# Klimatische Einflüsse auf die Ergebnisse von Frequenzkurvenmessungen

Gunter Ziegenhals

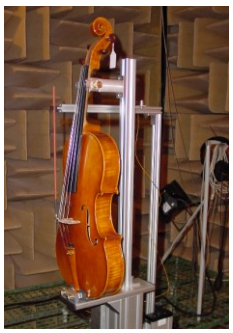
*IfM - Institut für Musikinstrumentenbau e.V. an der TU Dresden, 08267 Klingenthal OT Zwota, post@ifm-zwota.de*

## Einleitung

Will man aus Messungen belastbare Schlussfolgerungen zu den untersuchten Objekten ableiten, so müssen Wiederholungen der Messungen unter gleichen Bedingungen Ergebnisse liefern, deren Fehlerraten hinsichtlich der herangezogenen Merkmale deutlich unter den Merkmalsdifferenzen der verglichenen Objekte liegen. Im Falle der Streich- und Zupfinstrumente (und zweifellos auch im Falle anderer Objekte) werden die geforderten „gleichen Bedingungen“ stets durch die aktuellen klimatischen Verhältnisse sowie den Gebrauchszustand (z.B. sei auf das immer wieder angeführte Einspielen verwiesen) in Frage gestellt. Der Beitrag befasst sich speziell mit den Klimaeinflüssen für den Fall einer klimatisierten Lagerung, wobei aber für die Messung selbst die Klimatisierung kurzzeitig aufgehoben werden muss.

## Messung und Lagerung der Objekte

Bei den hier diskutierten Untersuchungen an Streich- und Zupfinstrumenten handelt es sich um Frequenzkurvenmessungen (FK-Messungen) und in der Folge um die Bewertung aus den Messergebnissen abgeleiteter Merkmale. FK-Messungen erfolgen im Institut für Musikinstrumentenbau (IfM) unter Verwendung der Impulshammeranregung. Mit Ausnahme von Geige und Bratsche kommt dabei ein manueller Anschlag in Spielhaltung (in situ) zur Anwendung. Im Falle der Geige und der Bratsche wird eine Pendelanschlagvorrichtung eingesetzt. Zur Aufnahme des im Ergebnis der Anschläge abgestrahlten Schalls dienen drei im Messraum (reflexionsarmer Raum) verteilte Mikrofone.



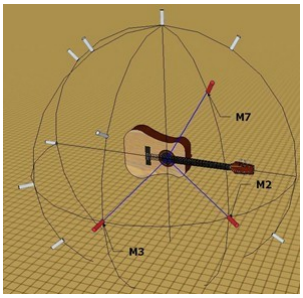



**Abbildung 1: FK-Messung im IfM**

Die Frequenzkurvenmessung erfolgt absolut kalibriert auf an den Mikrofonen ankommenden Schalldruck in Pascal (Pa) pro eingetragener Kraft in Newton (N). Pegelangaben werden auf 1 Pa/N ≙ 0 dB bezogen. Über die Entwicklung der FK-Messtechnik im IfM wird in [1] ausführlich berichtet und es soll deshalb an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden.

Seit dem Sommer 1999 steht für die Aufbewahrung von Instrumenten und diversen Proben im IfM ein klimatisierter Lagerraum zur Verfügung. Die Bedingungen im Raum werden durch die Anlagen im Bereich 20°C ± 1° und 51% rel. Luftfeuchte +3%, -5% gehalten. Mehrfach trat die Frage auf, warum die Luftfeuchte nicht auf etwas niedrigeren Werten um 45 % gehalten wird. Wir mussten mehrfach feststellen, dass Instrumente, die in südlicheren Ländern, insbesondere im Mittelmeerraum, gefertigt wurden, bei wenig unter 45 % rel. Luftfeuchte bereits zu reißen drohen. Zum Schutz von Kundeninstrumenten wurde deshalb ein etwas höherer und damit sicherer Wert gewählt. Weitere klimatisierte Räume existieren im IfM nicht!

