

5.5.5 Polarität

Die Polarität der von der Gitarre erzeugten Spannung hängt außer von der Saitenschwingung noch von der Magnetpolarität, vom Wicklungssinn und von der Verkabelung ab. Alte Fender-Tonabnehmer hatten einen gelben (oder weißen), und einen schwarzen (oder blauen) Draht; der gelbe Draht ging zum Schalter, der schwarze auf Masse. Bei sehr frühen Fender-Gitarren zeigten die Magnet-Nordpole zur Saite, in der Regel (von der es Ausnahmen gibt) liegt aber der Südpol oben. Der Wicklungssinn ist beim Stratocaster-Tonabnehmer im Uhrzeigersinn, beim Telecaster-Tonabnehmer im Gegenuhrzeigersinn. Bei der Jazzmaster liegt beim Hals-Tonabnehmer der Südpol oben, beim Steg-Tonabnehmer der Nordpol. Auch der Wicklungssinn der beiden Spulen ist unterschiedlich, damit beim gemeinsamen Betrieb die Nutzsignale addiert, die Brummspannungen jedoch ausgelöscht werden – ein Vorteil, den sich auch die 70er-Jahre-Stratocaster zunutze machte (mittlerer Tonabnehmer magnetisch und elektrisch umgepolt). Daraus kann man entweder folgern, dass die Tonabnehmerpolarität für den Klang keine große Bedeutung hat, oder, dass hier ein Geheimnis des Vintage-Sounds liegt.

Seit den Arbeiten von G. S. Ohm (1843) und H. v. **Helmholtz** (1863) wurde für lange Zeit das Gehör als 'phasentaub' angesehen: Nur die Teiltonpegel bestimmen demzufolge den Klang, nicht aber deren Phase. Zu dieser Vermutung gab es zunächst widersprüchliche Versuchsergebnisse, bis um die Mitte des 20. Jh. in umfangreichen psychoakustischen Versuchen zweifelsfrei die Phasenempfindlichkeit des Gehörs nachgewiesen wurde. Aber nicht alle Phasenänderungen sind hörbar – das macht die Sache kompliziert. Alle folgenden Betrachtungen betreffen **diotische** Darbietung (beide Ohren erhalten dasselbe Signal). Zwar wird Musik in der Regel **dichotisch** angehört (unterschiedliche Signale auf beiden Ohren), das Umpolen eines Tonabnehmers erzeugt aber einen diotischen *Unterschied*.

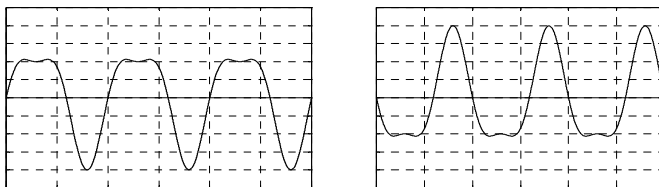


Abb. 5.5.10: Zeitfunktionen, aus erster und zweiter Harmonischer zusammengesetzt; durch Umpolen aufeinander abbildbar.

