

Helmut WITTEK, November 2000, korr.06/01

Lokalisationskurven online – Der „Image Assistant“

Dokumentation über Prinzip, rechnerische Herkunft und Anwendungen

1. Einleitung

2. Rechnerische Herkunft

2.1. Errechnen der Pegel- und Zeitdifferenzen

2.2. Näherungsfunktion

2.3. Öffnungswinkel und graphische Darstellung

3. Feststellen der Gültigkeit

4. „Optimale“ Lokalisationskurve

5. Beispiele Zweikanal

6. Beispiele Dreikanal

1. Einleitung

Nach den bekannten Gesetzen sind die horizontalen Positionen der Phantomschallquellen bei beliebigen Hauptmikrofonanordnungen voraussagbar.

Mit den Parametern

- Mikrofoncharakteristika der beteiligten Mikrofone
- Hauptachsenwinkel der Mikrofone
- Mikrofonabstände
- Abstand der Schallquelle (Radius) und
- evtl. zusätzlicher Einflussnahme (Verzögerung, Pegelbeeinflussung)

lassen sich die Pegel- und Laufzeitdifferenzen zwischen den Mikrofonsignalen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Signals errechnen.

Diese entsprechen bei vorausgesetzt diskretem Routing auf die jeweiligen Lautsprecher (linkes Mikrofon auf L, mittleres auf C, rechts auf R) auch den Signaldifferenzen zwischen den Lautsprechern.

Mit den bekannten Abbildungsgesetzen sowie den standardisierten Öffnungswinkeln der Lautsprecher kann nun die Auslenkung einer Phantomschallquelle ermittelt werden, die durch diese Signaldifferenzen verursacht wird.

Es wird die Abbildung zwischen jeweils nur *zwei* benachbarten Lautsprechern betrachtet. Die Lautsprecherbasen, in denen Abbildung erfolgt, sind für

Zweikanal-Stereo: L-R

Mehrkanal: L-C, C-R.

Wie in [Wittek 2000] besprochen, haben 3fach-Übertragungen kohärenter Signale wenigstens auf den Parameter horizontale Auslenkung keinen oder wenig Einfluß, wenn der Pegel des Übersprechens auf den dritten Kanal genug klein bei genügend großer Verzögerung ist.

Dies ist auch bei L-C-R-Hauptmikrofonensystemen mit 3 Nierenmikrofonen der Fall, wenn der Versatzwinkel und der Abstand der Nieren untereinander groß genug sind. Dieser Fall sei bei allen Berechnungen vorausgesetzt.

In [Wittek 2000] wird außerdem untersucht, welche negativen Auswirkungen eine solche 3fach-Übermittlung auf die Parameter Stabilität, Klangfarbe und Abbildungsschärfe haben wird. Hier muß mit erheblichen Folgen gerechnet werden. Bei Mikrofonanordnungen, die aus Kugeln bestehen, wird, wenn ihr Abstand zueinander gering ist, auch die horizontale Auslenkung vermehrt durch die Beteiligung aller drei Lautsprecher bewirkt.

Abbildung in den Lautsprecherbasen L-LS, R-RS und LS-RS wird nicht errechnet, da sie zum einen auch für Sitzpositionen im „sweet spot“ instabil ist und zum andern vom Verfasser erwartet wird, daß in diesen Bereichen andere Gesetze als die der Richtungsabbildung bei der Mikrofonaufstellung eine wichtigere Rolle spielen. Gesetzmäßigkeiten zur optimalen Abbildung von Räumlichkeit und räumlicher Eingebundenheit stehen noch aus.

Nun müssen Funktionen festgesetzt werden, die den Zusammenhang zwischen Pegel- bzw. Laufzeitunterschieden der Lautsprechersignale und der Auslenkung der Phantomschallquelle beschreiben.

Voraussetzungen für die Lautsprecheranordnung sind Standard-Zweikanal-Anordnung im Stereodreieck, bzw. Standard-3/2-Anordnung nach ITU-R BS 775-1[ITU 1992].

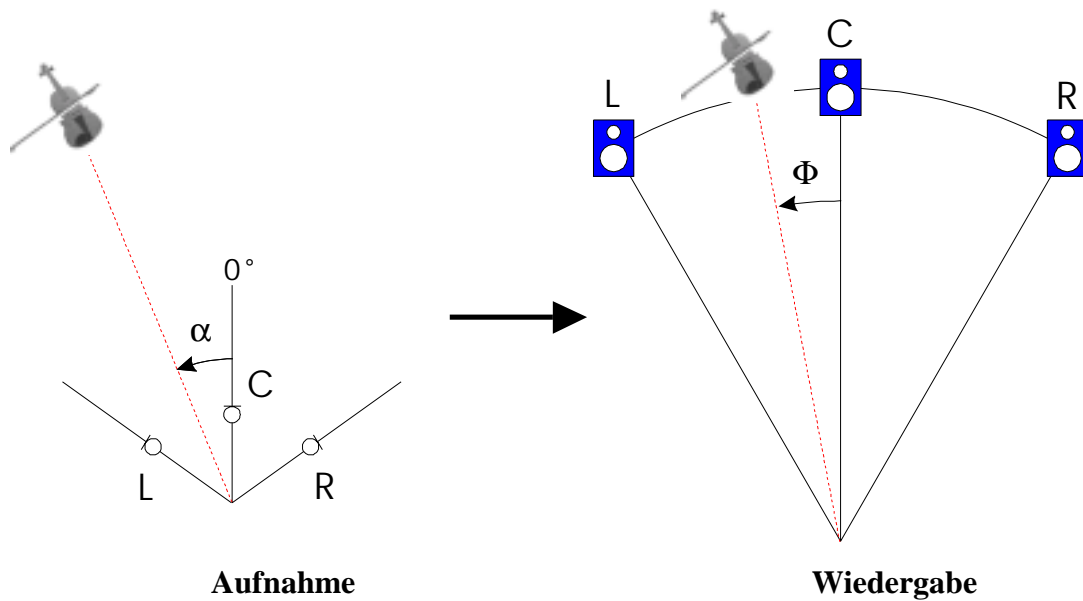
Grundprinzip der Errechnung einer Lokalisationskurve einer Mikrofonanordnung ist also:

Signaldifferenzen: $\Delta t, \Delta L = f(\alpha)$ $\alpha =$ Einfallswinkel;

Auslenkung: $\Phi = f(\Delta t, \Delta L)$

Aus der Verknüpfung dieser beiden Funktionen entsteht die Lokalisationskurvenfunktion einer Mikrofonkonfiguration:

$$\Phi = f(\alpha);$$

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Einfallswinkel α und Auslenkung Φ

2. Rechnerische Herkunft

2.1. Errechnen der Pegel- und Zeitdifferenzen: $\Delta t, \Delta L = f(\alpha)$

Vorausgesetzt wird:

- Die Mikrofoncharakteristika für Kugel, breite Niere, Niere und Acht entsprechen dem mathematischen Ideal (siehe unten)
- Die Amplitude des Direktsignals einer Signalquelle im Abstand r vom Empfänger beträgt $A = r_0 \cdot \left(\frac{1}{r}\right) \cdot A_0$; (*1/r-Gesetz* : Die durch die unterschiedlichen Abstände der Mikrofone zur Signalquelle auftretenden Pegeldifferenzen beim Direktsignal sind bei kleinen bis mittleren Entfernungen der Signalquelle erheblich. Da zur Lokalisation nur das Direktsignal ausgewertet wird, müssen diese Verzerrungen eingerechnet werden.)

