

Skatingkraft und antiskating

Reibung zwischen Diamant und den Rillenwänden erzeugt eine zur Rille tangentielle Reibungskraft F_f (siehe Abb.1).

Diese Kraft hängt von der vertikalen Auflagekraft F_v sowie dem Reibungskoeffizienten μ ab [3].

$$F_f = F_v \times \mu$$

Bei 45° Stereorillen ist die Belastung der einzelnen Wand $70,7\%$ ($= \sin 45^\circ$) der Auflagekraft, so daß die tatsächliche Reibungskraft gleich $1,4 \mu F_v$ ist [5].

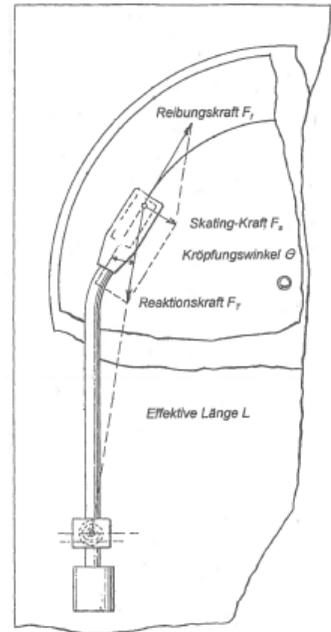


Abb. 1- (nach [11])

Abb. 2 and 3 zeigen die in nicht-modulierten und modulierten Rillen gemessene Reibungskraft. Die Umdrehungsgeschwindigkeit hat keinen Einfluß [11].

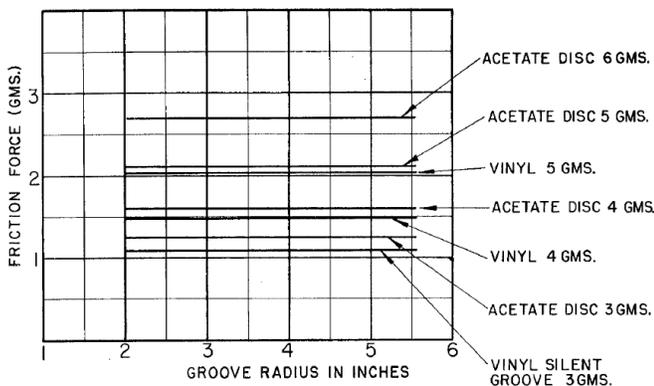


Abb.2 - (aus [11])

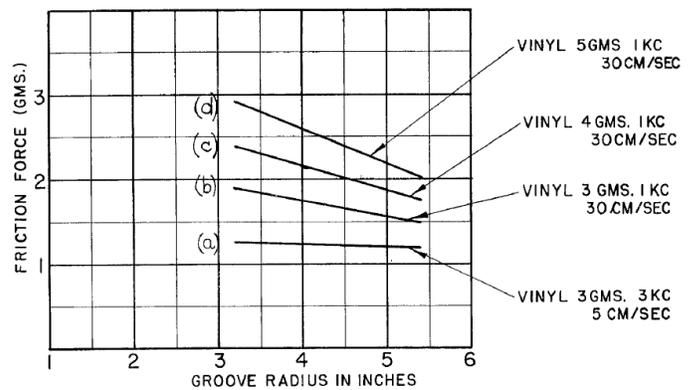


Abb.3 – (aus [11])

Der Reibungskoeffizient μ hängt vom Plattenmaterial, Zustand der Platte (Sauberkeit, Beschädigungen, Verschleiss), vom aufgezeichneten Lautstärkepegel sowie von der Oberflächenrauigkeit, vom Schliff (sphärisch, elliptisch, van den Hul, MicroRidge etc.) und vom Zustand (neu, abgenutzt) des Abspieldiamanten ab. Für einen Diamanten mit Shibata-Schliff und 1,5 g Auflagekraft wurden Werte zw. 0,22 und 0,43 gefunden [10], für einen sphärischem Diamanten (19.6 Mikrometer) und 3 g Auflagekraft Werte zw. 0,18 und 0,30 [10, 12]. Die Werte waren auf unterschiedlichen Platten sowie auf ein und derselben Platte unterschiedlich hoch [12].

