

5.7 Brumm-Empfindlichkeit

Magnettonabnehmer erzeugen aus einem magnetischen Wechselfeld eine elektrische Wechselspannung. Sofern das Wechselfeld von der Saitenschwingung herrührt, ist diese Spannung das gewünschte Nutzsignal. Alle Wechselfelder, die nicht von der Saitenschwingung erzeugt werden, produzieren hingegen ein unerwünschtes **Störsignal**. Im Umfeld einer Elektrogitarre sind die häufigsten Störquellen 50-Hz-Felder, deren Ursache das 230-V-Netz ist. Ein in einen Gitarren-Tonabnehmer eingekoppeltes 50-Hz-Feld tönt aus dem Lautsprecher als tieffrequenter Stör-Ton (49 Hz \rightarrow G₁), der als *Brummen* oder *Brumm* bezeichnet wird. Brummstörungen sind nur selten monofrequent – zumeist handelt es sich um einen komplexen Ton, dessen Harmonische ganzzahlig vielfach zur Grundfrequenz liegen (50, 100, 150, 200 ... Hz). Ausfiltern der Grundschwingung bringt deshalb kaum Verbesserungen.

Die Grundlage für quantitative Störwirkungen liefert das magnetische **Durchflutungsgesetz**: Um einen langen, geraden Leiter entsteht ein zylindersymmetrisches Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte $B = \mu_0 I / (2\pi r)$. Hierbei ist I die Stromstärke, r ist der radiale Abstand, und μ_0 ist die Luftpermeabilität $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am. Eine 10-A-Leitung erzeugt demnach in 2 m Abstand eine Flussdichte von 1 μ T. Scheinbar nicht viel – doch in einer 10-cm²-Spule mit 10000 Windungen entsteht ein Fluss von immerhin 10 μ Vs, und bei 50 Hz eine Spannung von 3 mV. Für 100 mV Nutzsignal sind das gerade einmal 30 dB Brummabstand. Diese Abschätzung ist aber nicht sehr praxisrelevant: Nicht so sehr, weil die Tonabnehmermagnete feldverstärkend wirken (ca. +2 dB), sondern weil Starkstrom in einer *Zweidrahtleitung* fließt. Hin- und Rückfluss erzeugen aber zwei gegenphasige Felder, die sich in ihrer Wirkung abschwächen. Für die o.a. Situation ergibt dies eine Verbesserung des Störabstandes um ca. 50 dB auf ca. 80 dB. Das scheint nun wieder ausreichend zu sein – ein Tonbandgerät wäre mit einer derartigen Dynamik mehr als zufrieden. Gitarristen sind aber keine Tonbandgeräte. Sie übersteuern ihre Gitarrenverstärker je nach Stilrichtung um 10 – 30 dB. Hierdurch reduziert sich im o.a. Beispiel der Brummabstand von 80 dB auf bis zu 50 dB, und für durchschnittliche Musikpegel von 100 dB_{SPL} (leiser Hardrock) verbleibt ein deutlich hörbares Brummen bei 50 dB_{SPL}. Ein reiner 50-Hz-Ton läge mit einem derartigen Schalldruckpegel zwar noch unterhalb der Ruhehörschwelle, die so gut wie immer vorhandenen Obertöne machen sich aber häufig störend bemerkbar. Noch wesentlich stärker können Netztransformatoren, CRT-Bildschirme, Leuchtstofflampen, Schaltnetzteile oder Elektromotoren stören.