Das Signal trifft laut Abbildung 2 auf die Mikrofonanordnung:

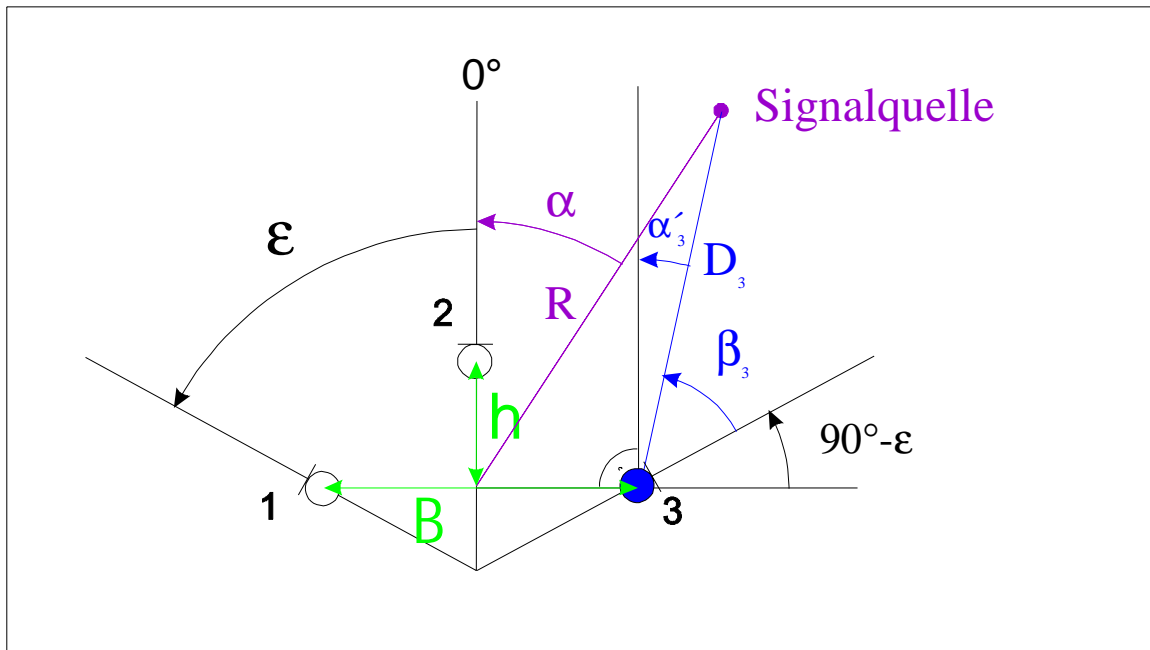


Abbildung 2: Parameter einer Mikrofonanordnung mit Signalquelle

Gegebene Parameter der Mikrofonanordnung:

- Basis $B =$ Basis L-R
- Höhe h
- Hauptachsenwinkel ε
- Richtcharakteristika der Mikrofone 1, 2 und 3

Die Signalquelle hat den Abstand R zum Basismittelpunkt. Dieser Abstand fließt nur wesentlich in die Berechnung ein, wenn er nicht groß im Verhältnis zur Basis B und der Höhe h ist.

Mit einfachen mathematischen Mitteln lassen sich nun die verschiedenen Laufzeiten und Pegel berechnen. Dazu werden die Weglängen eines Signals aus der Entfernung R und dem Einfallswinkel α berechnet. Außerdem sind die abweichenden Eintreffwinkel α'_1 , α'_2 und α'_3 auf die Mikrofone von Bedeutung.

- Weglänge D_3 des Signals zum Mikrofon 3:

$$D_3 = \sqrt{R^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 - R \cdot B \cdot \cos(90^\circ - \alpha)}$$

- Laufzeit t_3 des Signals zum Mikrofon 3:

$$t_3 = \frac{D_3}{c} \text{ mit } c = \text{Schallgeschwindigkeit}$$

- Eintreffwinkel α'_3 des Signals auf Basissenkrechte durch Mikrofon 3:

$$\alpha'_3 = \arccos \left(\frac{-R + D_3 + \left(\frac{B}{2}\right)^2}{D_3 \cdot B} \right) - 90^\circ$$

- Eintreffwinkel β_3 des Signals auf die Hauptachse des Mikrofons 3:

$$\beta_3 = \alpha_3 - \varepsilon$$

- vom Mikrofon verursachter Dämpfungsverlauf:

Richtcharakteristik Mikrofon	Amplitude A
Kugel	1
Breite Niere	$\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \cos \beta$
Niere	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \beta$
Superniere	$\frac{1}{2,74} + \frac{1,74}{2,74} \cos \beta$
Acht	$\cos \beta$

Tabelle 1: Dämpfungsverläufe einiger Richtcharakteristika

- vom Signal verursachter Pegel am Mikrofon 3:

$$L_3 = 20 \cdot \log_{10}(|A|)$$

Die Berechnungen für die Mikrofone 1 und 2 verlaufen entsprechend. Der Parameter h (Höhe) fließt in die Berechnungen der zum Mikrofon 2 gehörenden Werte ein.

Zur Auswertung wird nun gebildet:

Zweikanal:

- $\Delta L(L/R) = L_1 - L_3$
- $\Delta t(L/R) = t_1 - t_3$

Mehrkanal:

- $\Delta L(L/C) = L_1 - L_2$
- $\Delta L(C/R) = L_2 - L_3$
- $\Delta t(L/C) = t_1 - t_2$
- $\Delta t(C/R) = t_2 - t_3$

- Summenleistungspegel P aller beteiligten Mikrofone:

$$P = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}} \right)$$

2.2. Näherungsfunktion

Zur Ermittlung der Auslenkung in Abhängigkeit von den vorliegenden Signaldifferenzen Δt und ΔL wird nun eine Näherungsfunktion eingeführt, die zur rechnerischen Bestimmung verwendet wird.

Die mathematische Beziehung dieser Funktion lautet: $\phi = f(\Delta t ; \Delta L)$;

Die Erfahrungen aus der Stereophonie und die Ergebnisse der Vorversuche aus Kapitel 2 lassen schließen:

- bis zu einer Auslenkung von 50% (bei 60° Standard-Zweikanal-Öffnungswinkel sind das +/- 15°) verhalten sich die Zusammenhänge von Pegel- bzw. Laufzeitdifferenzen zur Auslenkung linear.
- ab bestimmten Pegel- bzw. Laufzeitdifferenzen sind keine Änderungen der Auslenkung mehr feststellbar. Die Phantomschallquelle wird nur noch in einem Lautsprecher geortet.

Das ergibt einen aus mehreren Teilen zusammengesetzten Kurvenverlauf:

Pegeldifferenzen:

- 0 bis ca. 7 dB: linearer Zusammenhang zwischen Pegeldifferenzen und Auslenkung
- ca. 7 bis ca. 18 dB: Steigung der Kurve nimmt stetig ab → allmähliche „Sättigung“
- ab ca. 18 dB: Kurvenverlauf konstant, Auslenkung maximal

Als Steigung im linearen Verlauf wird die erwähnte Beziehung 7,3% / dB verwendet. Da dieselben Auslenkungsgesetze natürlich in die andere Richtung auch gelten, ergibt sich ein symmetrischer Verlauf im negativen Bereich.

