

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>10</b> |
| <b>2 Psychoakustische Grundlagen</b>                                       | <b>12</b> |
| 2.1 Grundlegende Gehöreigenschaften . . . . .                              | 12        |
| 2.1.1 Aufbau des Ohrs . . . . .  | 12        |
| 2.1.2 Frequenzskalen . . . . .   | 13        |
| 2.1.3 Hörfläche . . . . .  | 15        |
| 2.1.4 Kurven gleicher Lautheit . . . . .                                   | 17        |
| 2.2 Modelle und Berechnung der Erregung . . . . .                          | 18        |
| 2.3 Maskierung, . . . . .  | 20        |
| Berechnung der Verdeckungsschwelle . . . . .                               | 20        |
| 2.3.1 Simultanmaskierung . . . . .   | 20        |
| 2.3.2 Zeitliche Maskierung . . . . .                                       | 22        |
| 2.3.3 Addition von Maskierungsschwellen . . . . .                          | 24        |
| 2.3.4 Binaurale Effekte . . . . .  | 24        |
| 2.4 Nichtlineare Eigenverzerrungen des Ohres . . . . .                     | 24        |
| 2.5 Psychoakustische Empfindungsgrößen . . . . .                           | 27        |
| 2.5.1 Lautheit . . . . .   | 27        |
| 2.5.2 Schärfe . . . . .  | 28        |
| 2.5.3 Modulationskenngrößen . . . . .                                      | 29        |
| 2.5.4 Klanghaftigkeit . . . . .  | 32        |
| 2.5.5 Sensorischer Wohlklang . . . . .                                     | 33        |
| 2.6 Gerade wahrnehmbare Schalländerungen . . . . .                         | 34        |
| 2.7 Wahrnehmbarkeit von nichtlinearen Verzerrungen . . . . .               | 37        |
| 2.7.1 Theoretischer Verlauf der Klirrschwellen für Quinten . . . . .       | 38        |
| 2.7.2 Klirrschwellen bei der Übertragung von Instrumentenklängen . . . . . | 40        |
| 2.7.3 Untersuchungen von C. Günthersen . . . . .                           | 41        |
| 2.8 Kognitive Effekte . . . . .  | 44        |
| 2.9 Qualitätsbewertungsverfahren . . . . .                                 | 45        |
| 2.9.1 Speech Signal Degradation . . . . .                                  | 46        |
| 2.9.2 ASD - Auditory Spectral Distance . . . . .                           | 47        |
| 2.9.3 PAQM - Perceptual Audio Quality Measure . . . . .                    | 48        |
| 2.9.4 NMR - Noise to Mask Ratio . . . . .                                  | 48        |
| 2.9.5 OASE - Objective Audio Signal Evaluation . . . . .                   | 49        |
| 2.9.6 DIX - Disturbance Index . . . . .                                    | 49        |
| 2.9.7 PERCEVAL - PERCeptral EVALuation . . . . .                           | 50        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.9.8    | POM - Perceptual Objective Measurement . . . . .   | 50        |
| 2.9.9    | Qualitätsbeurteilung mittels BARK-Transformation . . . . .   | 51        |
| 2.9.10   | Toolbox . . . . .  | 51        |
| 2.9.11   | Verfahren von Stuart . . . . .   | 52        |
| 2.9.12   | DS und Rnonlin . . . . .   | 52        |
| 2.9.13   | GedLee metric . . . . .  | 53        |
| 2.9.14   | PEAQ - Perceptual Evaluation of Audio Quality . . . . .  | 53        |
| 2.9.15   | Einschätzung der existierenden Verfahren zur Beurteilung der Hörbarkeit nichtlinearer Verzerrungen . . . . . | 54        |
| <b>3</b> | <b>Frequenzgangmessung</b>   | <b>56</b> |
| 3.1      | Verfahren zur Frequenzgangmessung . . . . .  | 59        |
| 3.2      | Messung des Frequenzgangs mit Pseudozufallsfolgen . . . . .  | 60        |