Abb. 5.5.10 zeigt zwei gleichspannungsfreie Zeitfunktionen, die sich nur in ihrer Polarität unterscheiden. Wählt man als Grundfrequenz z.B. 200 Hz und eine nicht zu geringe Wiedergabelautstärke, hört man beim Umschalten einen kleinen **Klangunterschied***. Dies bedeutet, dass das Gehör die Absolutphase erkennen kann, dass also eine Einwärtsbewegung des Trommelfells zu einer anderen Wahrnehmung führt als eine entsprechende Auswärtsbewegung. Die Physiologie stützt diese Erkenntnis mit Potentialableitungen aus den Innenohr-Rezeptoren (Haarzellen), die bevorzugt auf Anregungen einer Polarität reagieren (Stereozilienbiegung in Richtung auf den Modiolus). Diese Leistung des Gehörs wäre schon Grund genug, der Tonabnehmerpolarität Beachtung zu schenken; noch wichtiger ist aber, dass in Gitarrenverstärkern fast immer Nichtlinearitäten auftreten, deren Wirkung polaritätsabhängig ist. Selbst beim sog. "Clean-Betrieb" ist zumindest der Anschlag leicht übersteuert, über "Crunch" bis zu "Lead" nimmt der **Klirrfaktor** auf extreme Werte zu, was keinesfalls ein Defizit, sondern gewollte Klangformung ist. Nur bei punktsymmetrischer (ungerader) Übertragungskennlinie würde ein Umpolen des Eingangssignals auch nur zu einem Umpolen des Ausgangssignals führen; bei Verzerrungen gerader Ordnung ändert sich mit dem Umpolen des Eingangssignals auch die Form und damit das Pegelspektrum des Ausgangssignals (Abb. 5.5.11).

* Bei höheren Frequenzen führt Umpolen allerdings nicht zu hörbaren Klangunterschieden.

Abb. 5.5.11 zeigt im linken Bild eine nichtlineare Kennlinie, wie sie z.B. in einer Röhrenverstärkerstufe auftreten könnte. Gibt man eines der Signale aus Abb. 5.5.10 als Abszissenfunktion vor, so erhält man als Ordinatenwerte die in Abb. 5.5.11 im mittleren und rechten Bild dargestellten Zeitfunktionen. Auch ohne quantitativ-formale Beschreibung sieht man sofort die polaritätsabhängigen Unsymmetrien, die durch die Nichtlinearität verursacht werden. Je nach Eingangs-Signalpolarität entstehen somit zwei unterschiedliche Ausgangssignale; nur bei speziellen Halbwellensymmetrien bleiben die vom Umpolen hervorgerufenen Klangunterschiede auf den Signalbeginn begrenzt (und damit unbedeutend), im allgemeinen Fall kann das Umpolen des Tonabnehmers u.U. zu hörbaren Klangunterschieden führen.

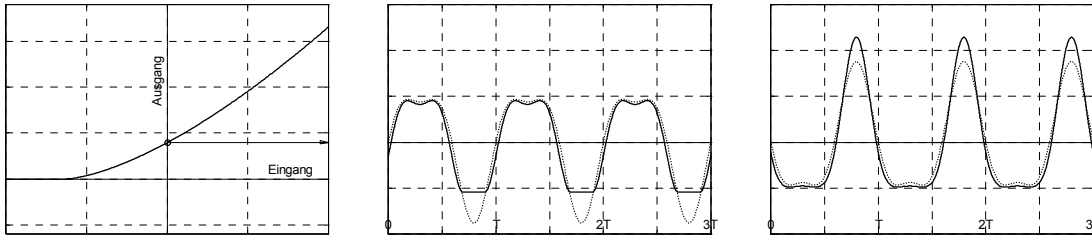


Abb. 5.5.11: Übertragungskennlinie (links), Zeitfunktionen der Signale aus Abb. 5.5.10 (-----), Ausgangssignale nach Durchlaufen der nichtlinearen Übertragungskennlinie (—). Alle Signale sind mittelwertsfrei.

Als nächstes ist die Frage zu klären, ob und in welchem Maß sich beim Magnettonabnehmer die positiven und negativen Spannungshalbwellen unterscheiden. Hierzu wurde die Halstonabnehmer-Spannung einer **Stratocaster** (USA) näher untersucht. Über dem Magnetpol des Halstonabnehmers wurde die E₄-Saite mit einem Plektrum nach unten gedrückt und plötzlich losgelassen (Kraftsprung, Kap. 1 und 2). Es ergibt sich ein rechteckförmiger Schnelleverlauf (**Abb. 5.5.12**), zu dem ein dreieckförmiger Auslenkungsverlauf gehört. Wegen der nichtlinearen Magnetkennlinie (Kap. 5.8) ist die Spitze im Flussdichteverlauf gekrümmt (die zum linearen Modell gehörende Dreieckspitze ist in Abb. 5.5.12 dünn gezeichnet). Differenzieren des Flussdichteverlaufs ergibt den Verlauf der induzierten Spannung: Rechteckförmig im Fall linearer Magnetkennlinie, spitz zulaufend beim nichtlinearen Modell. Die gemessene Spannung zeigt große Ähnlichkeit, die leichten Oszillationen sind Auswirkungen der hier nicht nachgebildeten Dispersion (Kap. 1.3.2).