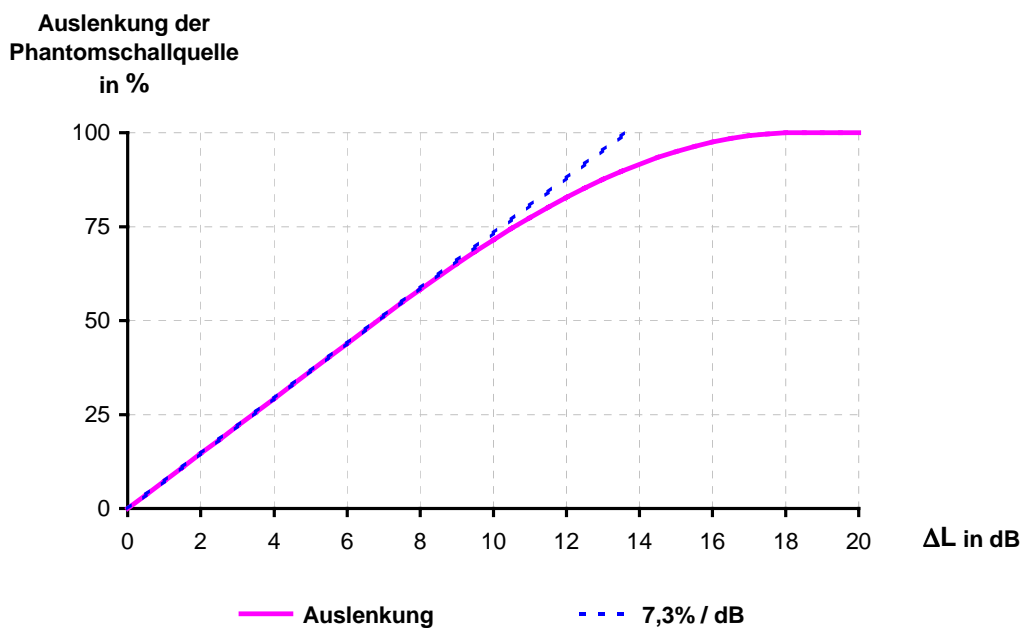
Auslenkung der Phantomschallquelle durch Pegeldifferenzen

Abbildung 3: Auslenkung ϕ in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz ΔL

Laufzeitdifferenzen:

- 0 bis ca. 0,4 ms: linearer Zusammenhang zwischen Laufzeitdifferenzen und Auslenkung
- ca. 0,4 bis ca. 1 ms: Steigung der Kurve nimmt stetig ab
- ab ca. 1 ms: Kurvenverlauf konstant, Auslenkung maximal

Als Steigung im linearen Verlauf wird die erwähnte Beziehung 13% / 0,1 ms verwendet.

Der im Programm „Image Assistent“ einstellbare Wert $t_{50\%}$ gibt diejenige Laufzeitdifferenz an, bei der 50% Auslenkung erreicht wird. (Voreinstellung: 0,395ms)

Auslenkung der Phantomschallquelle durch Laufzeitdifferenzen

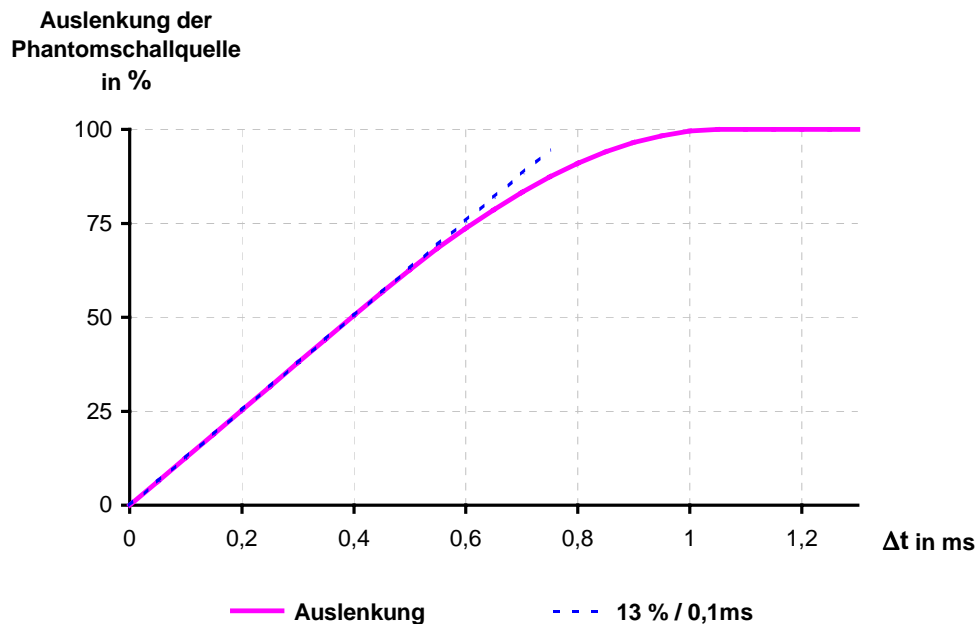


Abbildung 4: Auslenkung ϕ in Abhängigkeit von der Laufzeitdifferenz Δt

Da Pegel- und Zeitkurven kongruent verlaufen, läßt sich eine gemeinsame Näherungsfunktion für beide Zusammenhänge definieren.

Außerdem addieren sich im linearen Bereich nach Theile [Theile 1984] Pegel- und Laufzeitunterschiede gleichsinnig nach:

$$\phi(\Delta L, \Delta t) = \phi(\Delta L) + \phi(\Delta t);$$

Dazu ist es notwendig, die Laufzeitdifferenzen in entsprechende Pegeldifferenzen umzurechnen, was aufgrund der gleich verlaufenden Lokalisationskurven möglich ist.

Der resultierende Umrechnungsfaktor ist:

$$z = 17,3 \text{ dB / ms oder im Kehrwert } 1 / z = 58 \text{ } \mu\text{s / dB.}$$

$$\text{(bei Veränderung der Voreinstellung für } t_{50\%}: z = \left(\frac{15}{2,2 \cdot t_{50\%}} \right) \frac{\text{dB}}{\text{ms}})$$

→ Umrechnung Laufzeit- ↔ Pegeldifferenz: $\Delta t \cdot z = \Delta L$ mit $z = 17,3 \text{ dB/ms}$

Um diese Kombination von Pegel- und Laufzeitdifferenzen auch im nichtlinearen Bereich der Näherungsfunktion zu ermöglichen, wird nun festgesetzt:

- nur für Auslenkungen $\leq 50\%$ gilt: $\phi(\Delta L, \Delta t) = \phi(\Delta L) + \phi(\Delta t)$, da sonst auf der rechten Seite Werte über 100% entstehen
- dies wird verhindert, indem die Näherungsfunktion auf die Summe der Signaldifferenzen angewendet wird: $\Delta_{ges} = \Delta L + z \cdot (\Delta t)$

Diese Vorgehensweise bedeutet z.B., daß eine Pegeldifferenz von 7 dB und eine Laufzeitdifferenz von 0,4 ms alleine jeweils ca. 50% Auslenkung, gemeinsam aber nur 92% Auslenkung zur Folge haben.

Zu beachten ist außerdem, daß die Addition der Wirkung von *gegenseitigen* Pegel- und Laufzeitdifferenzen anderen Gesetzen folgt. Bei kleineren Werten ist zwar ein Ausgleich dieser gegenseitigen Wirkungen möglich, dies ist aber verbunden mit einem Verlust an Abbildungsschärfe.