## Problemstellung und Lösungsansatz

Bei der regelmäßigen Messung von Kundenserien (Gitarren), dazu wurden diese jeweils ins IfM verbracht, wurden über die Zeit tendenzielle Veränderungen der Eigenschaften, der Frequenzkurvenmerkmale, beobachtet. Zwar konnten mittels Kalibriermessungen Veränderungen an den Sensoren und anderen Komponenten der Messapparatur ausgeschlossen werden, jedoch blieben die eigentlichen Ursachen unklar. Nachmessungen einzelner Instrumente waren nicht möglich, da die Objekte zeitnah zu den Messungen in den Handel gingen. Zudem offenbarten sich die Tendenzen erst nach gewissen Zeiträumen.

Um der Sache auf den Grund gehen zu können, wurde festgelegt, für einen gewissen Zeitraum im Rahmen jeder anfallenden Gitarrenmessung (Einzelmessung oder Serie) zwei unter klimatisierten Bedingungen gelagerte Referenzinstrumente aus dem Bestand des IfM mit zu messen. Ausgewählt wurden:

- Referenzgitarre 1 (RefGit1)
  Takamine Modell C-128
  Baujahr: 10/1979
- Referenzgitarre 3 (RefGit3)
  Versuchsmuster mit ovalem Schallloch (Weißinstrument)
  Baujahr: um 1978

**Abbildung 2: Ausgewählte Referenzinstrumente, RefGit1 links**

Bewusst wurde auf ein lackiertes und ein weißes Instrument zurückgegriffen, um mögliche Klimaeinflüsse besser erkennen zu können. Die Lackierung soll ja das Instrument gerade auch davor schützen.
Die Referenzmessungen begannen im September 2007 und eine erste Serie lief bis Dezember 2010 und umfasste insgesamt 32 Messtage. Eine zweite Serie fand im Zeitraum Oktober 2009 bis August 2012 mit insgesamt 18 Messtagen statt. Der Grund für den Start der zweiten Serie war die Umstellung des Messregimes von Force- auf Rechteckfenster im Impulshammerkanal. Von Oktober 2009 bis Dezember 2010 liefen beide Serien parallel. Es fielen hier insgesamt 11 Messtage an, an denen alle Messungen zweimal, jeweils mit beiden Regimen stattfanden. Darüber hinaus liegen für die beiden Referenzinstrumente an weiteren Messtagen gewonnene Frequenzkurven vor.
Die Bewertung der aufgenommenen Frequenzkurven erfolgt im IfM anhand von aus den Kurven extrahierten Merkmalen. Die Vorgehensweise und die für einzelne Instrumente verwendeten Merkmale einschließlich ihrer Gut-Tendenzen sind ausführlich in [2] beschrieben. Speziell im Fall Gitarre handelt es sich um folgende Größen:

$f_1$ –Frequenz der ersten Frequenzkurvenresonanz, beschreibt die Grundabstimmung des Instrumentes.

$L_3$ –Pegel der dritten Frequenzkurvenresonanz, beschreibt die Übertragung in einem Haupttonbereich der Gitarre

$L_S(50..200)$ – Summenpegel im Bereich 50…200 Hz, beschreibt den Bassbereich.

$L_S(0{,}8k..1{,}2k)$ – Summenpegel im Bereich 800…1200 Hz, charakterisiert die Klarheit eines Klanges.

$L_S(2k..5k)$ – Summenpegel im Bereich 2…5 kHz beschreibt die Helligkeit eines Klanges.

$L_S(50..5k)$ – Summenpegel im Messbereich 50 Hz..5 kHz, charakterisiert näherungsweise die Lautstärke.

Es wird im Folgenden von den oben aufgeführten Messtagen nur die erste Serie von 32 Messtagen im Zeitraum 2007 bis 2010 betrachtet. Es wurden folgende Messungen vorgenommen:

- Messung der beiden Referenzgitarren an jedem der Messtage.
- Messung von insgesamt 32 Exemplaren Modell 1, 154 Exemplaren Modell 2 und 135 Exemplaren Modell 3 eines Industriepartners. Dabei kamen an den einzelnen Messtagen unterschiedliche Anzahlen der jeweiligen Typen zur Messung.
- Messung von weiteren 29 Referenzgitarren des IfM, klimatisiert gelagert, im August 2008. An einigen Instrumenten fanden zu einem späteren Zeitpunkt Repro-Messungen statt.