In **Abb. 5.7.1** sind Zeitfunktion und Spektrum von zwei typischen Brummsignalen dargestellt: Das Störfeld eines Computer-Monitors (CRT) verursacht eine impulsartige Störspannung, das Streufeld des Netztransformators einer Leistungsendstufe erzeugt eine verzerrte Sinusschwingung. Der sägezahnförmige Feldverlauf der Strahlableitung des CRT-Monitors ergibt differenziert die nadelförmigen Spitzen des oberen Signals in Abb. 5.7.1, das Maximalwerte um 12 mV erreicht. Aufgenommen wurde das Störsignal mit einem Stratocaster-Tonabnehmer in einem halben Meter Abstand vor dem Monitor. Das Störsignal enthält zwar nicht besonders viel Leistung, kann wegen seiner hohen Spitzenwerte aber bereits zu Übersteuerungen im Verstärker führen. Das Spektrum fällt zu hohen Frequenzen hin nur schwach ab, das vom Gitarrenverstärker erzeugte Brummsignal ist ein "harter", schnarrender Ton. Im Streufluss der Leistungsendstufe sind hauptsächlich die 1., 3. und 5. Harmonische enthalten (Sättigung des Trafo-Kerns, Hysterese), der Spitzenwert der Zeitfunktion beträgt ca. 0,9 mV; der Klang des Brummtones ähnelt dem eines Elektrobasses.