Nun kann die resultierende Gesamtdifferenz Δ_{ges} in eine Näherungsfunktion eingesetzt werden, die den besprochenen Verlauf hat:

Näherungsfunktion für die Auslenkung der Phantomschallquelle

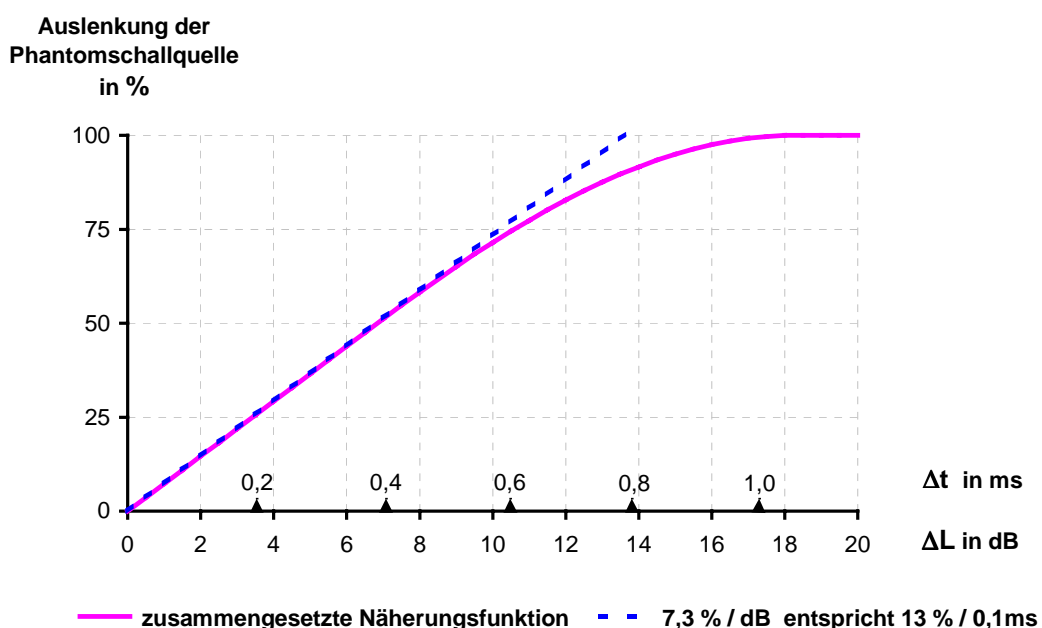


Abbildung 5: Auslenkung ϕ in Abhängigkeit von Laufzeitdifferenz Δt oder Pegeldifferenz ΔL

Die 3-teilige Näherungsfunktion lautet mathematisch: (x entspricht Δ_{ges})

Linearer Verlauf bis 50% Auslenkung:

$$|x| \leq 6 \cdot k: \quad \phi(x) = \frac{x}{12 \cdot k}$$

allmähliche Sättigung bis 100% Auslenkung:

$$6 \cdot k < |x| < 16 \cdot k: \quad \phi(x) = \frac{\text{sgn}(x)}{6000 \cdot k^3} \left[|x^3| + 8 \cdot k \cdot x^2 + 512 \cdot k^2 \cdot |x| - 144 \cdot k^3 \right]$$

konstanter Verlauf ab 100% Auslenkung:

$$|x| \geq 16 \cdot k: \quad \phi(x) = \text{sgn}(x)$$

mit $k = \frac{9}{8}$. Diese Funktion hat die Eigenschaft, an den Grenzen der zusammengesetzten Teile stetig zu verlaufen.

2.3. Öffnungswinkel und graphische Darstellung

Mit Hilfe dieser Näherungsfunktion kann nun der Abbildungsverlauf, die Lokalisationskurve einer bestimmten Stereophonieanordnung angegeben werden. Dazu müssen die relativen Auslenkungsgrade ϕ in die absoluten Auslenkungen Φ umgerechnet werden.

In Kap.2 wurde festgestellt, daß die Gesetze der Auslenkung einer Phantomschallquelle in Übereinstimmung mit dem Assoziationsmodell [Theile 1980] für beliebige Basisgrößen gelten. Somit können nun beliebige Öffnungswinkel α zur Ermittlung der absoluten Auslenkungen verwendet werden:

Umrechnung relative Auslenkung $\phi \rightarrow$ absolute Auslenkung Φ : $\Phi = \left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \phi$

mit Öffnungswinkel α und prozentualem Grad der Auslenkung ϕ

(z.B. $\Phi = \left(\frac{60^\circ}{2}\right) \cdot 50\% = 15^\circ \rightarrow 50\%$ Auslenkung bei normaler Stereobasis)

Die Öffnungswinkel der beiden Lautsprecherbasen L/C und C/R bei Standard-3/2-Stereo-Anordnung betragen 30° . Zur Ermittlung der relativ zur Hauptachse definierten Auslenkung innerhalb dieser beiden Lautsprecherbasen (siehe Abbildung 1) müssen die jeweiligen Auslenkungen korrigiert werden, da die Basismittelpunkte nun bei $\pm 15^\circ$ liegen:

$$\Phi(L/C) = \Phi - 15^\circ$$

$$\Phi(C/R) = \Phi + 15^\circ$$

Es besteht im Programm zusätzlich die Möglichkeit, elektronisch die Zeit- und Pegelverhältnisse der Mikrofon-signale zu manipulieren. (Fenster „erweitert“)

Dies ist z.B. beim sogenannten „critical linking“ nach Williams [Williams 2000] möglich, um die Abbildungsbereiche verschiedener Mikrofonbasen zu verbinden.

Nun können die jeweiligen Auslenkungen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Signals ausgegeben werden. Die entstehende Lokalisationskurve beschreibt damit den theoretischen Abbildungsverlauf einer Stereophonieanordnung.

OCT 70 : rechnerische Lokalisationskurve

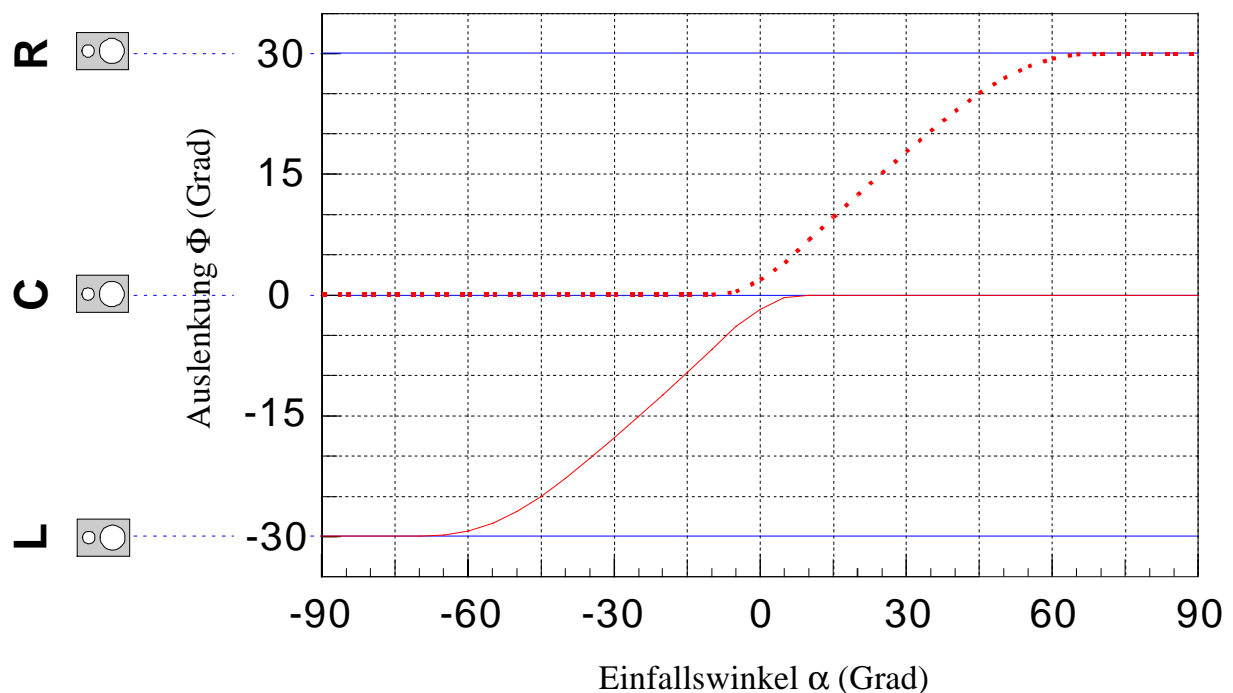


Abbildung 6: rechnerische Lokalisationskurve am Beispiel OCT 70

Zusätzlich können folgende Daten ausgewertet und dargestellt werden:

- die einzelnen Komponenten Pegel- und Laufzeitdifferenz (*wichtig für die Erkennung von Gegensinnigkeiten oder zur Abschätzung der Stabilität aufgrund der Anteile von Pegel- oder Laufzeitdifferenzen!*)
- der Summenleistungspegel aller beteiligten Mikrofone (*bei ungleichmäßigem Verlauf werden bestimmte Bereiche bevorzugt oder benachteiligt*)
- der Pegel (und die Verzögerung) des an der Abbildung in der jeweiligen Basis nicht beteiligten Mikrofons (*entscheidend für Stabilität, Klangfarbe und Abbildungsschärfe*)

3. Feststellen der Gültigkeit der rechnerischen Voraussage

Anhand einiger eigener Vorversuche und der Ergebnisse aus dem Hörversuch kann hinreichend die Gültigkeit der errechneten Daten bestätigt werden [Wittek 2000].

Für drei Mikrofonanordnungen wurden experimentelle Lokalisationskurven ermittelt und mit den rechnerischen Werten verglichen:

a) OCT (Theile: „Optimized Cardiod Triangle“, siehe [Theile 2000])

Aufbau: Hauptachsenwinkel $e = 90^\circ$ Basis L-R = 70 cm

 Höhe $h = 8$ cm

 Richtcharakteristika: L=R=Superniere, C=Niere

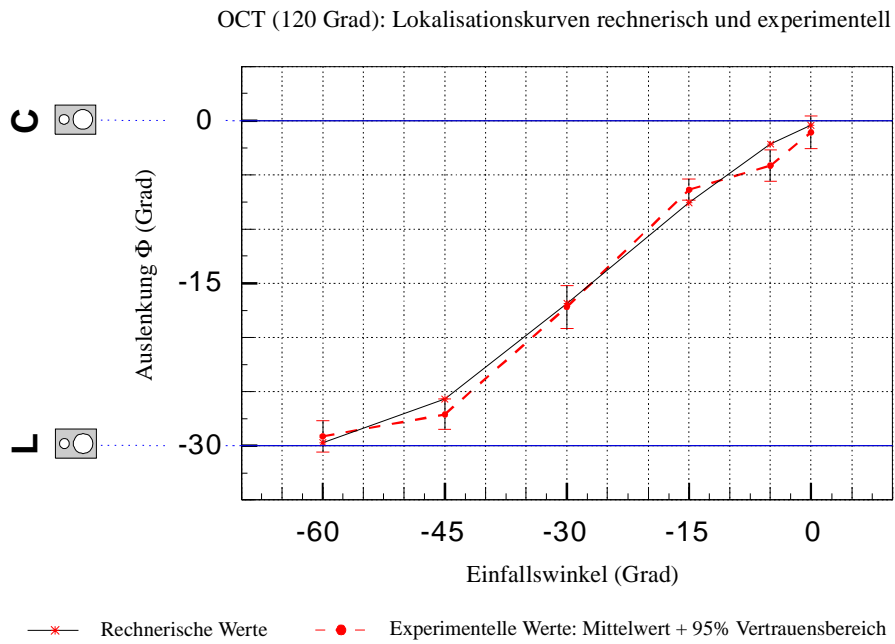


Abbildung 7: experimentelle + rechnerische Lokalisationskurve: OCT 70

b) INA3 – Williams 120° (in [Herrmann/Henkels 1999] und [Williams 2000])

Aufbau: Hauptachsenwinkel $e = 60^\circ$ Basis L-R = 92 cm
 Höhe $h = 26,5$ cm Richtcharakteristika: L= C= R=Niere

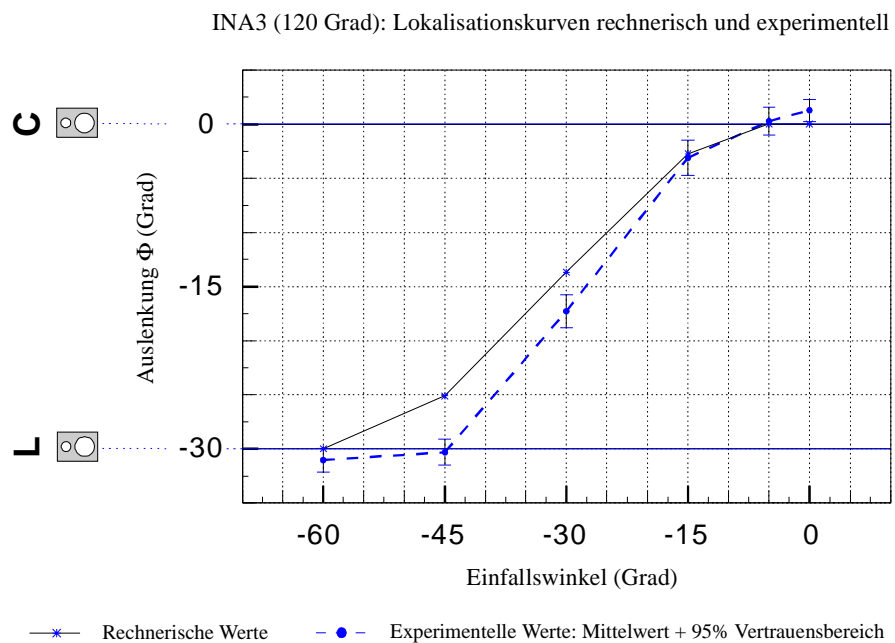


Abbildung 8: experimentelle + rechnerische Lokalisationskurve: INA3 / Williams

c) Quasi-ORTF (zweikanalig)

Aufbau: Hauptachsenwinkel $e = 30^\circ$ Basis L-R = 20 cm
 Richtcharakteristika: L= R=Niere

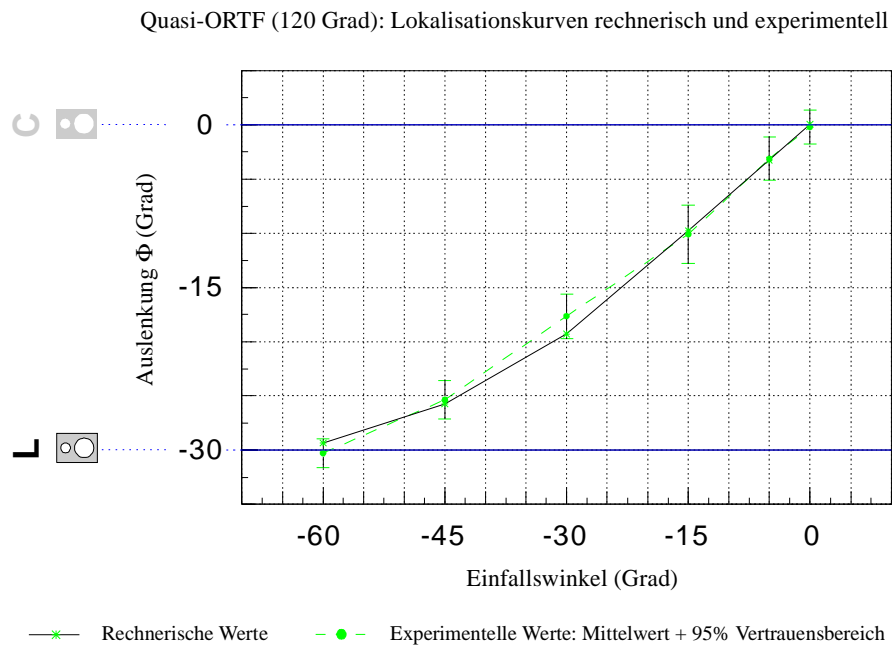


Abbildung 9: experimentelle + rechnerische Lokalisationskurve: Quasi-ORTF

4. „Optimale“ Lokalisationskurve

Eine „optimale“ Lokalisationskurve müßte folgende Eigenschaften haben:

- möglichst linearer Verlauf, d.h. „naturgetreue“, maßstabgerechte Abbildung
 → kein auffälliger Center, d.h. keine Abbildung größerer Bereiche im Center-Kanal
 → keine Verzerrung der Aufnahmeverhältnisse
- möglichst konsistenter Zusammenhang zwischen Pegel- und Laufzeitdifferenz, d.h. immer dasselbe Vorzeichen der beiden Parameter, keine gegensinnigen Verläufe
- möglichst ausgeglichener Verlauf des Summenleistungspegels

zusätzlich bei Drei-Kanal-Mikrofonen:

- möglichst geringes Übersprechen auf das nicht beteiligte Mikrofon, also z.B. geringer Pegel des rechten Kanals bei Abbildung im linken Sektor

Optimaler Verlauf der Lokalisationskurve: lineare, maßstabsgerechte Abbildung

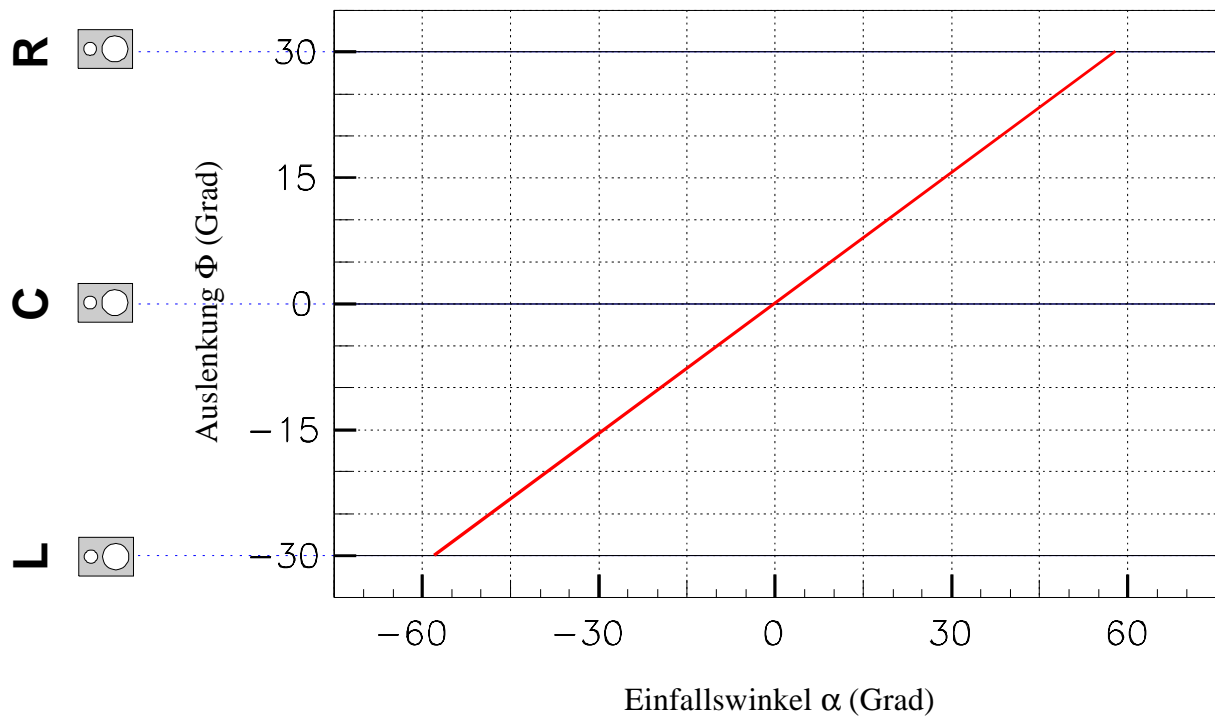


Abbildung 10: Verlauf einer „optimalen“ Lokalisationskurve für einen Aufnahmebereich von ca. 120°

Anhand der Abweichungen von diesen optimalen Bedingungen können bestimmte Fehler und Schwächen einer Abbildung abgelesen werden.

Beispiele dazu in den nächsten Abschnitten.

Keine Aussage können die Kurven zu folgenden Aspekten treffen:

- Räumlichkeit
- Klangfarbe
- Abbildungsschärfe (nur indirekt)
- Raum-/Direktschall-Verhältnis
- frequenzabhängiges Abbildungsverhalten
- Stabilität (nur indirekt)