Die Instrumente des Industriepartners wurden dabei nach Anlieferung zunächst 24 h im klimatisierten Lager konditioniert und anschließend der Messung unterzogen. Eine längere Konditionierung war leider nicht möglich.
Über den gesamten Zeitraum wurden Wetter- und Klimadaten (Temperatur und rel. Luftfeuchte) im Lager und im Labor mittels Datenlogger und im Außenbereich über eine vom IfM in Zusammenhang mit einer Bewitterungsanlage betriebene Wetterstation unter Vergleich mit den für Klingenthal angegebenen Wetterdaten aufgezeichnet.

## Ergebnisse

Zunächst werden die aufgezeichneten Klimadaten betrachtet. Da es in Zusammenhang mit der Aufzeichnung im Labor einige Ausfälle bei den Datenloggern gab, wird ein lückenlos erfasster Teilzeitraum dargestellt:

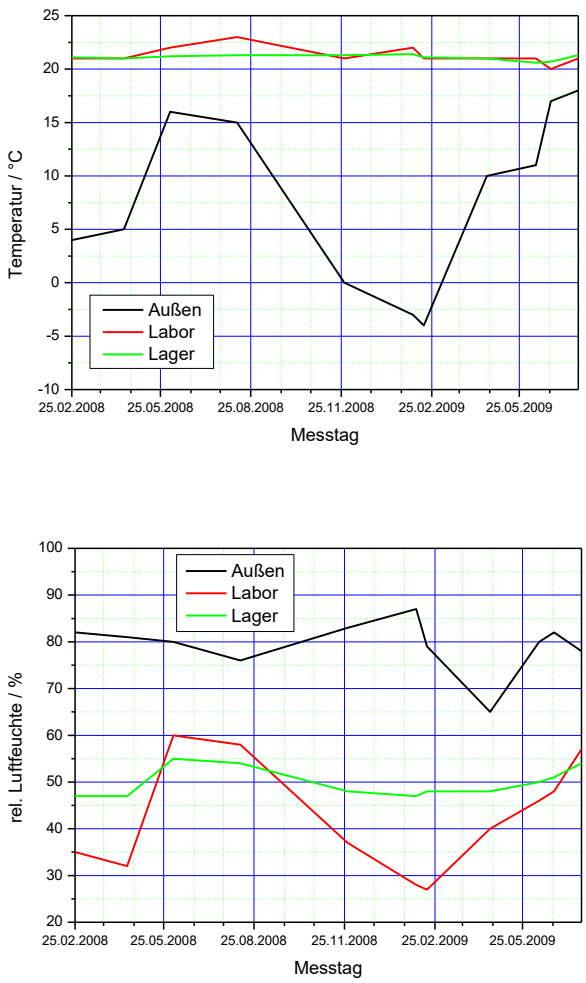



**Abbildung 3: Tagesmittel von Temperatur und Luftfeuchte an den Messtagen**

Während die Temperatur durch die Heizung des Gebäudes im Labor recht konstant um 21°C liegt, schwankt die Luftfeuchte im Labor mangels Klimatisierung stärker als außerhalb des Gebäudes, fällt allerdings auch deutlich geringer aus. Dabei zeichnet sich der zu erwartenden Zusammenhang zwischen Außen- und Innenklima sehr schön ab: Bei etwa konstanter Innentemperatur schwankt die Innenfeuchte proportional zur Außentemperatur.
Es ergeben sich folgende Extremwerte des Klimas im Labor: 21°C / 60% rF und 21°C / 27% rF. Abhängig vom Umgebungsklima stellt sich in Holz eine Gleichgewichtsfeuchte ein. Für europäische Hölzer, insbesondere für Fichte, kann man diese Feuchte gut über das Loughborough-Diagramm

