

# Simulation der Schallabstrahlung eines Flügels

Ingolf Bork

Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig Email: [ingolf.bork@ptb.de](mailto:ingolf.bork@ptb.de)

Marcus Kern

Technische Universität Ilmenau

## Einleitung

Einer der Schwachpunkte elektronischer Klaviere ist die Schallabstrahlung über herkömmliche Lautsprechersysteme. Am Beispiel eines digitalen Klaviers (Wersi digital piano CPF1) wurde untersucht, welche Ursachen für die deutlich wahrnehmbaren Klangunterschiede zwischen dem realen Flügelklang und dem über die mitgelieferten Lautsprecher abgestrahlten Klang verantwortlich sind. Es konnte in Vorversuchen geklärt werden, dass diese Unterschiede im wesentlichen auch bei binauraler Übertragung wahrgenommen werden können, wodurch subjektive Vergleiche über Kopfhörer ermöglicht wurden. Da der Klang des hier verwendeten elektronischen Instrumentes auf in reflexionsarmer Umgebung monophon aufgenommenen Einzelklängen beruht, kann die Klangfarbe selbst nicht für die Unterschiede zum realen Instrument verantwortlich gemacht werden. Die Klangveränderungen mit der Anschlagstärke (Dynamik) wird bei diesem Instrument dadurch realisiert, dass auf Klangsamples in sechs Dynamikstufen zugegriffen wird, deren Lautstärke durch die Tastengeschwindigkeit gesteuert wird. Die räumliche Abstrahlung der Einzelklänge über die beiden Lautsprecher erfolgt elektronisch durch so genanntes Intensitätspanning, bei dem die Töne entsprechend ihrer Grundtonhöhe von links nach rechts verteilt werden, was allerdings nicht den Abstrahlbedingungen beim Flügel entspricht.

## Unterschiede der Schallabstrahlung

Während beim Konzertflügel die Schallabstrahlung über den Resonanzboden beidseitig und großflächig erfolgt, wird bei Lautsprechern der Schall mit zunehmender Frequenz stark konzentriert nach vorne abgestrahlt. Das hat zunächst eine völlig anders geartete Schallfeldstruktur zur Folge, zumal der Resonanzboden wegen des von beiden Seiten gegenphasig abgestrahlten Schalles bei tiefen Frequenzen wie ein Dipol wirkt, dessen Auslöschungsebene in der Horizontalen liegt. Der hörbare Tieftonanteil hängt daher stark von der Hörposition relativ zur Resonanzbodenebene ab.

Im Hörvergleich von Kunstkopfaufnahmen konnte ferner festgestellt werden, dass auch die räumliche Ausdehnung der Schallquelle über Lautsprecher schlecht wiedergegeben wird, sowohl die Breite als auch die Höhe des Schallereignisses entsprechen nur unzureichend dem realen geöffneten Flügel. Leichte Verbesserungen konnten dadurch erzielt werden, dass die Lautsprecher etwas nach außen gerichtet und in Resonanzbodenhöhe aufgestellt wurden. Durch Verpolung eines der Lautsprecher konnte ein extrem breites Klangbild erzeugt werden, dass jedoch wegen des fehlenden Mitteneindrucks sehr unrealistisch wirkte.

## Einschwingverhalten

Ein weiterer wesentlicher Unterschied besteht im Einschwingverhalten: Die vom Hammerkopf angeschlagene Klaviersaite erhält ihre gesamte Schwingungsenergie während der Kontaktzeit, daher beginnt die Saitenschwingung stets mit der vollen Amplitude, ein Einschwingvorgang im Instrument kann dagegen lediglich beim Übergang in den Steg erfolgen und zwar dann, wenn die Frequenz der Saite mit der einer Eigenresonanz des Resonanzbodens zusammentrifft. Da die tiefsten beiden Resonanzen bei einem 2 m-Flügel bei etwa 100 Hz bzw 150 Hz liegen, ist dieser Fall eher die



Abbildung 1: Anordnung der BiegeWellenwandler zur Simulation der Schallabstrahlung eines offenen Flügels.