| 3.2.1    | Familien binärer Korrelationsfolgen . . . . .  | 61        |
| 3.2.2    | Eigenschaften der Testsignale . . . . .  | 63        |
| 3.2.3    | Frequenzgangmessung schwach nichtlinearer Audiosysteme . . . . .   | 65        |
| 3.3      | Messung nichtlinearer Verzerrungen mit Pseudozufallsfolgen . . . . .   | 70        |
| <b>4</b> | <b>Perzeptuelles Messverfahren</b>   | <b>78</b> |
| 4.1      | Übersicht über das Messverfahren . . . . .   | 78        |
| 4.2      | Auswahl des geeigneten psychoakustischen Modells . . . . .   | 79        |
| 4.2.1    | Anforderungen an das psychoakustische Modell . . . . .   | 79        |
| 4.2.2    | Bewertung psychoakustischer Messverfahren . . . . .  | 79        |
| 4.2.3    | Verzerrungsmessung mit PEAQ . . . . .  | 80        |
| 4.3      | Messung von Klirrschwellen bei Zweitönen . . . . .   | 81        |
| 4.3.1    | Nachbildung der Klirrschwellen mit einem einfachen FFT-basierten psychoakustischen Modell . . . . .          | 83        |
| 4.3.2    | Nachbildung der Klirrschwellen mit einem erweiterten FFT-basierten Modell . . . . .                          | 85        |
| 4.3.3    | Nachbildung der Klirrschwellen mit einem Filterbankmodell . . . . .  | 88        |
| 4.4      | Nachbildung der Klirrschwellen für Sägezahnsignale . . . . .   | 89        |
| 4.5      | Zeitliche Maskierung . . . . .   | 91        |
| 4.6      | Implementierung . . . . .  | 93        |
| 4.6.1    | Filterbankbasierte Erregungsberechnung . . . . .   | 93        |
| 4.6.2    | Lautheit . . . . .   | 103       |
| 4.6.3    | Schärfe . . . . .  | 105       |
| 4.6.4    | Rauigkeit . . . . .  | 107       |
| 4.6.5    | Klanghaftigkeit . . . . .  | 111       |
| 4.6.6    | Sensorischer Wohklang . . . . .  | 117       |
| 4.6.7    | Mittelwertbildung . . . . .  | 117       |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>5</b>  | <b>Ergebnisse</b>  | <b>119</b> |
| 5.1       | Bestimmung der Klirrschwellen bei Musiksignalen . . . . .                                  | 119        |
| 5.1.1     | Messungen an Systemen mit regulären Verzerrungen . . . . .                                 | 119        |
| 5.1.2     | Simulation von Systemen mit Quantisierung . . . . .  | 125        |
| 5.2       | Auswirkung von nichtlinearen Verzerrungen auf psychoakustische Empfindungsgrößen . . . . . | 131        |
| 5.3       | Audioanalysator . . . . .  | 144        |
| 5.3.1     | Audioanalysator-Hardware . . . . .   | 144        |
| 5.3.2     | Audioanalysator Software . . . . .   | 146        |
| 5.4       | Messungen an Verzerrerschaltungen . . . . .  | 147        |
| <b>6</b>  | <b>Zusammenfassung</b>   | <b>154</b> |
| <b>7</b>  | <b>Glossar</b>   | <b>156</b> |
| <b>8</b>  | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>159</b> |
| <b>9</b>  | <b>Anhang</b>  | <b>165</b> |
| 9.1       | Ergebnisse der Berechnung psychoakustischer Empfindungsgrößen . . . . .                    | 165        |
| 9.1.1     | Lautheit . . . . .   | 165        |
| 9.1.2     | Schärfe . . . . .  | 167        |
| 9.1.3     | Rauigkeit . . . . .  | 168        |
| 9.1.4     | Klanghaftigkeit . . . . .  | 169        |
| 9.2       | Auswirkung von Verzerrungen auf psychoakustische Empfindungsgrößen. . . . .                | 170        |
| 9.2.1     | Lautheit . . . . .   | 170        |
| 9.2.2     | Schärfe . . . . .  | 171        |
| 9.2.3     | Rauigkeit . . . . .  | 172        |
| 9.2.4     | Klanghaftigkeit . . . . .  | 173        |
| 9.3       | Schaltpläne der Verzerrerschaltungen . . . . .   | 174        |
| <b>10</b> | <b>Symbolverzeichnis</b>   | <b>176</b> |