abschätzen [3]. Nach den Laborwerten ist mit Holzfeuchten zwischen 6 % und 11 % zu rechnen, also schon deutliche Unterschiede. Nun besagt der Begriff Gleichgewichtsfeuchte, dass sich der Wert erst nach einer hinreichend langen Zeit tatsächlich einstellt. Die für die Akustik, der Gitarre maßgeblichen Materialparameter Dichte, Elastizitätsmodul und Dämpfung hängen von der Holzfeuchte ab. Untersuchungen im IfM [4] ergaben, dass im Raumklimabereich, der Holzfeuchten zwischen 6 % und 12 % hervorruft, der Einfluss des Klimas auf Elastizitätsmodul, Masse und Dichte bei rund 5 %, auf die Dämpfung bei rund 50 % liegt. Bereits nach 45 min. Einwirkzeit der jeweiligen Bedingungen sind ca. 30 % dieser Veränderungen realisiert. Letzteres entspricht etwa der Zeit für die Entnahme von Instrumenten aus dem Lager sowie der anschließenden Vorbereitung und Durchführung einer Messung im nichtklimatisierten Labor im IfM. Allerdings fanden diese Untersuchungen nicht an Instrumenten sondern an Probestäben der Abmessungen 400 mm x 20 mm x 3 mm statt.
Die über die Frequenzkurvenmessung nachweisbaren Einflüsse, wären also nur über Beiträge der Dämpfung zu erwarten. Eine Erhöhung der Holzfeuchte führt zu höheren Dämpfungen und diese wiederum zu Verringerungen von Resonanzpegeln. Von unseren Merkmalen sollte es also den Pegel der dritten Resonanz der Frequenzkurve betreffen.
Da die Klimadaten im Labor nicht kontinuierlich vorlagen, wurde nach Zusammenhängen mit dem Außenklima gesucht. Dieses steht, wie gezeigt, zumindest in Bezug auf die Luftfeuchte in engen Zusammenhang mit dem Laborklima. In der Tat findet sich bei den wiederholt vermessenen Referenzinstrumenten ein solcher Zusammenhang. Der Pegel der dritten Resonanz verändert sich proportional mit der Außentemperatur.

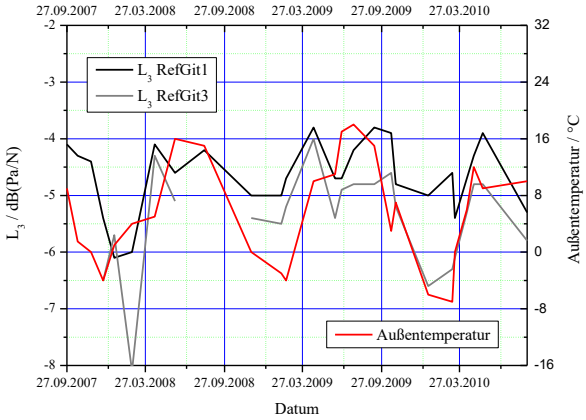



**Abbildung 4: Verlauf von L3 beider Referenzgitarren im Vergleich zur Außentemperatur**

Die Unterbrechungen in den Datenverläufen resultieren aus nicht in jedem Falle für alle Messtage vorliegenden verwertbaren Daten beider Instrumente. Zunächst ist festzustellen, dass sich der Einfluss für das nicht lackierte Instrument RefGit3 deutlicher abzeichnet. Dies erwartet man auch. Andererseits fällt der Einfluss insgesamt gerade entgegengesetzt zur Erwartung aus. Es zeigt sich eine weitere, allerdings sehr schwache Korrelation: Der Summenpegel ***$L_5$(2k..5k)*** verläuft indirekt proportional zur Außentemperatur. Dies trifft eher den erwarteten Zusammenhang zwischen Luftfeuchte und Dämpfung im Material.
Auswertungen der Daten der Exemplarmessungen der drei Gitarrentypen zeigten keine Hinweise auf Zusammenhänge der gemessenen Frequenzkurvenmerkmale und den klimatischen Verhältnissen im Bereich Zwota. Die Untersuchungen erfolgten hier derart, dass Tagesmittelwerte über die Exemplare der einzelnen Typen gebildet wurden. Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Exemplarstreuungen offensichtlich den Klimaeinfluss überdecken.

Es verbleibt zunächst die Frage, warum die Pegel der dritten Frequenzkurvenresonanz mit steigender Temperatur und damit steigender zu erwartender Holzfeuchte wachsen und nicht fallen? Dazu werden Messergebnisse zum Zusammenhangs zwischen Umgebungsklima (Klimawert) und Holzeigenschaften betrachtet (Abbildung 5). Die dargestellten Zusammenhänge wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes des IfM [4] gemessen.