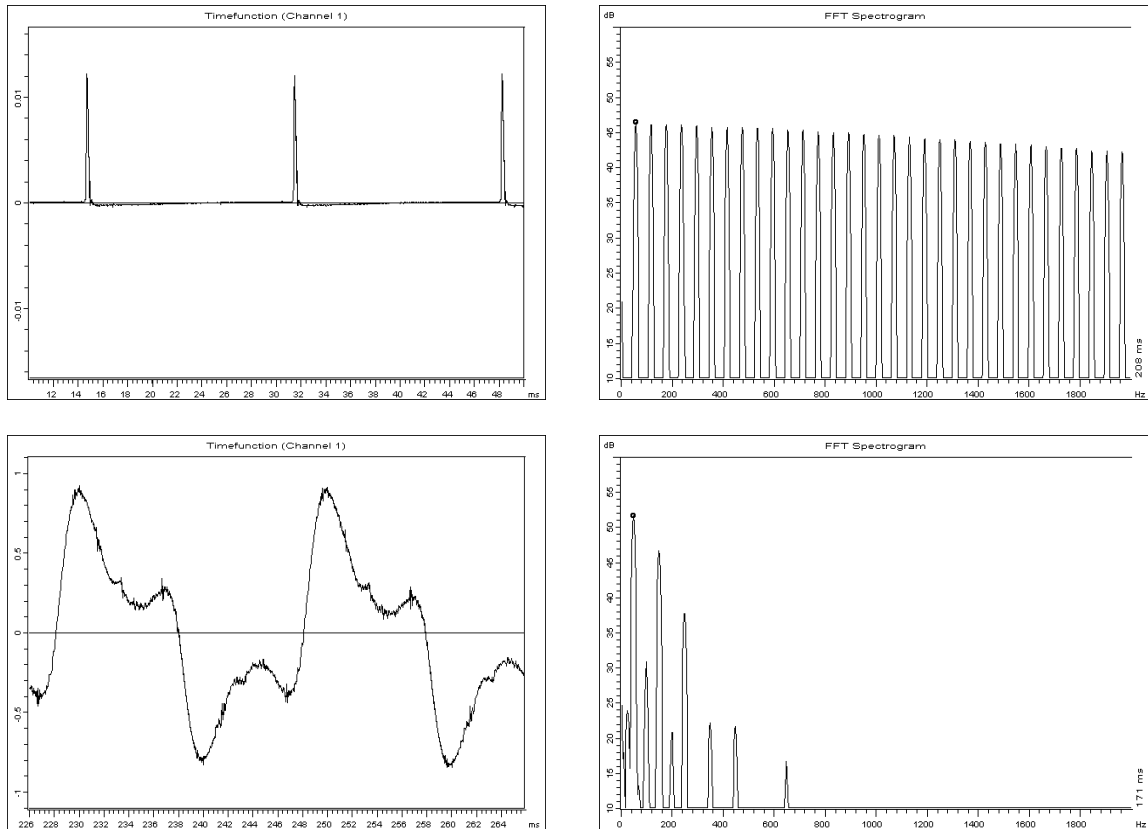


Abb. 5.7.1: Zeitfunktion (links) und Spektrum (rechts) von Brummsignalen. Die erste Zeile zeigt ein CRT-Monitor-Störsignal, die zweite ein Transformator-Störsignal. Die Zeitfunktion des Monitorsignals ist in Volt skaliert, die Maximalwerte liegen bei 12 mV. Die Zeitfunktion des Transformator-Störsignals ist in mV skaliert, die Maxima liegen bei 0,9 mV. Beide Pegelspektren sind in $\text{dB}\mu$ skaliert, also relativ zu $1 \mu\text{V}$.

Um quantitative Daten über die Brummempfindlichkeit üblicher Gitarren-Tonabnehmer zu erhalten, wurden **Messungen** in einem künstlichen Störfeld durchgeführt, das von einem **Helmholtz-Spulenpaar** erzeugt wurde ($B_{\text{eff}} = 6,5 \mu\text{T}$). Bei den Singlecoil-Tonabnehmern war die Spulenachse parallel zur Feldrichtung ausgerichtet, die Humbucker-Tonabnehmer waren drehbar gelagert. Die bei 500 Hz gemessenen Störspannungen betragen bei Singlecoil-Tonabnehmern ca. 0,1 – 0,2 V; für Humbucker ergaben sich Maximalwerte um 30 mV. Für sich betrachtet sind diese Daten aber nicht aussagekräftig; erst zusammen mit dem Tonabnehmer-Übertragungskoeffizient kann ein **Brummabstand** (Nutzpegel – Störpegel) angegeben werden. Ein Tonabnehmer, dessen Spule mit 10000 Windungen bewickelt ist, wird natürlich das Störfeld stärker (lauter) wiedergeben als einer mit nur 5000 Windungen. Er wird aber auch ein lauterer Nutzsignal erzeugen, und deshalb ist nur das individuelle Verhältnis von Nutzspannung : Störspannung, bzw. die Differenz von Nutzpegel – Störpegel, eine sinnvolle Maßzahl.

Bei den meisten Humbucker-Messungen fiel auf, dass im Gegensatz zu euphorischen Werbeversprechen die Brummunterdrückung ziemlich mäßig ist. Seth Lovers "*the 2 coil pickup eliminates the hum*" ist nicht wörtlich zu nehmen. Das sofort einleuchtende Prinzip der Störfeld-Kompensation durch zwei gegensinnig gewickelte Spulen setzt nämlich punktsymmetrischen Aufbau voraus – und der ist beim typischen Humbucker nicht gegeben: Der unter den Spulen liegende Balkenmagnet verbiegt das Magnetfeld, und verschlechtert damit die Brumm-Unterdrückung ganz wesentlich.

In **Abb. 5.7.2** sind Richtdiagramme dargestellt, die an einem Gibson-490R-Tonabnehmer im parallelen Magnetfeld ermittelt wurden. Würde man nur eine Spule (ohne Ferromagnetika) im Magnetfeld drehen, so ergäbe sich eine kosinusförmige Richtcharakteristik (Feldrichtung, Drehachse und Spulenachse senkrecht aufeinander). Durch die u-förmig angeordneten Ferromagnetika verbiegt sich aber der Feldverlauf, sodass die beiden Spulen nach innen "schielen"; das Maximum der Empfindlichkeit ist gegenüber der Spulenachse um 9° nach innen gerichtet. Bei Störfeldern, die parallel zur Spulenachse durch den Tonabnehmer gehen, lässt sich auch mit dieser Konstruktion eine gute Kompensation erreichen. Verläuft die Feldrichtung jedoch rechtwinklig zur Spulenachse, ist die Kompensationswirkung nur noch mäßig ausgeprägt.

