Baerwald nicht das geringste zu tun, die Bezeichnung „Nullpunkte nach Baerwald“ ist also völlig aus der Luft gegriffen. Hinzu kommt, daß der IEC Standard IEC98-1958, in dem die heute üblicherweise gebrauchten Grensradien von 146.05 und 60.325 mm genannt werden, 1958 erstellt wurde, also 17 Jahre später.

Wie aus obigen Ausführungen ersichtlich ist, wird der Name Baerwald eigentlich zu Unrecht mit diesem Thema in Verbindung gebracht, da er dem, was Löfgren in seiner Analyse dargelegt hat, nichts Neues hinzufügen konnte. Anstelle von Baerwald bzw. von Baerwald / Löfgren wäre es im Lichte der historischen und mathematischen Fakten korrekt, von Löfgren A bzw. von Löfgren A / Löfgren B zu sprechen.

4. Wahrnehmbarkeit

Die Frage, die sich nun offensichtlich stellt ist: wie wichtig ist es, einen Tonarm mit höchster Präzision einzustellen? Lohnen sich längere Arme mit folglich kleinerem Fehlwinkel, lohnen sich Tangentialarme?

Eine Studie im Jahre 2009, an welcher der Autor als Testperson mitgewirkt hat, hat versucht, diese Frage zu beantworten [8]. In dieser Studie wurden ausschließlich durch Fehlwinkel erzeugte Verzerrungen, d.h. isoliert von durch andere Ursachen erzeugten, untersucht, dies sowohl für den horizontalen als auch den vertikalen Fehlwinkel (VTA). Zu diesem Zweck wurden einem 220-Hz Sinuston sowie 2 tracks der EBU SQAM CD (track 39: Konzertflügel; track 48: Quartett) digital verschieden große Beträge an Verzerrungen hinzugefügt. Die so erstellten Testpassagen wurden einmal über Ohrhörer (ABX-Testverfahren), einmal über die heimische Stereo-Anlage abgehört. In beiden Fällen wurden dieselben Schwellenwerte ermittelt: für den Sinuston waren die Verzerrungen ab einem Fehlwinkel von 2,11 Grad wahrnehmbar, für die beiden Musikpassagen ab 11,71 Grad, sowohl horizontal als auch vertikal, welcher Wert, dem Autor des papers zufolge, auffallend gut mit dem 1963 von D. Cooper [9] ermittelten übereinstimme.

Was den vertikalen Fehlwinkel angeht, sind durch eine unglückliche Kombination von niedrigem geschnittenen Modulationswinkel VMA der Platte und hohem Winkel des Nadelträgers Fehlwinkel von 20 Grad möglich, also durchaus im wahrnehmbaren Bereich. Was den horizontalen Fehlwinkel angeht, so der Autor des papers, schlossen die Ergebnisse nicht aus, daß ein korrekt eingestellter 9-Zoll Arm zu Verzerrungen im nichtwahrnehmbaren Bereich führe.

5. Schluß

1. Wie aus obigen Ausführungen ersichtlich ist, wird der Name Baerwald eigentlich zu Unrecht mit diesem Thema in Verbindung gebracht, da er dem, was Löfgren in seiner Analyse dargelegt hat, nichts Neues hinzufügen konnte. Anstelle von Baerwald bzw. von Baerwald / Löfgren wäre es im Lichte der historischen und mathematischen Fakten korrekt, von Löfgren A bzw. von Löfgren A / Löfgren B zu sprechen.

2. Die geometrischen Verfahren zur Minimierung der Wiedergabeverzerrungen sind seit 1938 bzw. 1941 bekannt. Trotzdem hat es eines Anstosses in Form von Artikeln in Audiozeitschriften wie Audio Critic 1977 bedurft, bevor sich Tonarmhersteller der Tatsache bewusst wurden, daß die Geometrie der damals aktuellen Arme alles andere als optimal war.

3. Aus Daten von Tonarmen und Einstellschablonen, soweit verfügbar, zeigt sich, daß die Einstellung nach Löfgren A/Baerwald unter Verwendung der IEC-Radien (146,05 und 60,325 mm) am häufigsten benutzt wird (erkennbar an den Nullpunkten bei 66,04 und 120,9 mm). Beispiele sind SME 3009 III (Titanrohr) IV, V, Graham, Wheaton-Triplanar, Kuzma, Immedia.

4. Es gibt keine allein gültige optimale Einstellung. Jede Einstellung ist lediglich für die Platten optimal, die dieselben Innen- und Aussenradien R_1 , R_2 haben wie die den Berechnungen zugrundeliegenden. Bei allen Platten mit davon abweichenden Radien werden höhere als theoretisch mögliche Verzerrungen erzeugt. Der Genauigkeitsfanatiker müsste also für jede Platte nicht nur den vertikalen Abspielwinkel, sondern auch Überhang und Kröpfswinkel neu und optimal einstellen.

5. Ob die Einstellung eines Tonabnehmers optimal ist im Hinblick auf den Spurfehlwinkel, lässt sich nur feststellen, indem man die Verzerrungen bei den drei Radien R_1 , R_2 und R_0 berechnet, die bei korrekter Einstellung gleiche Werte aufweisen. Ob eine Einstellung nach Baerwald mit IEC-Radien vorliegt, lässt sich anhand des Verstellabstandes L_0 schnell überprüfen : dieser ist dann 93.45 mm.