Ausnahme, d.h. der laute Flügelklang beinhaltet einen harten Schwingungseinsatz, der zur naturgetreuen Übertragung über einen Lautsprecher sehr verzerrungsarme Systeme erfordert. Besonders im Frequenzbereich der Eigenresonanzen von Gehäuse und Membran sowie Koppelresonanzen (Bassreflexsystem) sind hörbare Einschwingzeiten die Regel, die zudem auch meist mit unangenehmen Resonanzüberhöhungen im Bassbereich gekoppelt sind.

## Alternative Lautsprechersysteme

Zur gleichzeitigen Lösung des Abstrahl- und Einschwingproblems wurden zwei BiegeWellenwandler ("Mangerwandler") in schwingungsgedämpfte hölzerne Schallwände eingebaut, die zur flügelartigen Schallabstrahlung horizontal angeordnet wurden (vgl. Abb.1). Die hier dargestellte Aufstellungsart lieferte gegenüber allen anderen Versuchen (vertikal, größerer gegenseitiger Abstand, gegenphasige Polung) die beste Übereinstimmung mit dem realen Flügelischallfeld.

Die Mangerwandler wurden wegen ihrer bekanntermaßen kurzen Ein- und Ausschwingvorgänge verwendet, die auf dem Einsatz von BiegeWellenwandlern mit hoher innerer Schwingungsdämpfung beruht. Weiterhin wird durch die beidseitige Schallabstrahlung über die offenen Schallwände auch die Richtcharakteristik des Flügel in der Vertikalen simuliert. Ganz wesentlich sind hierfür auch die Schallreflexionen am Fußboden die besonders bei hartem Belag zu einer effektiven Schallabstrahlung beitragen. Durch den offenen Einbau werden akustische Gehäuseresonanzen vermieden, Schwingungen der Schallwand wurden durch eine Sandwichbauweise mit Moosgummi zwischen zwei Sperrholzplatten weitgehend bedämpft.

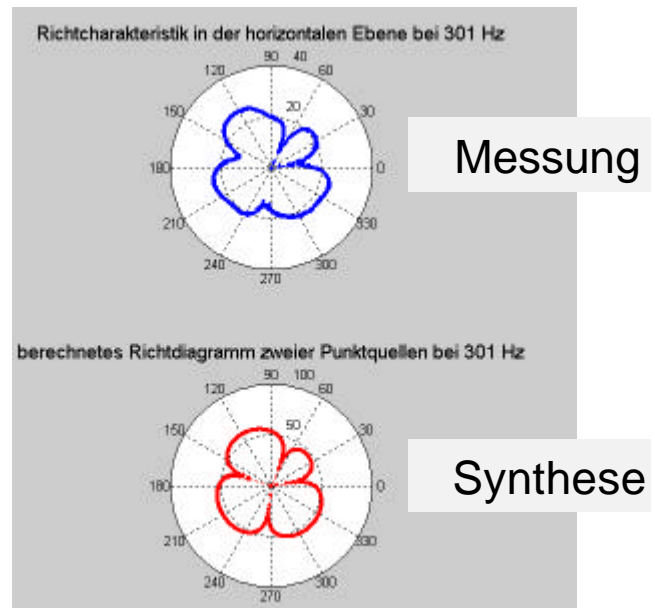
Im subjektiven Vergleich konnten in dieser Aufstellung wesentliche Verbesserungen sowohl bei der Schallquellenabbildung als auch bezüglich des Einschwingverhaltens sowie der Resonanzeffekte im unteren Frequenzbereich festgestellt werden.

Dies bestätigte die Vermutung, dass bereits durch geringfügige Änderungen auf der Schallabstrahlungsseite erhebliche Verbesserungen der Natürlichkeit des Klangbildes erzielt werden können. Für weitere Entwicklungen ist daher gezielt nach Lösungen zu suchen, bei denen der impulsartige Anschlagcharakter insbesondere der harte Toneinsatz des Flügel optimal umgesetzt werden kann. Hierfür sind kräftige dämpfungsoptimierte Lautsprechersysteme erforderlich.