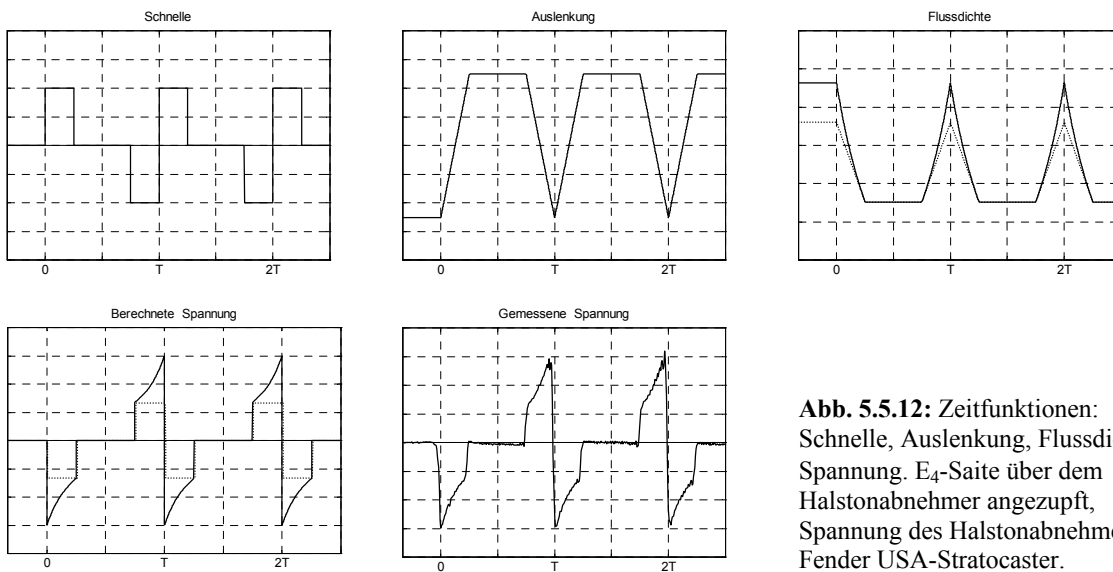


Abb. 5.5.12: Zeitfunktionen: Schnelle, Auslenkung, Flussdichte, Spannung. E₄-Saite über dem Halstonabnehmer angezupft, Spannung des Halstonabnehmers. Fender USA-Stratocaster.

Bei den Messungen war der Stratocaster-Tonabnehmer mit einem 1-k Ω -Widerstand belastet, um die von Wicklung und Kabel gebildete Resonanz stark zu bedämpfen. Im interessierenden Frequenzbereich bilden Wicklungswiderstand, Wicklungsinduktivität und 1-k Ω -Widerstand einen Tiefpass erster Ordnung, dessen reeller Pol rechnerisch mit einer Nullstelle kompensiert wurde; zusätzlich wurde ein reeller Pol bei $f_x = 9000$ Hz eingefügt, sodass die induzierte Spannung insgesamt von einem **Tiefpass** erster Ordnung mit 9 kHz Grenzfrequenz gefiltert wurde.