Die Reaktionskraft F_t geht durch das Armlager. Diese Kraft als zerfällt in eine der Reibungskraft entgegengesetzte Komponente gleicher Größe $-F_f$ sowie eine durch die Plattenmitte gehende Komponente (d.h. senkrecht zur Rillentangente), die skating-Kraft F_s . Da diese (bei Nullstellung des antiskating-Mechanismus) im Kräftediagramm keine kompensierende Komponente hat, wird der Tonarm durch diese skating Kraft nach innen gezogen. In Abb.1 ist die Nadelspitze auf einem der beiden Nullpunkte, daher weist die skating-Kraft exakt zur Plattenmitte.

Die skating-Kraft wird bestimmt durch die (sich ändernde) Größe des Winkels φ zw. Rillentangente und effektiver Länge L (bzw. Kröpfungswinkel Θ und (sich ändernden) horizontalem Spurfehlwinkel α), Auflagekraft F_v , sowie durch den mechanischen Widerstand des Tonabnehmers (Nadelträgerdämpfung). In Abb.1 ist φ gleich dem Kröpfungswinkel Θ .

Bei Abwesenheit einer Skating-Kraft (wie z.B. , zumindest theoretisch, bei Tangentialarmen) ist die Auflagkraft F_v gleichmässig auf die beiden Rillenwände (und somit Kanäle) verteilt : die Vektoren R (rechter Kanal = äussere Rillenwand) und L (linker Kanal = innere Rillenwand) haben gleiche Länge und stehen senkrecht aufeinander (siehe Abb.4 (Blick von hinten auf den Abspieldiamanten)).

Wird, wie bei Dreharmen, eine Skating-Kraft F_s erzeugt, entsteht ein anderes Vektordiagramm mit $F_v + F_s$ als resultierendem Vektor. Dieser kann in einen Vektor R^* und L^* zerlegt werden. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, ist der Vektor R^* kürzer als der Vektor L^* .

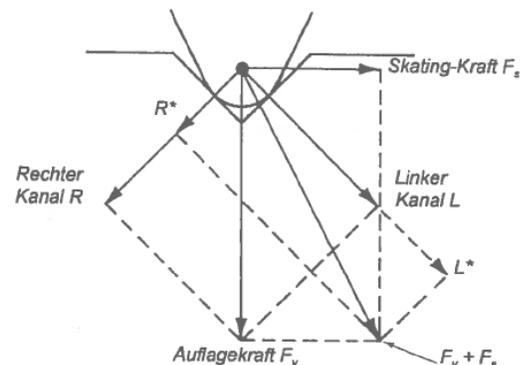


Abb. 4 – (nach [1])

Solange keine Kompensation der Skating-Kraft erfolgt, ist die Auflagekraftverteilung zwischen den beiden Rillenwänden derart, daß die Komponente R^* auf dem rechten Kanal kleiner ist als die Komponente L^* auf dem linken Kanal, so daß auf dem rechten Kanal Verzerrungen erzeugt werden. Es handelt sich faktisch um Fehlabtastung auf dem rechten Kanal. Gleichzeitig entsteht auf dem linken Kanal durch die grössere Komponente höherer Verschleiss der Rillenwand.

Kompensation der skating-Kraft erhöht die Abtastfähigkeit um ca. 20-25 % [2]. Um eine äquivalent Abtastfähigkeit nur durch Erhöhung der Auflagekraft zu erreichen, müsste diese um ca. 50 % erhöht werden, was zu erhöhtem Kontaktdruck und somit erhöhtem Verschleiss führt.

Bei ansonsten gleichen Bedingungen erzeugt ein elliptischer Abspieldiamant eine größere skating-Kraft als ein sphärischer Diamant [Abb. 5].