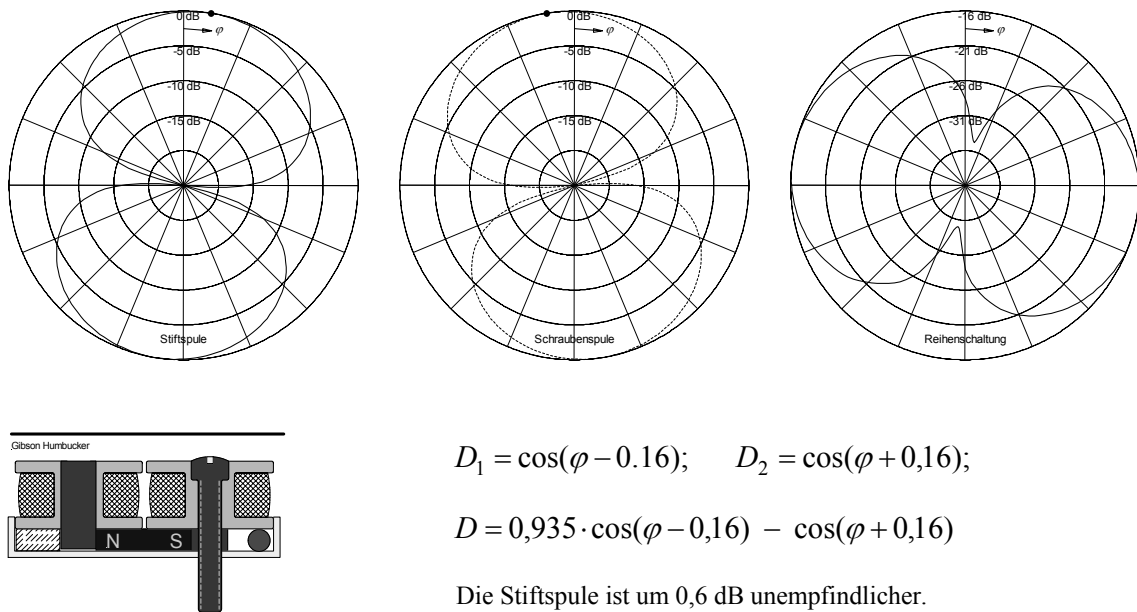


Abb. 5.7.2: Normierte Richtungsmaße D der Humbucker-Spulen: 1 = Stiftspule, 2 = Schraubenspule. Der Tonabnehmer (Gibson 490R) wurde in einem parallelen Wechselfeld mit 500 Hz angeregt, die beiden Spulen wurden einzeln (nicht verbunden) gemessen. Das rechte Richtdiagramm zeigt das Richtungsmaß bei Reihenschaltung der beiden Spulen. φ = Verdrehung des Tonabnehmers gegen das Magnetfeld.

Dass in **Abb. 5.7.2** das Minimum bei Reihenschaltung nicht für $\varphi = 0^\circ$ (axiale Feldrichtung) auftritt, bewirkt jedoch nicht der Magnet, sondern die Ungleichheit der beiden Spulen, die teils durch Wicklungsunterschiede, teils durch Kernunterschiede hervorgerufen wird. Nun ist es für die Praxis aber ziemlich unerheblich, für welche Störfeldrichtung der Tonabnehmer am unempfindlichsten ist, denn Störfelder können grundsätzlich aus jeder Richtung auf die Gitarre einwirken. Die "Performance" wird nicht besser, wenn der Gitarrist die Gitarre zur Brumm-Minimierung waagrecht halten muss*. Darum wird man sich mit **Worst-Case**-Betrachtungen auf die Störfeldrichtung konzentrieren, die das stärkste Brummen produziert. Bei Singlecoil-Tonabnehmern stören Magnetfelder am stärksten, deren Feldrichtung parallel zur Spulenachse verläuft, bei Gibson-artigen Humbuckern ist die Störfeldwirkung bei saitenparallelen (= achsennormalen) Feldern am stärksten. Beim Koaxial-Humbucker (Kap. 5.3) entscheidet die Spulensymmetrie über die Richtung maximaler Störfeldempfindlichkeit; typischerweise brummen diese Tonabnehmer bei achsenparallelen Feldern am stärksten.