Rechnung und Messung zeigen, dass beim dispersionsfreien Saitenmodell eine zur Zeitachse symmetrische Tonabnehmerspannung entsteht – selbst wenn man eine nichtlineare Magnetkennlinie zugrunde legt. Auf den dünnen Saiten der Gitarre spielen Dispersionseffekte keine große Rolle, deshalb stimmen Rechnung und Messung gut überein. Bei der E₂-Saite führt die Frequenzabhängigkeit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (**Dispersion**) aber schon nach einer Periode zu Verformungen (**Abb. 5.5.13**), die Halbwellen werden unsymmetrisch, und damit besteht die Möglichkeit, dass sich beim Umpolen des Tonabnehmers der Klang ändert. Nicht in jedem Fall führen aber Änderungen der Zeitfunktion automatisch zu hörbaren Klangänderungen. Das Gehör ist kein Oszilloskop – das Schallsignal wird vielmehr in Frequenzbänder (**Frequenzgruppen**) zerlegt, und erst die Ausgangssignale dieser Analysebandfilter werden bezüglich ihrer Zeitabhängigkeit analysiert. Phasenverschiebungen zwischen den Signalen unterschiedlicher Frequenzgruppen erzeugen u.U. gar keine Klangänderung, Phasenverschiebungen innerhalb einer Frequenzgruppe können hingegen zu hörbaren Rauigkeits- und/oder Tonhöhenänderungen führen [Fleischer 1978].

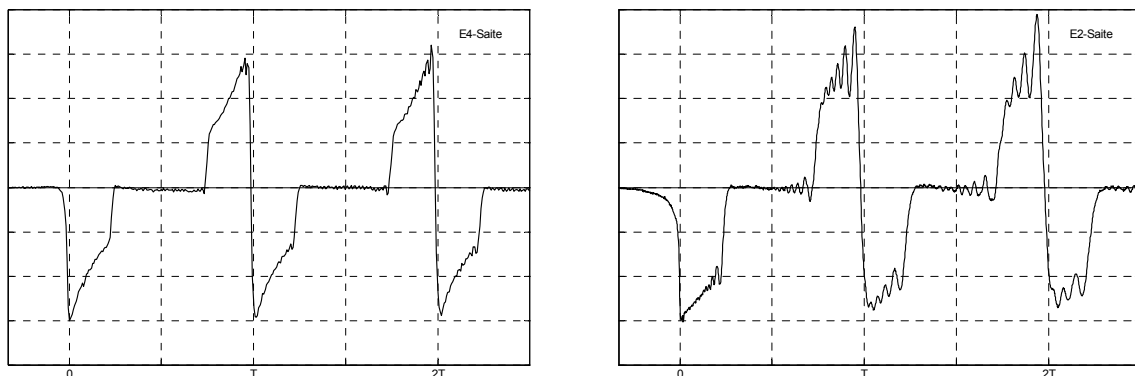
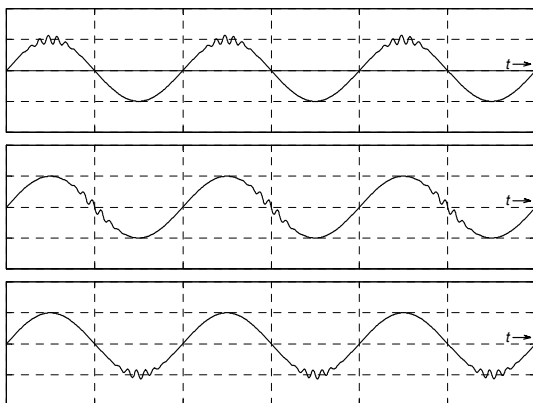


Abb. 5.5.13: Gemessene Tonabnehmer-Spannungen (Stratocaster), normiert. Bei der E₂-Saite fallen vor allem die dispersionsbedingten Oszillationen auf (vergl. Kap. 1.4). Die E₄-Saite ist aber auch nicht ganz dispersionsfrei: Nach ca. 7 Perioden sind hier ebenfalls deutliche dispersionsbedingte Unsymmetrien sichtbar (nicht abgebildet).



