

### 3. Saitenmagnetik

Damit die schwingende Saite den magnetischen Widerstand im Magnetkreis verändern kann, muss sie aus ferromagnetischem Material bestehen. Ferromagnetika gibt es in großer Vielfalt; sollen sie als Basismaterial für Gitarrensaiten geeignet sein, müssen sie vor allem eines können: Der extrem hohen Zugspannung standhalten. Wohl jeder Gitarrist hat beim Spielen schon einmal eine Saite abgerissen, was deutlich zeigt: Man arbeitet hart am Limit! Typische Saitenspannkraft liegt im Bereich zwischen 50 – 140 N; bezogen auf die doch sehr kleinen Querschnittsflächen erhält man damit **Zugspannungen** bis zu 2000 N/mm<sup>2</sup>. Aufgrund dieser hohen Belastung eignet sich nur hochfester, ferromagnetischer **Spezialstahl** als Saitenmaterial. Zum Schutz gegen Korrosion ist die Saitenoberfläche mit einer dünnen Nickel- oder Goldschicht überzogen, die sich wegen ihrer geringen Dicke aber magnetisch nicht auswirkt. Anders verhalten sich umspinnene Saiten: Der Kerndurchmesser beträgt etwa 30 – 60% des Außendurchmessers, die **Umspinnung** hat folglich einen wesentlichen Anteil an der (quadratisch anwachsenden) Querschnittsfläche. Man merkt das sofort, wenn man die für Akustikgitarren gedachten bronzespinnenen Stahlkern-Saiten mit einem Magnettonabnehmer abnehmen möchte: Im Vergleich zu den massiven Diskantsaiten sind die umspinnenen Basssaiten zu leise, denn Bronze ist unmagnetisch. Deshalb werden die drei Basssaiten der Elektrogitarre (E-A-D) mit einem magnetisch leitenden Material umspinnen: Zumeist Nickel, vernickelter Stahl, oder spezieller rostfreier Stahl. In den folgenden Abschnitten werden die magnetischen Eigenschaften typischer Stahlsaiten besprochen, im 4. Kapitel folgt dann eine detaillierte Beschreibung elektromagnetischer Felder.

#### 3.1 Stahl, Nickel, Bronze

Die hohe Saiten-Zugfestigkeit erfordert eine glatte Oberfläche, denn Risse und Poren würden die Bruchgefahr erhöhen. Zum Schutz gegen Korrosion kann die Saitenoberfläche beschichtet sein (TINNED MANDOLIN WIRE), es gibt aber auch unbeschichtete Saiten. Die englische Bezeichnung "tinned" bedeutet aber nicht zwangsläufig, dass die Oberfläche *verzinkt* ist; die Beschichtung üblicher Gitarrensaiten besteht aus Nickel (NICKEL PLATED STEEL). Die beiden Diskant-Saiten (E<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>) sind immer massiv (PLAIN), die drei Bass-Saiten (E<sub>2</sub>, A<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>) sind immer umspinnen (WOUND); die G-Saite ist bei dünnen Sätzen massiv, bei dicken Sätzen umspinnen. Die Umspinnung nimmt keine Zugkräfte auf, sie soll lediglich die Masse erhöhen. Deshalb können hier – neben Stahl – auch weniger belastbare Materialien verwendet werden.

Ohne Zweifel beeinflusst das Saitenmaterial den **Klang** der Gitarre. Die Begründung für diese Aussage ist aber gar nicht so offensichtlich. Es ist naheliegend, zunächst an innere Materialdämpfung zu denken. Beim Verbiegen von Stahl, Nickel, Kupfer oder anderen Metallen wird pro Zeiteinheit eine unterschiedliche Energiemenge in Wärme umgewandelt (dissipiert). Das Abklingen einer Schwingung ist also materialabhängig. Die Unterschiede zwischen den übli-

chen Metallen sind aber nicht so groß, dass bei Tönen kurzer Dauer ein hörbarer Klangunterschied entstehen könnte. Der wesentliche Effekt kommt vielmehr vom Aufprallen der Saite auf die Bündel. Auch bei normaler Anzupfstärke prellt die Saite sehr oft auf den Bündeln auf (Kap. 7). Die Umspinnung bzw. Beschichtung wirkt hierbei als federnder und damit klangbestimmender Puffer zwischen Bund und Saitenkern. Die exakte Beschreibung dieses **Saitenprellens** ist nur mit immensem Aufwand möglich: Jeder einzelne Saite/Bund-Kontakt ist ein nichtlinearer Vorgang, der das sonst so hilfreiche Überlagerungsprinzip außer Kraft setzt. Die riesige Anzahl dieser nichtlinearen Kontakte lässt sich nur mit einem nichtlinearen, stochastischen Modell beschreiben – bei beängstigender Parameter Vielfalt.