## Wellenfeldsynthese

Eine völlig anders geartete Realisierung des Schallfeldes von Flügeln wurde mit dem Verfahren der Wellenfeldsynthese untersucht. Ziel der Wellenfeldsynthese ist die synthetische Erzeugung von Schallfeldern in einem geschlossenen Raumvolumen, wobei zurzeit zunächst nur zweidimensionale Bereiche realisiert werden<sup>1</sup>. Man erreicht damit gegenüber der üblichen Lautsprecherwiedergabe über zwei Stereo-Lautsprecher eine genauere Ortbarkeit von Schallquellen und zwar unabhängig vom Standort des Hörers im Schallfeld. Da zur Realisierung eine Vielzahl von Übertragungskanälen (64 und mehr) erforderlich ist, wird für Echtzeitanwendungen mit ortsveränderlichen Schallquellen nach Wegen gesucht, das räumliche Abstrahlverhalten komplexer Quellen, wie z.B. Musikinstrumente, durch einfache Punktstrahlerkombinationen<sup>2</sup> nachzubilden.

Zu diesem Zweck wurde zunächst die Richtcharakteristik eines Flügels durch Messung von Impulsantworten auf einem Kreis ( $\varnothing$  4m) um das Instrument ermittelt. Hierbei wurde bei bedämpften Saiten der Resonanzboden über einen elektrodynamischen Schwingerreger mit schnell gleitenden Sinusschwingungen (Chirp) angeregt, und die Übertragungsfunktion zwischen dem erzeugten Schalldruck am Messort in 1,2 m Höhe und der am Steg gemessenen Beschleunigung bestimmt. Durch zeitliche Fensterung der zugehörigen Impulsantwort wurden Reflexionen aus dem Raum weitestgehend unterdrückt. So konnte für jede Frequenz die Winkelabhängigkeit des Pegels auf dem Messkreis bestimmt werden. Nun wurden in einem Optimierungsverfahren die Positionen von Ersatz-Punktquellen auf dem Resonanzboden bestimmt, die bei geeigneter Phasenlage eine der Messkurve möglichst ähnliche Pegelverteilung ergeben sollte, wobei die zugehörige Amplitudenkorrektur bei jeder Frequenz als Frequenzgang der Punktquelle berücksichtigt werden musste. Ein



**Abbildung 2: Vergleich der normierten Richtcharakteristiken von Messung und Punktstrahlersynthese**

Beispiel für eine derartige Optimierung in normierter Darstellung ist in Abb.2 wiedergegeben<sup>3</sup>.

Diese Optimierung muss für alle Frequenzen durchgeführt werden, damit eine einzelne Position für die Ersatz-Punktquellen gefunden werden kann. Werden diese Daten in ein entsprechendes Rechnersystem eingegeben, ist es nun möglich, das synthetische Flügelmodell während der Schallübertragung im virtuellen Raum zu bewegen. Als Eingangsgröße für eine derartige Auralisation müssen aufgrund der gewählten Übertragungsfunktionsgrößen Beschleunigungsdaten am Steg verwendet werden. Nur so lässt es sich erreichen, dass die Schallabstrahlung nicht in die Aufnahme eingeht. Erste praktische Versuche konnten bereits erfolgreich durchgeführt werden.

## Zusammenfassung

Die Schallabstrahlung elektronischer Klaviere kann durch Berücksichtigung wesentlicher Eigenschaften der realen Instrumente erheblich verbessert werden: Dies sind die zweiseitige Abstrahlung in der Horizontalebene (Flügel) sowie die Klangerzeugung über Lautsprechersysteme mit vernachlässigbarer Einschwingzeit. Für schnelle Echtzeitanwendungen bei der Wellenfeldsynthese kann das Abstrahlverhalten in der Horizontalebene bereits durch zwei Punktschallquellen realistisch nachgebildet werden.

<sup>1</sup> Berkhout, A.J., de Vries, D., Vogel, P.: Acoustics control by wave field synthesis, JASA 93(5), 1993, S.2764

<sup>2</sup> Giron, F.: Modellierung der Richtcharakteristik eines Sprechers mittels der Monopolsynthese, Fortschritte der Akustik DAGA 1994, S.841

<sup>3</sup> Kern, M.: Untersuchung der Schallabstrahlung elektronischer Musikinstrumente, Diplomarbeit TU Ilmenau, 2003