Die in Abb. 5.5.13 dargestellte Überlagerung einer tief- und einer hochfrequenten Schwingung erinnert an die von Zwicker durchgeführten Messungen zum Mithörschwellenperiodenmuster [12]. Hierbei hängt die Hörbarkeit eines Ton-Bursts von seiner Phasenlage ab (**Abb. 5.5.14**). Trotz gleichen Betragsspektrums klingen die drei im Bild dargestellten Signale unterschiedlich – die Maskierwirkung der tieffrequenten Komponente ist phasenabhängig.

Abb. 5.5.14: Zum Mithörschwellen-Periodenmuster [12].

Doch ehe man die Aussage der Mithörschwellen-Periodenmuster auf Gitarrensignale anwendet, sollte man berücksichtigen, dass die in Abb. 5.5.12 und 5.13 dargestellten Zeitfunktionen aus der **Saitenschnelle** abgeleitet wurden; in dieser Form erreicht das Signal aber nicht das Trommelfell. Schon die (in Abb. 5.5.13 unterdrückte) Tonabnehmer-Resonanz führt zu ersten Signalveränderungen, Gitarrenverstärker und Lautsprecher tun ein Übriges, und dann muss der Schall ja auch noch durch den Wiedergabe-Raum, bis er das Ohr des Zuhörers erreicht. In **Abb. 5.5.15** sind Tonabnehmerspannungen dargestellt, wie sie an einer mit $513\text{pF} // 1\text{M}\Omega$ belasteten Stratocaster auftreten. Bezüglich der Zeitachse können Unsymmetrien auftreten, die für das Auge erheblich erscheinen – aber das Auge beurteilt nicht den Klang. Das Gehör tut sich trotz der sichtbaren Unsymmetrien schwer, Klangunterschiede zu erkennen. Noch deutlicher zeigt dies **Abb. 5.5.16**: Die beiden Impulse klingen gleich!