Bei jedem Saite/Bund-Kontakt handelt es sich um einen mechanischen Stoß. Die Mechanik kennt zwei Idealformen von Stößen: Den elastischen, und den plastischen. Beim **elastischen Stoß** wird während der Kontaktphase keine Wärmeenergie erzeugt, was auch als **verlustfrei** bezeichnet wird. Dies bedeutet aber nicht, dass die Saite hierbei keine Energie verliert, sondern nur, dass die Energiesumme der beiden Stoßpartner konstant bleibt! Die Schwingungsenergie, die an den Bund abgegeben wird, ist für die Saite zunächst verloren, die Saite wird durch den elastischen Stoß bedämpft. Es darf auch nicht erwartet werden, dass die im Bund gespeicherte Schwingungsenergie später wieder auf die Saite übertragen wird, denn im Griffbrett und im Hals geht ein wesentlicher Teil der Energie verloren. Beim **plastischen Stoß** wird schon während der Kontaktphase bei der Materialverformung Energie irreversibel dissipiert, d.h. unwiederbringlich in Wärme umgewandelt.

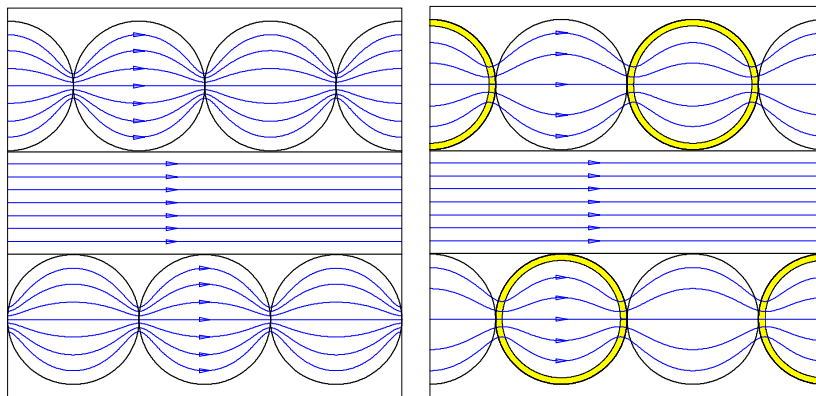
Jeder Saite/Bund-Kontakt ist Quelle für zwei neue, in entgegengesetzte Richtungen laufende **Sekundär-Wellen**. Die Energie der Sekundär-Wellen wird nicht von außen zugeführt, sondern der ursprünglichen Saitenschwingung entzogen. *Nach* jedem Kontakt ist das System wieder linear, alle Wellen dürfen überlagert werden. Die Kontaktphase selbst ist aber ein nichtlinearer, aussteuerungsabhängiger Prozess, der nicht durch Überlagerung beschreibbar ist. Die Vielzahl der Kontakte sorgt dafür, dass während der ersten Zehntelsekunden ein überwiegend nichtlineares System vorliegt; erst das danach folgende Ausschwingen ist linear.

Nur beim ganz schwachen Anzupfen einer (normal eingestellten) Saite tritt kein Saite/Bund-Kontakt auf; für diesen Fall zeigen alle Analysen, dass die Pegel der höherfrequenten Teiltöne deutlich schneller abklingen als die der tieffrequenten, dass also höherfrequente Anteile stärker bedämpft sind als tieffrequente. Das kurzzeitige Auftreffen der Saite auf dem Bund stellt eine breitbandige Anregung dar, die sozusagen die Höhen "auffrischt". Statt nur einmal angezupft zu werden, prasseln unzählige Anschläge auf die Saite und sorgen für einen höhenreichen, brillanten Ton.