6. Ein Tonarm ist in geometrischer Hinsicht immer mit der dazugehörigen Einstellschablone zu bewerten. Man kann jedoch jeden beliebigen Tonarm (sprich Tonabnehmer) mit Hilfe jeder beliebigen Schablone einstellen, da jede Einstellung sowieso ein Kompromiß und, solange die korrekten Gleichungen verwendet wurden, weder besser noch schlechter ist als eine andere.

Dabei sind jedoch zwei Punkte zu beachten :

a. Bei den meisten Tonarmen steht die Achse durch das vertikale Lager senkrecht auf der Linie, die durch den Nadelträger verläuft, allerdings nur solange der Tonabnehmer mit der vom Armhersteller vorgeschriebenen bzw. beigegeführten Schablone eingestellt wird. Benutzt man eine andere Schablone, die andere Nullpunkte ergibt, stehen die beiden Linien nicht mehr senkrecht aufeinander, es erfolgt beim Abtasten von Plattenwellen ausser der vertikalen Bewegung auch eine Verdrehung des Armrohres um seine Längsachse. Dies führt zu Änderungen des Azimuths, d.h. die Nadel steht nicht mehr senkrecht in der Rille, was zu Änderungen im Stereobild führen kann. In der Praxis sind diese Azimuth-Änderungen allerdings von vernachlässigbarer Größenordnung.

b. Antiskating wird im allgemeinen gleich hoch wie die Auflagekraft eingestellt. Die Höhe des an der Armbasis aufzubringenden Drehmoments (Antiskating) hängt jedoch ab von der Größe der skating-Kraft, welche wiederum abhängt von der Größe des Kröpfswinkels. Damit die Regel "Antiskating = Auflagekraft" benutzt werden kann, muss daher der Kröpfswinkel gemäß Armherstellervorschriften eingestellt werden. Jede andere Einstellung ergibt andere Werte für den Kröpfswinkel und somit die skating-Kraft. In einem solchen Fall kann die Antiskating-Kraft mit Hilfe einer Testplatte bestimmt werden.

Literaturhinweise

- [1] Wilson, „Needle track alignment“, The Gramophone, Sept.1924, S.129
„Two notes on gramophone adjustment“, The Gramophone, März 1925, S.381
- [2] Löfgren, „Über die nichtlineare Verzerrung bei der Wiedergabe von Schallplatten infolge Winkelabweichungen des Abtastorgans“, Akustische Zeitschrift, Nov.1938, S.350
- [3] Baerwald, „Analytic treatment of tracking error and notes on optimal pickup design“, Journal of the Society of Motion Picture Engineers 1941, S.591
- [4] Bauer, „Tracking angle“, Electronics, 1945, März, S.110
- [5] Seagrave, „Minimizing pickup tracking error“, Audiocraft Magazine, Dez.1956, S.19;
Jan.1957, S.25; Aug.1957, S.22
- [6] Stevenson, „Pickup arm design“, Wireless World, Mai 1966, S.214; Juni 1966, S.314
- [7] Dennes, „An analysis of six major articles on tone arm alignment optimization and a summary of optimum design equations“, 1983
- [8] Tollerton, „Digital simulation of phonograph tracking error“, Audio Engineering Society, paper 7924 (2009)
- [9] Cooper, „Vertical tracking error in practice“, Audio Magazine, Sept. 1963, S.40
- [10] Klippel, „Speaker auralization – subjective evaluation of nonlinear distortion“, AES paper 5310 (2001)
- [11] N.N., „Lateral tracking alignment revisited (maybe your overhang is wrong after all)“, Audio Critic, 1984

Weitere Artikel zu diesem Thema

- [12] N.N., „Cartridge, arm and turntable vs. The groove: who’s winning?“, Audio Critic, Dez. 1977
- [13] N.N., „Have tone arm designers forgotten their high-school geometry?“, Audio Critic, Jan./Febr. 1977
- [14] Howard, „Arm geometry explained“, Practical Hifi, Okt. 1980
- [15] Kessler, „Tonearm geometry and setup demystified“, Audio Magazine, Jan.1980

[16] Gilson, „The cartridge alignment problem“, Wireless World, Okt.1981
„Cartridge alignment gauge“, Wireless World, Nov.1981

[17] Carlson, „Resonance, tracking and distortion“, J. of the Audio Engineering Society, Juli 1954

[18] Randhawa, „Pickup-arm design techniques 1“, Wireless World, März 1978
„Pickup-arm design techniques 2“, Wireless World, April 1978

Abbildungsnachweis

Abb.1: US Patent 1,473,005 (6. November 1923)

Abb.2: Bauer, „Pickup placement“, Electronics 1949, June, S.87

Abb.3: Autor

Abb.4: nach Löfgren [2]

Abb.5: nach Löfgren [2]

Abb.6: Unter Verwendung des von John Elison erstellten Excel-Spreadsheets

Abb. 7, 8: Von John Elison freundlicherweise angefertigt und zur Verfügung gestellt

Spreadsheet: <http://www.enjoythemusic.com/freestuff.htm>

Mein Dank gilt Brian Kearns für die fachkundige Hilfe sowie die Formulierung und Bereitstellung der vereinfachten Gleichungen für Überhang und Nullpunkte mit den dazugehörigen bespielten Plattenradien.

Klaus Rampelmann, Den Haag (Niederlande), Mai 2015