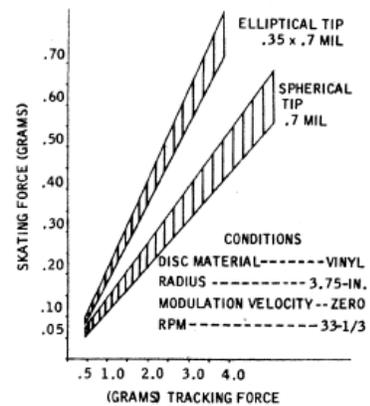


Abb. 5 – (aus [2])

Abb. 6 and 7 zeigen den Einfluß der Signalpegels auf die Skating-Kraft bei sphärischen bzw. elliptischen Schliff.

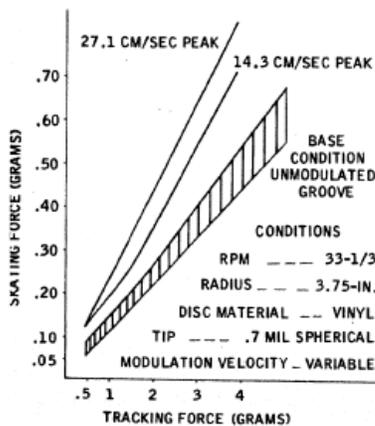


Abb. 6 – (aus [2])

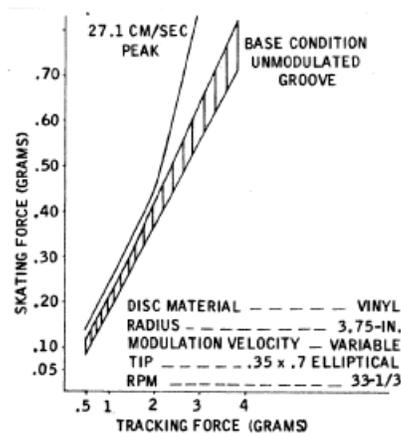


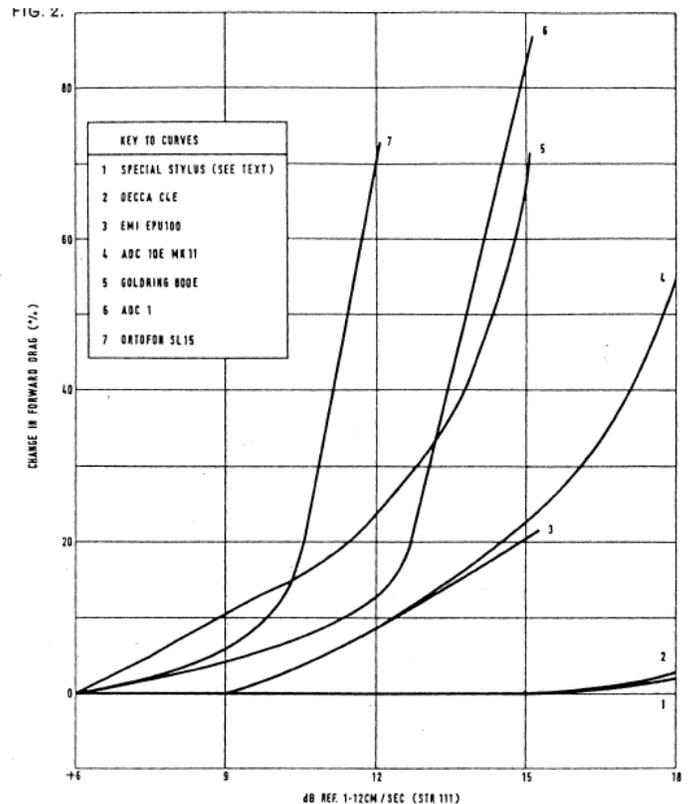
Abb. 7 – (aus [2])

Höhere aufgezeichnete Lautstärkepegel führen zu einer Erhöhung der skating-Kraft [1, 2].