**Hörversuche** an einer E<sub>2</sub>-Saite bestätigen diese Hypothese: Zwischen einer mit *nickel-plated steel* umspinnenen Saite (Fender 250) und einer mit *pure-nickel* umspinnenen Saite (Fender 150) besteht bei normaler Saitenlage ein gerade noch signifikant hörbarer Unterschied. Wenn aber die Sattelhöhe so vergrößert wird, dass kein Saite/Bund-Kontakt mehr zustande kommt, klingen beide Saiten gleich. Hierbei muss betont werden, dass Saite/Bund-Kontakte nicht grundsätzlich als Saitenklirren oder Scheppern empfunden werden. Sie verschmelzen vielmehr zu einem homogenen Anzupfklang (ATTACK), solange sie nicht extrem dominieren oder durch starke tieffrequente Anteile hörbar moduliert sind. Jeder Saite/Bund-Kontakt wandelt einen kleinen Teil der niederfrequenten Schwingungsenergie in höherfrequente um, deshalb klingt der Attack prellender Saiten brillanter. Das gegenüber Stahl weichere Nickel absorbiert gleichzeitig aber mehr dieser Zusatzhöhen, deshalb klingen nickelumspinnene Saiten nicht ganz so brillant wie stahlumspinnene.

Bei Gitarren, die keinen Magnet-Tonabnehmer, sondern einen Piezo-Tonabnehmer eingebaut haben, spielt die magnetische Leitfähigkeit der Umspinnung keine Rolle. Ihre Saiten werden deshalb mit Messing- oder Bronzelegierungen umsponnen. Auch hier gilt: Harte, verlustarme Metalle ergeben einen brillanten Klang, weichere Umspinnungen klingen auch weicher, d.h. nicht so brillant. Eine Besonderheit sind die **Zebra-Saiten** von DR: Ihre Umspinnung ist zweigängig, d.h. mit zwei nebeneinander liegenden, unterschiedlichen Umspinnungsdrähten hergestellt. Der Bronzedraht soll den für Westerngitarren typischen Klang erzeugen, der Stahldraht soll am Magnettonabnehmer punkten (siehe 3.2).

"Every other coil is nickel-plated steel, every other coil rare phosphor bronze, wound on hex cores" sagt die Internet-Werbung. Erst auf der Verpackung lies man dann: "...by winding phosphor-bronze plated steel wire side-by-side with 8% nickel plated steel wire. Phosphor-bronze brings out the acoustic tones of your guitar. 8% nickel plated steel is designed to increase the response of a Piezo pickup in the bridge, or a magnetic pickup mounted in the soundhole, as well as the pickups in the archtop guitars." Nickel für den Piezo? Sei's drum. Aber: Aus einem Bronzedraht, wie bei den Saiten einer Akustikgitarre üblich, wird ein bronzebeschichteter Stahldraht. Für die Optik reicht da eine hauchdünne Beschichtung, und schon schimmert's rötlich. Viel darf auf den Stahlkern auch nicht drauf, denn Bronze ist ein magnetischer Isolator! Man muss sich nur vorstellen, quer durch die Umspinnung müsste (entlang der Saite) elektrischer Strom fließen; und dann umwickelt man den Kern einmal mit blankem Kupferdraht, und einmal mit einer Kupferdraht/Kupferlackdraht-Kombination. Das Beispiel spricht für sich. Zwar ist Bronze kein perfekter magnetischer Isolator, aber doch um Größenordnungen ineffizienter als Stahl bzw. Nickel. **Abb. 3.1** zeigt den ungefähren Verlauf des Magnetflusses, grob vereinfacht, um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten. Erkenntnis: Der magnetische Widerstand der Umspinnung wird vor allem von der Berührfläche der Wicklung bestimmt (Hertzsche Pressung). In diesem Bereich ist die Flussdichte groß, das Material magnetisch gesättigt, die exakte Berechnung aufwändig.



**Abb. 3.1:** Magnetfluss in einer umspinnenen Saite. Einlagige Umspinnung (links), zweilagige Umspinnung mit einem bronzebeschichteten Wickeldraht (rechts). Die Flusslinien sind nicht exakt berechnet, bei der realen Saite beeinflussen sich Kern und Wicklung gegenseitig.

**Messungen** an einer 0,042"-**Zebra**saite ergaben, dass sie um 2 dB unempfindlicher ist als eine mit Stahldraht umspinnene 0,042"-Fendersaite (Typ 350). Die Kerndrähte beider Saiten haben gleichen Durchmesser und gleiche magnetische Eigenschaften, der Unterschied kommt allein von der Umspinnung. Wäre einer der beiden Umspinnungsdrähte tatsächlich aus massiver Bronze, würde die magnetische Effizienz des verbleibenden anderen Umspinnungsdrahtes praktisch nicht in Erscheinung treten. Ob jedoch ein bronzebeschichteter Stahldraht den akustischen Klang tatsächlich wesentlich beeinflusst, wäre ein Feld für weitergehende Versuche. Die nicht durchgeführt wurden.