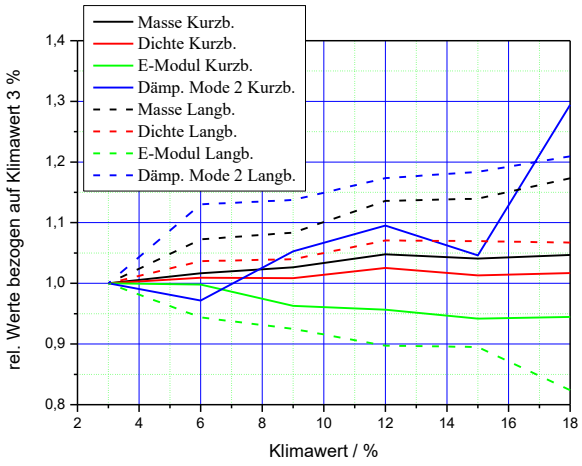



**Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Umgebungsklima und Holzeigenschaften**

In Abbildung 5 werden die auf einen Umgebungsklimawert von 3 % bezogenen Daten dargestellt. Im Falle der Langbehandlung (Langb.) wirkte das Klima 48 h auf die Proben ein, im Falle der Kurzbehandlung nur 45 min. Unter Klimawert wird die mittlere Gleichgewichtsfeuchte verstanden, die sich bei entsprechend vorgegebenen Werten von Temperatur und rel. Luftfeuchte nach dem Loughborough-Diagramm [3] einstellen sollte. In der Praxis reagieren jede Holzart und innerhalb jeder Holzart einzelne Chargen jeweils anders. Die Angabe der tatsächlich gemessenen Holzfeuchte würde keine klare Abhängigkeit der Eigenschaften vom Umgebungsklima liefern. Die sich tatsächlich einstellende Holzfeuchte ist für die vorliegende Fragestellung nicht relevant. Sie wird es erst, wenn man den Prozess ggf. beeinflussen will.
Wie bereits ausgeführt, zeigten die Untersuchungen, dass nach 45 min ca. 30 % der Veränderungen der Dämpfung realisiert sind. In Abbildung 5 ist nun gut zu erkennen, dass sich bei kurzzeitiger Belastung im auftretenden Klimabereich die Dämpfungsänderung nicht monoton verhält. Sie schwankt in ihrer Veränderung. Dies scheint die Ursache für

den beobachteten, so nicht erwarteten Zusammenhang zwischen Klima und Pegel der dritten Resonanz der Frequenzkurve zu sein. Die erwartete Tendenz wird sich offenbar erst bei Einstellung des Gleichgewichtszustandes ergeben.

Abschließend soll noch die Streuung der Merkmalswerte der Referenzmessungen mit der Breite der Merkmalsverteilung der Stichprobe der insgesamt 31 Referenzgitarren des IfM betrachtet werden. Dazu erfolgte zunächst eine Faktorenanalyse der Frequenzkurvendaten der 31 Instrumente einschließlich der Mehrfachmessungen eines Teils der Stichprobe. Das Ergebnis zeigt Abbildung 6 für zwei gefundene Faktoren.

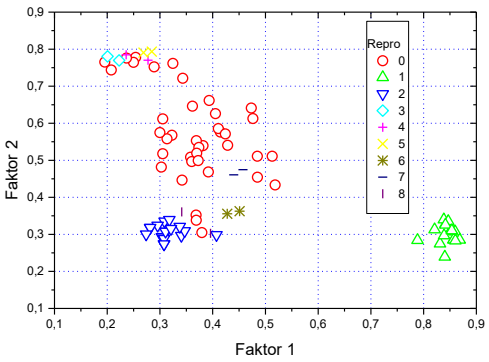



**Abbildung 6: Ergebnis einer Faktorenanalyse mit den Daten der Frequenzkurven der Gesamtstichprobe Referenzgitarren**

Die Gruppierung (Repro) ist wie folgt organisiert: 0 – Alle Instrumente für die nur eine Messung in die Auswertung eingeht, 1 und 2 – die beiden vielfach gemessenen Referenzgitarren 1 und 3, 3 bis 8 – sechs Instrumente für die jeweils eine Reproduzierbarkeitsmessung erfolgte. Wir erkennen, dass die Wiederholgenauigkeit bei einfacher Repromessung recht gut ausfällt, die Vielfachmessung der Referenzgitarren 1 und 3 über drei Jahre durchaus eine gewisse Streuung liefert. Insbesondere eine Messung von RefGit3 sondert sich etwas ab. Hier ist ein nicht bemerkter Messfehler nicht auszuschließen.