Wright [6] konnte experimentell nachweisen, daß die Reibungskraft bei höheren Pegeln bei reinen Sinussignalen größer war.

Snell und Rangabe [7] stellten fest, daß die Abhängigkeit der Reibungskraft vom Pegel für verschiedene Tonabnehmer unterschiedlich war (siehe Abb.8).

Abb.8 – (aus [7])



RCA bestimmte 1968 experimentell den Einfluß des Signalpegels auf die Reibungskraft [9]. Bei einer Auflagekraft von 1,5 g wurde ein vernachlässigbarer Einfluß auf die Drehgeschwindigkeit des Plattentellers (Stroboskopmessungen) festgestellt. Dieselben Pegel hatten bei einer Auflagekraft von 5 g eine nicht unbeträchtliche Auswirkung (4mal höher). Die Messungen wurden beim Abspielen der Metallmatrize durchgeführt. Beim Abspielen einer Vinyl-Pressung würde eine um 30% niedrigere Verminderung der Drehgeschwindigkeit festgestellt werden als beim Spielen der Matrize. Die zur Messung verwendeten Geräte wurden, mit Ausnahme von Gewicht und Trägheitsmoment des Plattentellers, nicht näher spezifiziert.

Nach Gilson [5] setzt sich die Auswirkungen des Signalpegels aus drei Elementen zusammen: Trägheitseffekt (inertial drag) , Dämpfungseffekt (compliance drag) und Übertragereffekt (transducer drag).

Trägheitseffekt: Beschleunigungen und Verzögerungen der Nadel (Werte bis zu 1400 g wurden gemessen). Da Verzögerungskräfte nicht ins System zurückgeführt, sondern dem System in Form von Reibungswärme entzogen werden, wird dem Antriebsmotor ein konstantes Drehmoment abgefordert, sodaß der Trägheitseffekt zum Platteninneren hin zunimmt.

Dämpfungseffekt: die Überwindung von Steifheit und Dämpfung der Nadelträgerlagerung entzieht dem System Energie. Der Effekt ist am größten bei niedrigen Frequenzen, wo die seitlichen Auslenkungen am größten sind. Der Dämpfungseffekt nimmt zum Platteninneren hin zu. Dämpfung (und somit der mechanische Widerstand) kann für verschiedene Tonabnehmer sehr unterschiedlich sein und selbst bei verschiedenen Exemplaren desselben Abnehmers variieren [7].

Übertragereffekt: Energie, die dem System beim Umsetzen vom mechanischer in elektrische Energie entzogen wird, diese nimmt zum Platteninneren hin zu.

Weiterhin zieht laut Gilson die tangentielle Reibungskraft den Nadelträger aus seiner Ruhelage in eine Position, bei der die Richtungen von Nadelträgerachse und effektiver Länge übereinstimmen.

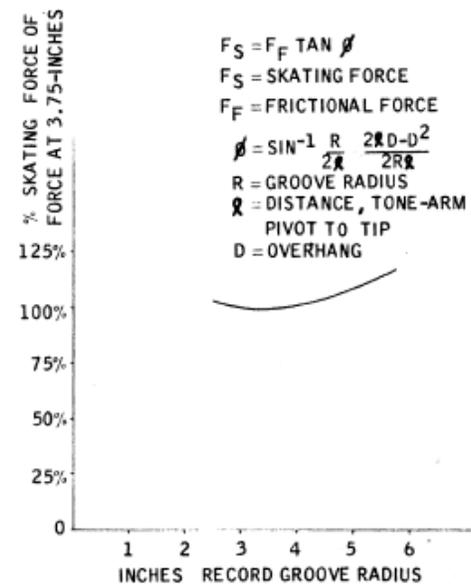
Die hierbei wirkende Kraft ist in etwa gleich groß wie die skating-Kraft F_s .