5. Beispiele Stereo

5.1. ORTF

Aufbau: 2 Nierenmikrofone, Mikrofonbasis: 17,5 cm, Hauptachsenwinkel: 55 Grad

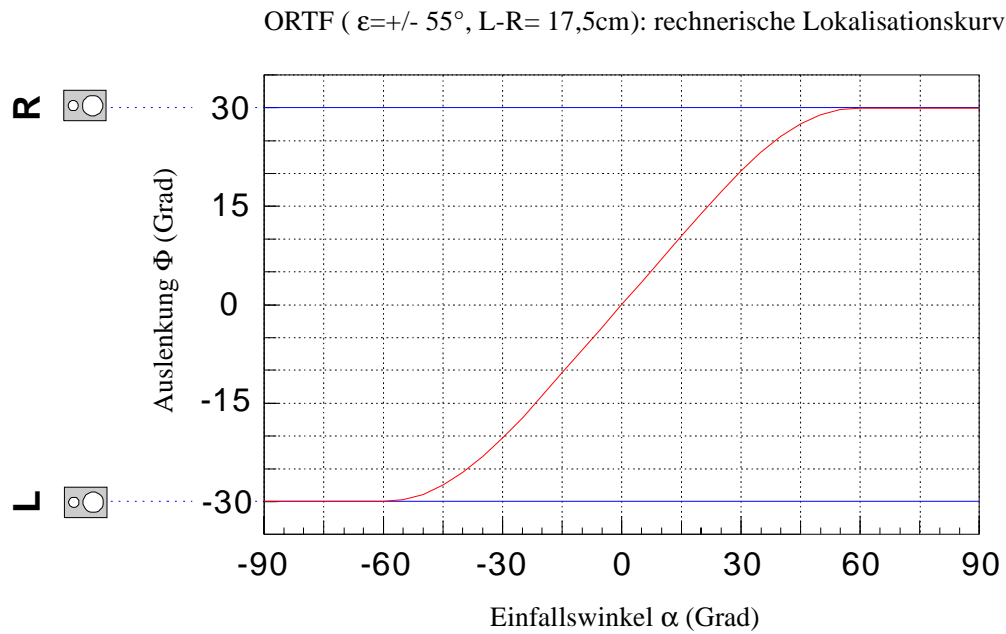


Abbildung 11: rechnerische Lokalisationskurve: ORTF

Aufnahmebereich: ca. 90 Grad

Verlauf: sehr ausgewogen

5.2. XY – koinzident

Aufbau: 2 Nierenmikrofone, Mikrofonbasis = 0, Hauptachsenwinkel = 45 Grad

XY ($\epsilon = 45^\circ$, L-R = 0): rechnerische Lokalisationskurve

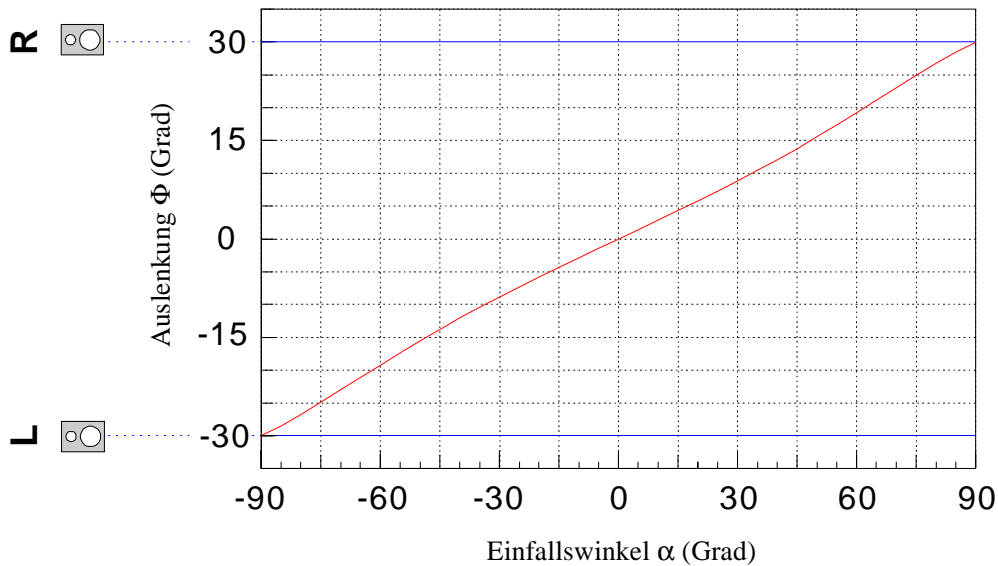


Abbildung 12: rechnerische Lokalisationskurve: XY

Aufnahmebereich: *ca. 180 Grad*

Verlauf: linear

5.3. ab – 40 cm

Aufbau: 2 Kugelmikrofone, Mikrofonbasis = 40 cm

ab (Kugeln, L-R = 40cm): rechnerische Lokalisationskurve

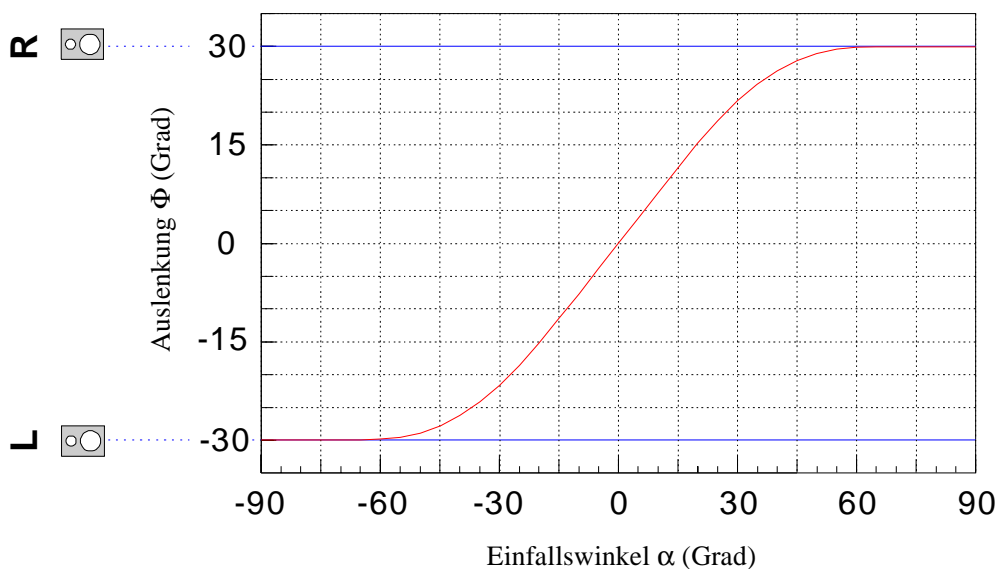


Abbildung 13: rechnerische Lokalisationskurve: ab

Aufnahmebereich: ca. 90 Grad

Verlauf: nach außen abflachend → in der Mitte werden verhältnismäßig kleinere Bereiche des Aufnahmebereichs abgebildet