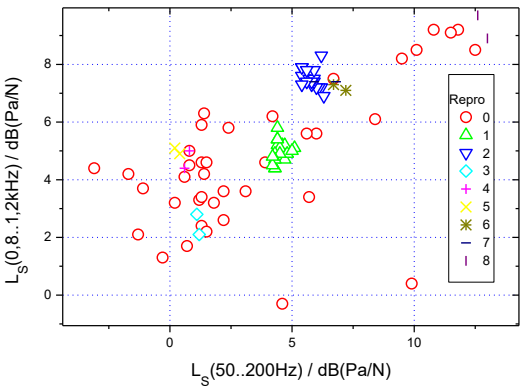



**Abbildung 7: Streudarstellungen von zwei Frequenzkurvenmerkmalen für die Gesamtstichprobe Referenzgitarren**

Abbildung 7 stellt das gleiche Szenario anhand der Verteilung von zwei Frequenzkurvenmerkmalen für die Gesamtstichprobe Referenzgitarren dar. Die anhand der Ergebnisse der Faktorenanalyse getroffenen Aussagen bestätigen sich.

## Zusammenfassung

Motiviert durch eine zunächst nicht erklärbare tendenzielle Veränderung von Ergebnissen bei Frequenzkurvenmessungen an Konzertgitarren wurden über drei Jahre an jedem anfallenden „Gitarrenmesstag“ zwei, unter klimatisierten Bedingungen gelagerte Referenzinstrumente aus dem Bestand des IfM in die jeweils anfallenden Messungen einbezogen. Nachdem zunächst Defekte an der Messapparatur sowie Drifterscheinungen in den Kalibrierwerten der Aufnehmer ausgeschlossen werden konnten, konzentrierte sich die Ursachenforschung auf klimatische Einflüsse. Da die gemessenen Kundeninstrumente nur bedingt konditioniert werden konnten und auch die Referenzinstrumente für die Messung aus dem klimatisierten Lager ins nichtklimatisierte Labor verbracht werden müssen, wurde hier das Hauptproblem vermutet.
Während im Labor des IfM auch ohne Klimaanlage die Temperatur durch die Heizung, und die Lage der Räume recht stabil auf 21°C gehalten wird, schwank die Luftfeuchte deutlich zwischen 27 % und 60 %. Dieser Wertebereich ist zweifellos auf typische Nutzungsräume im europäischen Raum übertragbar. Frühere Untersuchungen zeigten, dass das Umgebungsklima über die Veränderung der Luftfeuchte insbesondere die Materialdämpfung beeinflusst. Aus diesem Grunde war vorrangig mit einem Einfluss auf die Pegel der Resonanzen der Frequenzkurven zu rechnen. Tatsächlich zeigt sich dieser bei den Referenzinstrumenten, allerdings teilweise mit unerwarteter Tendenz. Diese Tendenz entsteht aufgrund nur relativ kurzer Einwirkzeiten des Klimas, die für eine Einstellung des Gleichgewichtszustandes nicht ausreichen. Bei den Messserien an Kundeninstrumenten zeigten sich diese Klimaeinflüsse nicht. Offenbar werden sie durch die Exemplarstreuung überdeckt.

## Literatur

[1] Ziegenhals, G.: Die Entwicklung der Frequenzkurvenmesstechnik im Institut für Musikinstrumentenbau. Seminar des FAMA in der DEGA 2015 in Hamburg

[2] Ziegenhals, G.: Subjektive und objektive Beurteilung von Musikinstrumenten. Eine Untersuchung anhand von Fallstudien. Dissertation TU Dresden 2010

[3] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer Verlag 1982

[4] Schiema, H.; Ziegenhals, G.: Holzalterung und akustisch relevante Eigenschaften. Fortschritte der Akustik – DAGA 2012