Gilson kommt zu dem Schluß, daß bei Aufbringen einer Kompensation am Armlager (antiskating) beide Kräfte kompensiert werden. Da auf bestimmten Teilen der Platte über- und auf den restlichen Teilen unterkompensiert wird (siehe hierzu weiter unten), wird der Nadelträger in Richtung Plattenmitte bzw. in Richtung Außenrand gezogen: "Der Betrag, um den das Nadelträger-Generator-System verschoben wird, hängt von der statischen Nadelträgnachgiebigkeit ab. Etwaige negative Auswirkungen auf den Klang hängen von der Empfindlichkeit ab, mit der der Generator (Magnet-Spulen) auf Nichtlinearitäten, die von einer Verschiebung des Nadelträgers aus seiner Ruhelage erzeugt werden, reagiert".

Die absolute Rillengeschwindigkeit (ca. 50,9 cm/s außen, ca. 20,9 cm/s innen) hat keinen Einfluß (bei nicht-modulierten Rillen) auf die skating-Kraft [2]. Dieser Befund wurde später von Wright [6] bestätigt, der einen dem von Kogen ähnlichen Versuchsaufbau (zur Messung der skating-Kraft) benutzte, nämlich einen Tonabnehmer, der über ein Mikrolager schwenkbar im headshell befestigt war. Wright benutzte einen Decca International Tonarm wegen der sehr geringen Reibungswerte des Einpunkt-Armlagers, während Kogen einen Shure-SME 3009 Arm verwendete.

Der Rillenradius hat einen Einfluß auf die skating-Kraft dahingehend, daß die Kraft bei ca. 8,9 cm minimal ist und Maxima bei Innen- und Außenrille aufweist, das innere Maximum etwas geringer als das äußere [2], sodaß die Kurve (skating-Kraft über Radius) einen parabelähnlichen Verlauf hat. Die Kraft variiert zwischen 90 und 100% des Maximalwertes (siehe Abb.9).

Abb.9 – (aus [2])



Diese beiden vorhergehenden Aussagen (kein Einfluß der vom Rillenradius abhängenden absoluten Rillengeschwindigkeit, vorhandener Einfluß des Rillenradius) scheinen in Widerspruch zueinander zu stehen, aber laut Kogen [2] existieren weitere, nicht vollständig verstandene Faktoren, die zu den verschiedenen großen Werten der skating-Kraft bei verschiedenen Radien führen.

Die skating-Kraft F_s ist abhängig von Rillenradius R , Überhang D und effektiver Armlänge L [2, 3, 4].

$$F_s = F_f \cdot \tan \Phi \quad [2, 3, 4]$$

wobei

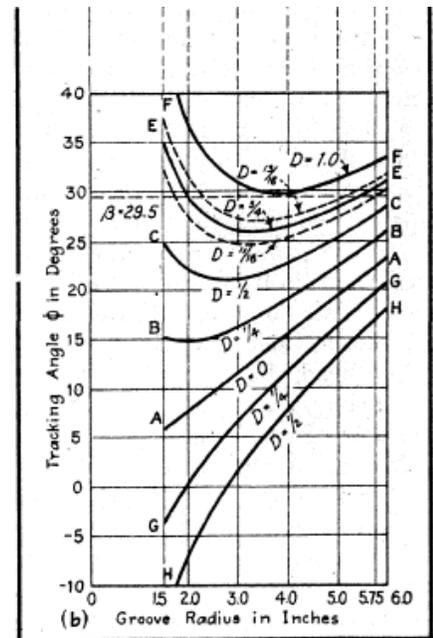
$$F_f = \text{Reibungskraft} = F_v \cdot \mu$$

wobei

$$\sin \phi = \frac{R}{2L} + \frac{2LD - D^2}{2LR}$$

φ (der Winkel zw. Rillentangente und effektiver Armlänge) ändert sich mit dem Rillenradius R, wobei der Verlauf in etwa dem der skating-Kraft (siehe Abb. 9) entspricht. In Abb. 10 wird φ für verschiedene Überhänge D gezeigt, die Kurve EE (D = 19,05 mm) ist stellvertretend für heute gebräuchliche Überhänge.