* Das mag auch noch vom Gitarrist abhängen...

Abb. 5.7.3 zeigt schematische Feldverteilungen beim Humbucker: Verläuft die Feldrichtung parallel zur Spulenachse, werden beide Spulen in gleicher Richtung durchströmt; steht die Feldrichtung orthogonal zur Spulenachse, sind die Spulen-Magnetflüsse einander entgegengesetzt. Dies zeigt, dass eine richtungsunabhängige Kompensation **prinzipiell nicht möglich ist**. Im Fall des Gibson 490-R verringert für achsennormalen Feldverlauf (Worst-Case) die gegenphasige Reihenschaltung das Störsignal gerade mal auf ein Drittel, bezogen auf die mit achsenparallelem Feld in *einer* Spule erzeugte Spannung. Da beide Spulen in Reihe geschaltet sind, und sich die Nutzsignale (wegen gegenpoliger Permanentfelder) addieren, könnte man noch 6 dB addieren und als **Worst-Case-Brummkompensation 16 dB** spezifizieren. Wobei aber nicht vergessen werden darf, dass sich nicht alle Nutzsignale verdoppeln: Viele Teiltöne der Saitenschwingung werden wegen der Zweipunkt-Abtastung sogar ganz ausgelöscht.

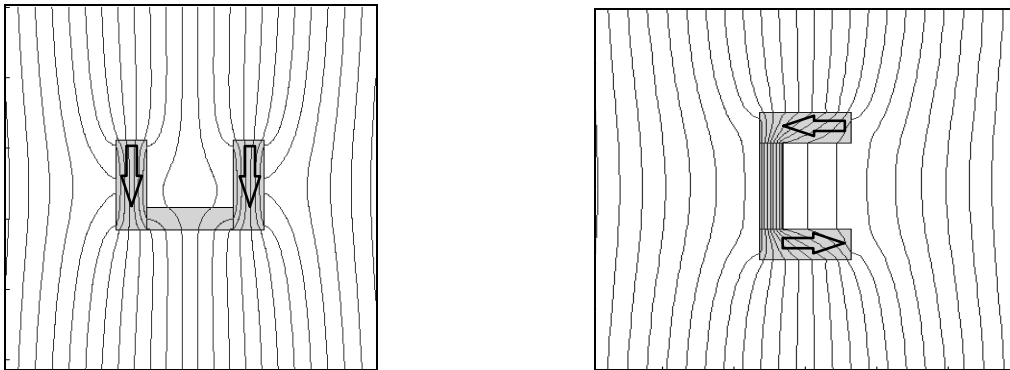


Abb. 5.7.3: Magnetfeldverlauf durch einen Gibson-ähnlichen Humbucker. Verläuft das Magnetfeld parallel zur Spulenachse (links), werden gleichphasige Spannungen induziert. Bei einem achsennormalen Störfeld (rechts) kommt es aber (wie bei Saitenschwingungen) zu gegenphasigen Störspannungen.

Die Richtungsabhängigkeit der Störfeldunterdrückung konnte in Abb. 5.7.2 mit einfachen Formeln beschrieben werden, für die **Frequenzabhängigkeit** zeigen sich kompliziertere Zusammenhänge. Dies liegt zum einen am Skineneffekt, zum andern an kapazitiven Kopplungen, die zwischen den beiden Spulen bei höheren Frequenzen auftreten. **Abb. 5.7.4** zeigt Übertragungs-Frequenzgänge bei Anregung im parallelen Helmholtzfeld. Gegenüber dem Einzelspulenbetrieb verbessert beim Gibson 490-R der Doppelspulenbetrieb die Störimpfindlichkeit nur um 10 dB (bzw. 16 dB gegenüber der im Doppelspulenbetrieb auftretenden Signalverdoppelung). Bei Fenders Koaxial-Tonabnehmer beträgt der Gewinn immerhin **24 dB**.