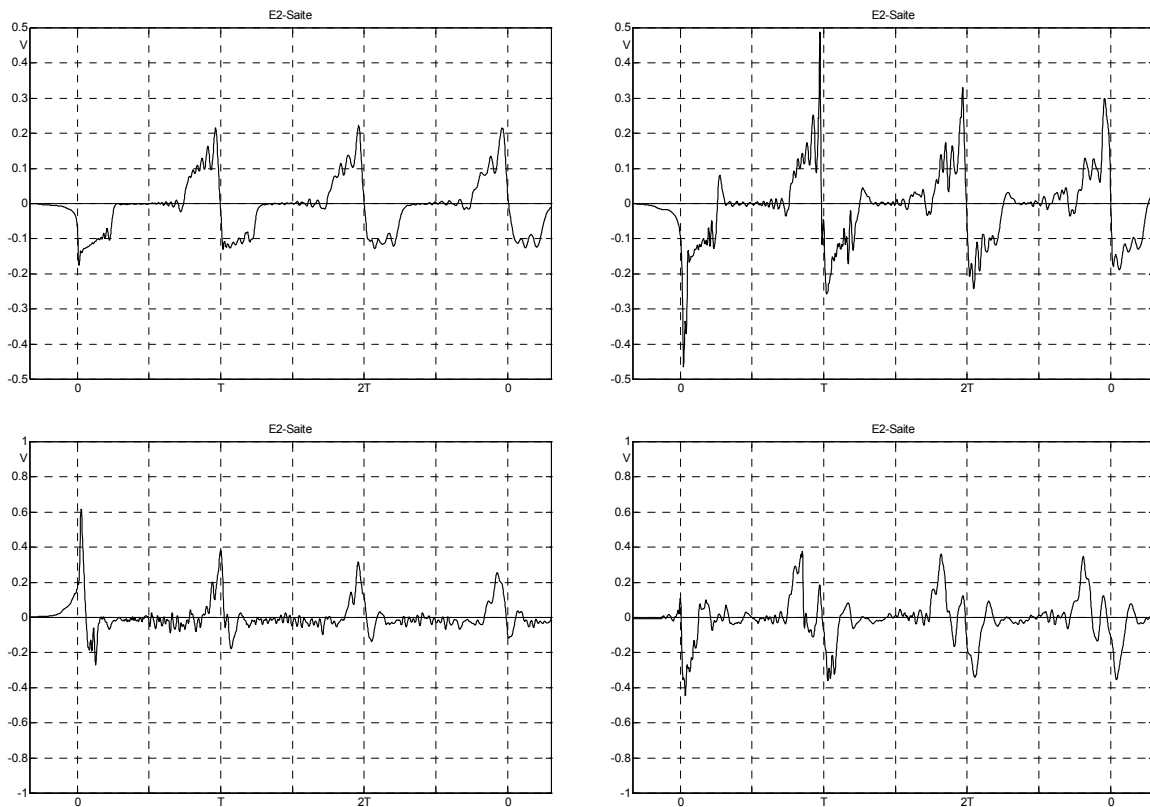


Abb. 5.5.15: Tonabnehmerspannung, USA-Stratocaster, Hals-Tonabnehmer. E₂-Saite mit dem Plektrum über dem Hals-Tonabnehmer heruntergedrückt und losgelassen (oben), "virtuos" angezupft (unten). Die linke bzw. rechte Bildspalte zeigen je zwei unterschiedliche Versuche.

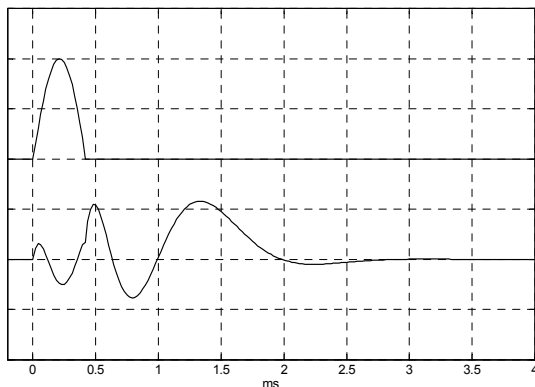


Abb. 5.5.16: Zwei Impulse, die durch Allpassfilterung aufeinander abgebildet werden können. Da die Gruppenlaufzeitverzerrungen unter der für das Gehör relevanten Schwelle von 2 ms bleiben, wird diese Filterung vom Gehör nicht bemerkt.

Die in Verstärkern auftretenden Nichtlinearitäten begrenzen zwar, wie in Abb. 5.5.11 gezeigt, polaritätsabhängig das Gitarrensinal, die Hauptunterschiede treten in den meisten Fällen aber bei kurzen Impulsspitzen auf, deren Begrenzung wenig am Gesamtklang ändert. Gravierende Veränderungen erfährt das Signal erst, sobald es der Lautsprecher abstrahlt: In **Abb. 5.5.17** sind Spannungsverläufe zweier **Raummikrofone** dargestellt, deren Position sich um 50 cm unterscheidet. Trotz deutlich abweichender Zeitfunktionen sind selbst diese Unterschiede mit dem Gehör nur als pauschale Höhenänderung wahrnehmbar, der keine besondere Bedeutung beikommt.