Abb. 10 – (aus [3])



Antiskating wird am Armlager durch Aufbringen eines Drehmoments erzeugt. Da die resultierende Kraft senkrecht auf dem Hebelarm “effektive Länge” steht, ist für die Berechnung des Drehmoments nicht $F_s = F_f \tan \varphi$, sondern $F_s = F_f \sin \varphi$ zu nehmen ($\tan \varphi$ steht senkrecht auf der Rillentangente und geht somit durch die Plattenmitte, $\sin \varphi$ steht senkrecht auf der effektiven Länge).

In Abb.11 ist die Nadelspitze wiederum auf einem Nullpunkt, sodaß der horizontale Spurfehlwinkel α gleich Null und somit der Winkel φ gleich dem Kröpfungswinkel Θ ist.

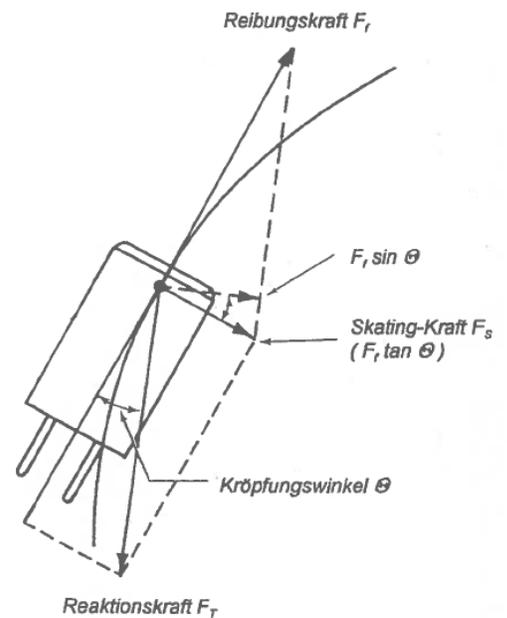


Fig. 11 – (nach [11])

In einer anderen Methode zur Berechnung der skating-Kraft wird diese in Abhängigkeit vom Kröpfungswinkel Θ und vom horizontalen Spurfehlwinkel α dargestellt [8]. Für Radien größer als der äußere und kleiner als der innere Nullradius ist die skating-Kraft gegeben durch

$$F_s = F_f \cdot \sin (\Theta + \alpha)$$

Zwischen den beiden Nullpunkten ist die skating-Kraft gegeben durch

$$F_s = F_f \cdot \sin (\Theta - \alpha)$$

Der Spurfehlwinkel α ist gegeben durch

$$\alpha = \pi/2 - (\Phi + \Theta) \quad \text{mit} \quad \cos \Phi = \frac{1}{2 \cdot L \cdot R} \cdot (L^2 - Lm^2 + R^2)$$

wobei

L = effektive Armlänge R = Rillenradius Lm = Abstand Armlager - Plattenachse

Fazit :

1. Da die skating-Kraft nicht konstant ist, sondern eine parabelähnliche Kurve beschreibt, ist eine exakte Kompensation nicht möglich, solange ein antiskating-Mechanismus verwendet wird, an dem nur Festwerte eingestellt werden können ; jede noch so penible Einstellung der antiskating-Kraft kann diese Kurve in maximal zwei Punkten schneiden.
2. Der Reibungskoeffizient zw. Diamant und Platte, der in die Berechnung der skating-Kraft und somit des am Armlagers aufzubringenden Drehmoments eingeht, ist ebenfalls nicht konstant, sondern ist erheblichen Schwankungen unterworfen, je nach Zustand der Oberfläche der beiden Reibungspartner.
3. Für die Berechnung bzw. Auslegung des antiskating-Mechanismus des jeweiligen Tonarms muss nicht $F_s = F_f \tan \varphi$, sondern $F_s = F_f \sin \varphi$ bzw. vereinfacht $F_s = F_f \sin \Theta$ verwendet werden.
4. Im Zweifelsfall sollte der Armhersteller hinsichtlich Punkt 2. und 3. gefragt werden.