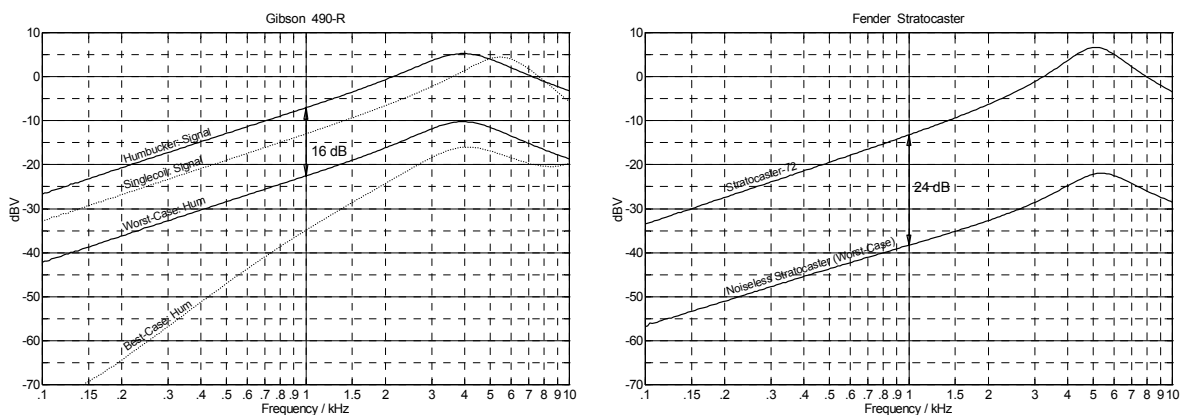


Abb. 5.7.4: Übertragungsmaße im parallelen Helmholtzfeld ($6,5 \mu T_{\text{eff}}$). Die Tonabnehmer waren jeweils mit $200k\Omega // 330pF$ belastet. Im rechten Bild wurde zum Vergleich ein Stratocaster-Singlecoil-Tonabnehmer mit vergleichbarer Empfindlichkeit eingezeichnet.

Die in Abb. 5.7.4 dargestellten Feld-Übertragungsmaße sind noch nicht direkt auf den realen Betrieb anwendbar: Für die Störfelderzeugung sind Helmholtzspulen ein guter Standard, für die Nutzsignalerzeugung eher nicht, denn die von der Saitenbewegung verursachten Luftspaltänderungen wirken lokal sehr begrenzt. Für eine vergleichbare Bewertung wurde deshalb folgendes **Messverfahren** angewandt: Bei jedem Tonabnehmer wurde im parallelen Helmholtzfeld bei 520 Hz und einer effektiven Flussdichte von $6,5 \mu\text{T}$ der erzeugte Störspannungspegel gemessen (Worst-Case). Zur Ermittlung der Nutzsignal-Empfindlichkeit wurde am Shaker-Prüfstand eine 0,66-mm-Saite bei 84 Hz mit 0,4 mm Amplitude in axialer Richtung vor den Magneten bewegt. Der hieraus ermittelte Störabstand (Nutzpegel – Brummpegel) wurde willkürlich um 11,5 dB vergrößert, so dass sich für den als Referenz gewählten Stratocaster-Tonabnehmer gerade ein **normierter Brummabstand von 0 dB** ergibt. Tonabnehmer mit positivem Brummabstand sind nach dieser Definition brummärmer als der Referenz-Tonabnehmer. Die besten Ergebnisse erreichen der Joe Barden Strat-Pickup und der Gretsch FilterTron, bedingt durch ihren symmetrischen Aufbau.