6. Beispiele Dreikanal

6.1. OCT 50

Aufbau wie →3.3.a) nur L-R=50 cm

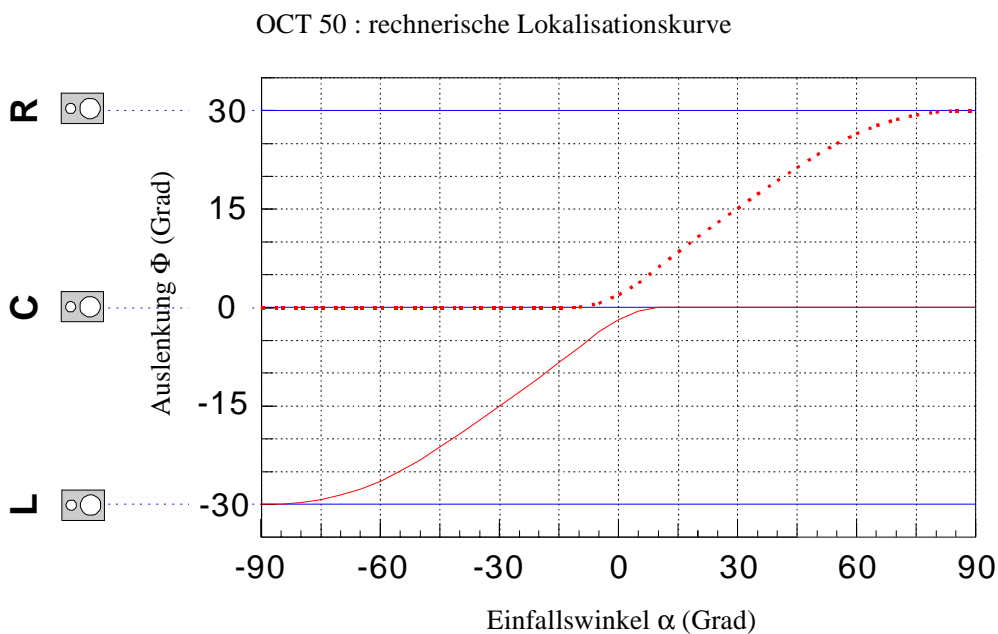


Abbildung 14: rechnerische Lokalisationskurve: OCT 50

Aufnahmebereich: ca. 150 Grad

Verlauf: ausgewogen

Nachteil: Signaldifferenzen gegensinnig im Bereich 35°- 45° Einfallswinkel

6.2. OCT 70 – (siehe 3.3.a)

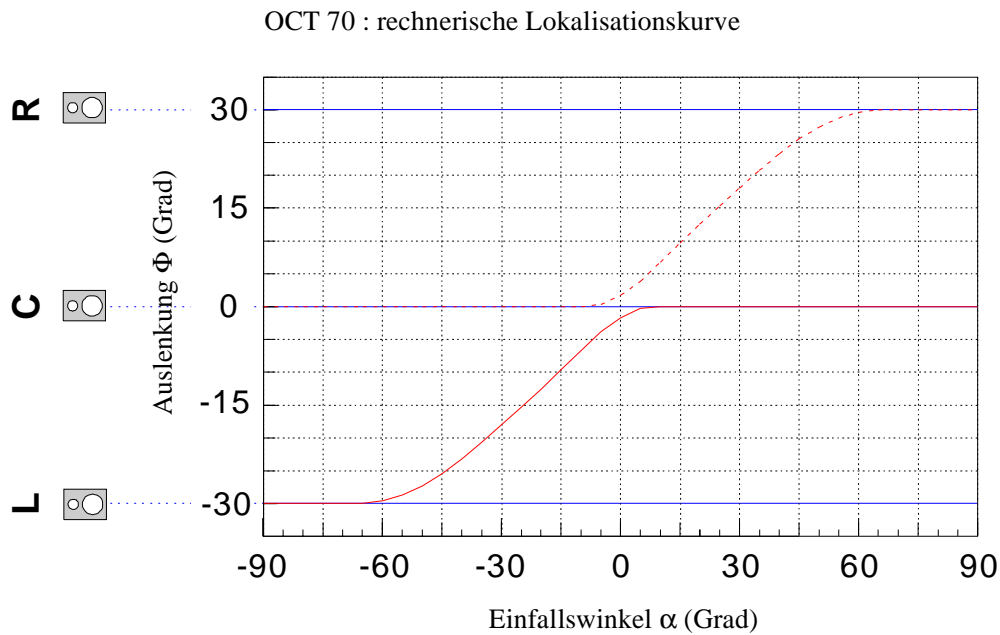


Abbildung 15: rechnerische Lokalisationskurve: OCT 70

Aufnahmebereich: ca. 120 Grad

Verlauf: ausgewogen

Nachteil: Signaldifferenzen gegensinnig im Bereich 30° - 45° Einfallswinkel

6.3. Williams 1

Aufbau: (ähnlich INA3/Williams [→3.3.b](#)) 3 Nierenmikrofone

Mikrofonbasis L-R = 100,1 cm, Höhe = 22,81 cm, Hauptachsenwinkel = 75°

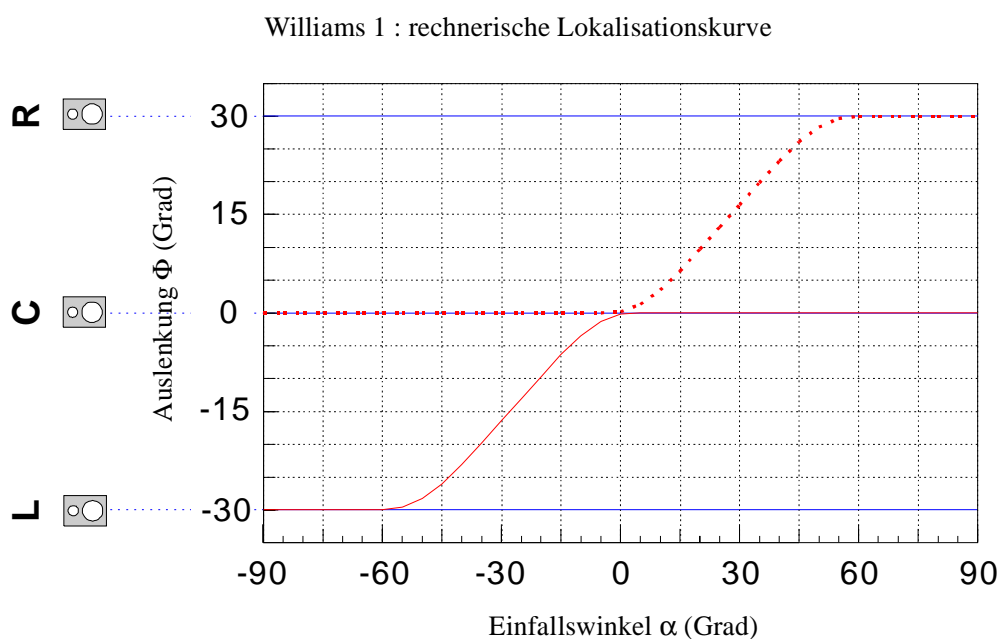


Abbildung 16: rechnerische Lokalisationskurve: Williams 1

Aufnahmebereich: ca. 110 Grad

Verlauf: etwas mittig

Nachteile: Übersprechpegel des nicht an der Abbildung beteiligten Mikrofons erheblich, Summenleistungspegel der drei Mikrofone steigt ebenfalls in der Mitte

6.4. INA3 / Williams 2 (siehe [3.3.b](#))

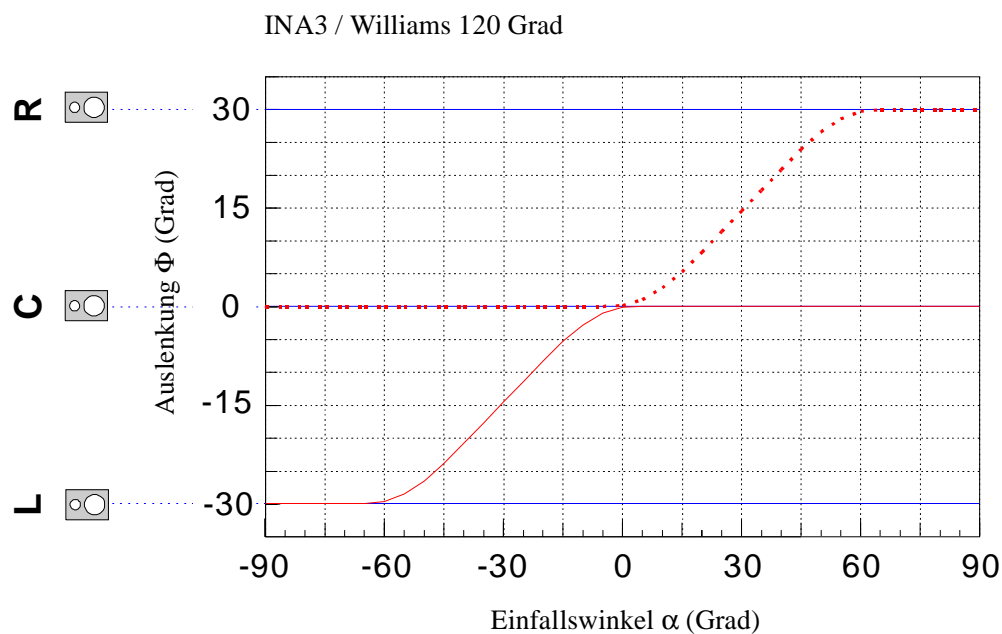


Abbildung 17: rechnerische Lokalisationskurve: INA3 / Williams 2

Aufnahmebereich: ca. 120 Grad

Verlauf: etwas mittig

Nachteil: Übersprechpegel des nicht an der Abbildung beteiligten Mikrofons erheblich, Untersuchungen der Wirkungen dieser Übersprechpegel auf Stabilität, Klangfarbe und Abbildungsschärfe in [Wittek 2000].

7. Literaturhinweise

1. Herrmann, Ulf/ Henkels, Volker(1999): *Vergleich von 5 verschiedenen Hauptmikrofonverfahren* in Bericht zur 20. Tonmeistertagung, Saur, 1999, S. 508-517

-
2. Recommendation ITU-R BS.775-1(1992): *Multichannel stereophonic system with and without accompanying picture*. Genf, 1992.
 3. Theile, Günther(1982): *Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld*, Dissertation, TU Berlin, 1980
 4. Theile, Günther(1984): *Neuere Erkenntnisse zur Wahrnehmung der Richtung und Entfernung von Phantomschallquellen und Konsequenzen für die stereofone Aufnahmepraxis*, in: VDT-Informationen, 1/2-1984
 5. Theile, Günther(2000): *Multichannel Natural Recording*, AES-Preprint No.5156
 6. Williams, Michael(2000): *Multichannel Microphone Array Design*. AES-Preprint No.5157
 7. Wittek, Helmut(2000): *Untersuchungen zur Richtungsabbildung von L-C-R-Hauptmikrofonen*, Diplomarbeit der FH Düsseldorf mit dem Institut für Rundfunktechnik, München, 2000 (Vortrag Tonmeistertagung Hannover 2000) (www.hauptmikrofon.de)