Leider informieren nicht alle Saitenhersteller die Musiker über den tatsächlichen Saitenaufbau. Tom Wheeler überschreibt das Saiten-Kapitel in seinem Standardwerk "Guitar Book" mit "Welcome to Fantasyland". Und fährt fort: "Saitenwerbung strotzt häufig vor irreführender Information; man könnte glatt vergessen, dass der einzig seriöse Weg zum guten Klang über eigene Hörversuche führt". Es ist schon schwierig: Gerken et al. meinen z.B.: "Phosphor-Bronze-Saiten klingen etwas weicher als 80/20 Bronze- oder Messingsaiten", bei Day et al. heißt es hingegen: "Phosphorbronze klingt brillanter als Bronze". Beide Bücher sind mit nur zwei Jahren Abstand im GC-Carstensen-Verlag erschienen.

Die Materialangaben bei Gitarren-Saiten scheitern häufig am Marketing-Primat: So wird z.B. aus Messing (Kupfer-Zink-Legierung) im Englischen "**Bronze**". Der Grund ist die einfache Tatsache, dass "Brass" nicht nur Messing heißt, sondern auch Blech im Sinne von Blechblasinstrumente. Und wer möchte schon, dass seine Gitarrensaiten nach Blech klingen? Deshalb "Bronze" statt Brass, auch im Deutschen. Doch wie nennt man dann eine "echte" Bronze-Umspinnung (Kupfer-Zinn-Legierung)? Ebenfalls Bronze! Oder auch "Phosphor-Bronze", zur Unterscheidung von "Bronze". Der Hinweis auf Phosphor ist nicht unbedingt falsch: Der zur Porosität neigenden Bronze-Schmelze wird tatsächlich Phosphor zugesetzt. Er reinigt und reduziert die Porosität, und die hohe Härte von  $\text{Cu}_3\text{P}$  bringt Brillanz in den Klang. Wie viel die Hersteller aber beimischen, wird nicht bekannt gegeben.

Ähnlich Unklares bei "Pure **Nickel** Strings". Saiten aus reinem Nickel könnten niemals die hohe Zugspannung aushalten – es muss Stahl verwendet werden. Lediglich die Oberfläche (nickel plated) bzw. die Umspinnung (nickel wound) kann aus Nickel sein. Die Umspinnung kann sowohl aus reinem Nickel, als auch aus nickelbeschichtetem (-plattiertem) Stahl sein. So ganz genau wollen manche Saitenhersteller das aber nicht sagen. Nur die Werbung für die neueste Entwicklung sagt klar, was Sache ist: "Spezial-Saiten für Linkshänder" ...

### 3.2 Die Saitenlautstärke

Wenn man bei einer Gitarre den 9er-Saitensatz gegen einen 11er austauscht, klingt sie dann lauter? Die Praxis sagt ja, die Theorie rät zur Vorsicht: Zunächst sollte man anstelle der nur schwer ermittelbaren Lautstärke eine aussagekräftige Zwischengröße betrachten, wie z.B. den Wechselanteil der Stegkraft (Akustik-Gitarre, Steg-Tonabnehmer) oder die induzierte Wechselspannung (Magnet-Tonabnehmer). Hält man dann die Randbedingungen konstant (!), muss man feststellen, dass Stegkraft bzw. Spannung nicht vom Saitendurchmesser abhängen.

Zuerst zur **Stegkraft**: Die in die Saite beim Anzupfen eingeleitete Anregungskraft lässt sich im Modell als Summe zweier gleich großer Teilkräfte darstellen, die zu entgegengesetzt laufenden Transversalwellen führen (Kap. 2). Am Steg überlagern sich diese beiden Wellen wieder gleichphasig, so dass die Stegkraft (gemeint ist immer der Wechselanteil) der Anzupfkraft entspricht – unabhängig vom Saitendurchmesser. Trotzdem hat der Saitendurchmesser Auswirkungen auf den Klang, denn hiervon hängt die Quersteifigkeit (Anhang) und damit die Saitenauslenkung ab. Je dicker die Saite, desto größer darf die Anzupfkraft für vorgegebene Auslenkung sein, und desto lauter klingt die Gitarre – falls der Gitarrist dieses Potential nutzt. Bei *gleicher* Anzupfkraft prellen dickere Saiten weniger (Kap. 1.5.3) und klingen damit voluminöser als dünne Saiten. Ergänzend könnte man die Durchmesserabhängigkeit von saiteninternen Dämpfungsmechanismen und Abstrahlverlusten analysieren, was aber nicht oberste Priorität hatte und deshalb zurückgestellt wurde.