Die folgende **Tabelle** listet Messdaten auf, die nach dem o.a. Verfahren gewonnen wurden. Die zweistellige Angabe der Singlecoil-Brummabstände bedeutet nicht, dass bei allen Messungen tatsächlich 0,1 dB Messgenauigkeit erreicht wurden. Eine derart hohe Genauigkeit ist aber auch nicht erforderlich, selbst Unterschiede von z.B. 1dB werden in der Praxis in aller Regel noch nicht gehört. Hingegen bemerkt man die geringe Brummempfindlichkeit des Gretsch **HiLo-Tron**. Bei diesem Tonabnehmer wird deutlich, dass ein Pegel allein wenig Aussagekraft besitzt: Der Brummpegel des SDS1 ist sogar noch um 2 dB größer – allerdings gibt der SDS1 wesentlich mehr Nutzsignal ab. Andererseits: Der DP172 ist sogar noch etwas unempfindlicher als der HiLo-Tron – sein Brummpegel ist aber um fast 8 dB geringer. Nicht vergessen werden darf jedoch, dass neben diesen Tonabnehmer-Parametern noch weitere Größen eine Rolle spielen: Der HiLo-Tron ist für seinen brillanten Klang bekannt, er wird von den meisten Gitarristen vermutlich mit einer eher "cleanen", d.h. wenig verzerrenden Verstärkereinstellung betrieben. Ganz anders der SDS1: Sein großer Übertragungskoeffizient und seine Mittenbetonung prädestinieren ihn für "Brat-Sounds", d.h. für verzerrende Wiedergabe. Verzerrung bedeutet aber hohe Verstärkung, und damit relativ lautes Brummen.

Tonabnehmer	§)	Brummpegel /dBV	Nutzpegel / dBV	Brummabstand / dB
"Telecaster"-Fake (Neck)				
Fender Jazzmaster-62 (Bridge)				
Fender Jazzmaster-62 (Neck)				
Duncan APTR-1 (Telecaster-Type, Neck)				
Fender Telecaster-52 (Neck)				
Duncan SSL-1 (Strat-Type)				
Schaller				
Fender Stratocaster (Balkenmagnet)				
Fender Stratocaster-72 (G-Magnet)				
DiMarzio DP172 (Telecaster-Type Neck)				
Fender Telecaster-73 (Bridge, D-Magnet)				
Rockinger P-90				
Fender Telecaster-70 (Bridge), ohne Platte				
Rockinger Strat-Type (Balkenmagnet)				
Rickenbacker (Toaster-Pickup)				
DiMarzio SDS-1				
Fender Texas-Tele (Bridge, D-Magnet)				
Fender Telecaster-70 (Bridge)				
Fender Stratocaster (USA Standard)				
Ibanez Blazer				
Gibson P-90				
"Telecaster"-Fake (Bridge)				
Fender Telecaster-52 (Bridge)				
Duncan APTL-1 (Telecaster-Type, Bridge)				
Gretsch HiLoTron				
Fender Jaguar (Neck)				
Lace-Sensor gold				
Squier Humbucker				
Gibson 490R				
Gibson Burstbucker #2				
Gibson ES 335 (Neck, 1968)				
Gibson 57 classic				
Fender Noiseless Stratocaster (Neck)				
DiMarzio DP184				
Gibson Tony Iommi				
Gretsch FilterTron				
Joe Barden (Strat-Type, Bridge)				

Tabelle: Brummabstand. Störfeld: Paralleles monofrequentes Magnetfeld, $f = 520$ Hz, $B_{\text{eff}} = 6,5 \mu\text{T}$.
 Saitenschwingung: $f = 84$ Hz, 0,4 mm Amplitude, Distanz Saite/Magnet = 2mm, D'Addario PL-026.
 Der Tonabnehmer war für die Messung mit 50 k Ω belastet.