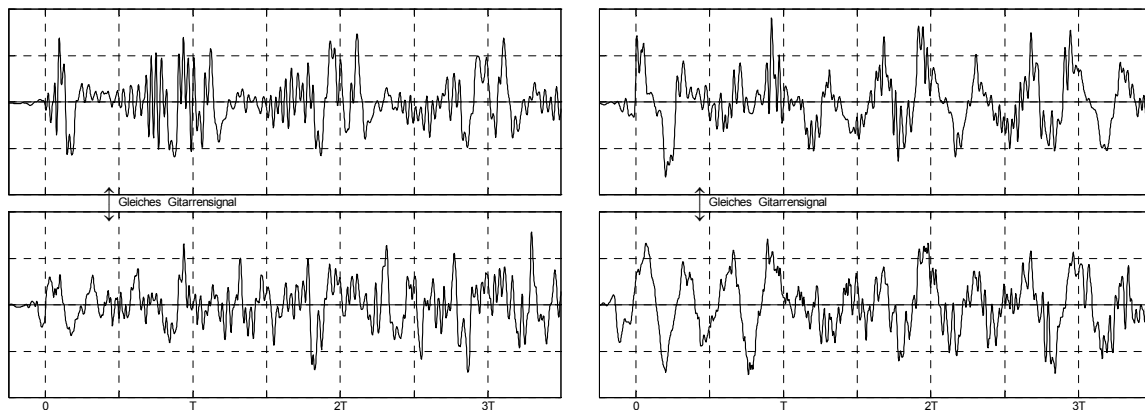


Abb. 5.5.17: Mikrofonspannungen. Mikrofon 0,5m vor dem Verstärker (oben), Mikrofon 1m schräg vor dem Verstärker (unten). Fender-Stratocaster, Fender-Deluxe-Verstärker. Die linke bzw. rechte Bildspalte zeigen zwei unterschiedliche Versuche.

Als **Zwischenergebnis** ist festzustellen: Das Umpolen eines Tonabnehmers führt zu deutlich *sichtbaren* Unterschieden in der Spannungs-Zeitfunktion. Das Gehör bemerkt diese Unterschiede aber entweder gar nicht, oder nur leicht überschwellig. Keinesfalls sind mit dem Umpolen Qualitätsunterschiede im Sinne *deutlich besser* bzw. *deutlich schlechter* zu erreichen. Es kann folglich auch keine Empfehlung ausgesprochen werden, welche Polarität zu bevorzugen ist. Zwei Betriebszustände bedürfen aber ergänzender Betrachtung: Die Zusammenschaltung mehrerer Tonabnehmer, und die Luftschall-Rückkopplung.

Wird die Gitarre über Verstärker/Lautsprecher laut gespielt, trifft eine Luftschallwelle auf den Gitarrenkorpus auf und erregt ihn und die Saiten zu Schwingungen; sie werden Teil eines **Rückkopplungskreises**. Bei genügend großer Kreisverstärkung [Literatur: Regelungstechnik] beginnt die Gitarre "von selbst" zu spielen. Die Tonhöhe dieser Eigenschwingungen hängt von der Polarität der Kreisverstärkung ab: Polt man den Tonabnehmer um, ändert sich der Klang. Dies geschieht aber auch, wenn man die Position der Gitarre um 10 cm ändert, insofern ist auch unter Beachtung der Rückkopplung die Tonabnehmer-Polarität unwichtig.

Dass sich beim **Zusammenschalten** zweier Tonabnehmer der Klang *erheblich* ändert, wenn einer der beiden umgepolt wird, bedarf keiner großen Erläuterung. Interessanter ist die Frage, ob sich Klangunterschiede ergeben, wenn (z.B. beim mittleren Stratocaster-Tonabnehmer) Wicklungssinn und Magnetpolarität umgedreht werden, um beim Zusammenschalten Brummunterdrückung zu erreichen (RW/RP Middle-Pickup). Eine Auswirkung wäre zu erwarten, wenn beide Tonabnehmer in wesentlichem Umfang magnetisch gekoppelt wären. Messungen ergaben aber nur 0,6% Kopplungsfaktor, viel zu wenig, um hörbar zu werden: Die gemessenen Pegelunterschiede von 0,05 dB liegen weit unter der Hörbarkeitsschwelle. Und für die magnetischen Anziehungskräfte gilt: Sie sind polaritätsunabhängig!