§) Die Zahlenwerte bleiben der Druckversion vorbehalten

Die Brummpegel des **Jazzmaster-** und Stratocaster-Tonabnehmers unterscheiden sich um 7 bzw. 8 dB. Dieser Unterschied passt gut zum Flächenverhältnis (ca. 2:1) und zum vermuteten Windungsverhältnis (ca. 1:0,9). Die stärkere Brummaufnahme des großflächigen Jazzmaster-Tonabnehmers würde kompensiert, wenn der abgegebene Nutzspannungspegel ebenfalls um 7 – 8 dB größer wäre. Gegenüber dem Stratocaster-Tonabnehmer beträgt der Gewinn aber nur ca. 5 dB, d.h. der Jazzmaster-Tonabnehmer "brummt mehr". Die knapp 3 dB Differenz im Brummabstand sind aber nicht dramatisch, und hängen außerdem vom Brummspektrum ab: Die Jazzmaster hat in typischer Beschaltung eine stärkere Resonanzüberhöhung als die Stratocaster; ist das Brummsignal breitbandig (Leuchtstofflampe, Phasenanschnittsteuerung), hebt die Jazzmasterresonanz Nutz- und Störsignal gleichermaßen an. Ist das Brummsignal aber tiefenbetont (Glühlampenstrom, großzügig dimensionierter Netztrafo), so gewinnt die Jazzmaster durch verstärktes Nutzsignal. Solange die Unterschiede des bei 84 Hz / 520 Hz gemessenen Brummabstandes nur wenige dB betragen, ist in der Praxis kein großer Effekt zu bemerken.

Anders bei den **Humbuckern**: Ihre Brummabstände zeigen (gegenüber SC) einen deutlichen Gewinn von 19 bis über 40 dB. Dies setzt aber parallele Magnetlinien voraus, wie sie weit entfernte Störquellen oder Helmholtz-Spulen erzeugen. Wird ein Humbucker nahe an einem Netztrafo betrieben, so ist dessen Feld sehr stark und gekrümmt – und stört u.U. trotz Brummunterdrückung. Des weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Spulen eines Humbuckers nicht immer gleiche Empfindlichkeit aufweisen müssen: Wenn Windungszahlen und/oder Kernmaterialien unterschiedlich sind, kann u.U. die Kompensation unvollständig sein.

Viele Singlecoil-Gitarren, die mehr als einen Tonabnehmer haben, ermöglichen **Brummkompensation** durch unterschiedlichen Wicklungssinn und gegenphasige Magnetpolarität. Beim Zusammenschalten zweier Tonabnehmer kann dann ein Humbucking-Effekt erreicht werden. Gelegentlich wird auch eine **Kompensationsspule** in die Gitarre eingebaut. Sie enthält keinen Magnet und reagiert nur auf das Störfeld. Wird sie in Reihe zur Tonabnehmerspule geschaltet, verringert sich bei richtiger Dimensionierung das Störsignal. Da der Nutzstrom aber nun durch eine vergrößerte Induktivität fließen muss, verringert sich auch die Resonanzfrequenz, was Klangänderungen zur Folge haben kann. Schaltet man diese Spule parallel, wie das mit nur mäßigem Erfolg z.B. beim P100 versucht wurde, erhöht sich die Resonanzfrequenz.

Abschließend sei noch erwähnt, dass **magnetische Abschirmung** zwar möglich, aber nur wenig effizient und unpraktisch ist. Kapselung des gesamten Tonabnehmers wäre unsinnig, er würde dann nicht mehr die Saitenschwingung abnehmen können. Abschirmhauben um Tonabnehmer *und* Saite hat es gegeben (Fender-Bass, Telecaster); zumeist verstehen die Musiker diese Hindernisse aber als eine Art Transportsicherung und schrauben sie ab. Aka: Aschenbecher. Die Abschirmung **elektrischer Felder**, die kapazitiv von spannungsführenden Leitungen eingekoppelt werden, ist hingegen möglich und sinnvoll. Gute Dienste leisten hier Abschirmfolien und Leitlack. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass in jeder leitenden Fläche vom Magnetfeld ein **Wirbelstrom** induziert wird, wodurch die Tonabnehmerresonanz bedämpft werden kann. Aus diesem Grund bestehen gute Abschirmhauben aus Neusilber und sind u.U. zusätzlich geschlitzt (→ Kap. 5.9).