5. Da der Schliff des Abspieldiamanten und die mechanischen Parameter des Tonabnehmers die skating-Kraft, beeinflussen, kann man die antiskating-Kraft mit Hilfe einer Testplatte wie derjenigen der Hi-Fi News & Record Review (HFNRR) eingestellt werden. Diese enthält vier Testsignale von 300 Hz mit Pegeln von 12, 14, 16 und 18 dB in Seitenschrift. Bei inkorrektur Einstellung kommt es zu Fehlabtastung in einem der beiden Kanäle, was sich durch Auftreten eines Summtons im entsprechenden Kanal bemerkbar macht. Idealerweise ist kein Summton zu hören. Gleichmässiges Summen auf beiden Kanälen spricht für eine korrekte Einstellung (Punkt 1. beachten).

6. Da weiterhin die Einstellung des Tonabnehmers hinsichtlich Kröpfungswinkel die skating-Kraft beeinflusst, der antiskating-Mechanismus des jeweiligen Tonarms jedoch für einen bestimmten Winkel berechnet ist, führt eine Einstellung des Winkels mit einer von der vom Tonarmhersteller empfohlenen (bzw. beigefügten) verschiedenen Schablone zu einem vom Berechnungswinkel verschiedenen Winkel, sodaß die Faustregel “antiskating = Auflagekraft” nicht länger angewandt werden kann. Die HFNRR-Testplatte kann in einem solchen Fall gute Dienste leisten.

7. Da auf einem Teil der Schallplatte Unter-, auf dem anderen Teil Überkompensation erfolgt, werden die Rillenwände in diesen Teilen entsprechend einseitig belastet und verschlissen (beschädigt). Der Abspieldiamant hingegen wird über die Plattenseite hinweg von beiden Seiten belastet, sodaß ein gleichmässigen Verschleissbild entsteht.

8. Aus Diskussionen in Webforen wird deutlich, daß manche Teilnehmer denken, daß, wenn der Spurfehlwinkel gleich Null ist, wie in den Nullpunkten eines Drehtonarms, die skating-Kraft ebenfalls Null ist. Dies gilt jedoch nur für Radialarme, bei Drehtonarmen ist diese Annahme schlichtweg falsch. Solange die Verbindungslinie zw. Armlager und Nadelspitze im Kontaktpunkt mit der Rille nicht tangential zur Rille verläuft, was bei gekröpften Armen immer der Fall ist, und bei geraden Drehtonarmen außerhalb des einzigen Nullpunkts, wird eine skating-Kraft erzeugt, die überdies bei geraden Arme das Vorzeichen wechselt. Aus genau diesem Grund haben Arme wie der Garrard Zero oder Thales einen antiskating-Mechanismus.

Literaturhinweise

- [1] Alexandrovitch, "A stereo groove problem", J. of the Audio Engineering Society 1961, S.166
- [2] Kogen, "The skating force phenomenon", Audio, Okt.1967, S.53; Nov. 1967, S.38
- [3] Bauer, "Tracking angle in phonograph pickups", Electronics, März 1945, S.110
- [4] Oakley, "Skating force, mountain or molehill", Audio, März 1967, S.40
- [5] Gilson, "The cartridge alignment problem", Wireless World, Okt.1981, S.59
- [6] Wright, "Bias correction and dynamic conditions", Hi-Fi News, Okt.1969, S.1187
- [7] Snell et al., "Frictional drag and bias compensation, Hi-Fi News, Feb. 1970, S.221
- [8] Randhawa, "Pickup arm design techniques", Wireless World, März 1978, S.73; April 1978, S.63
- [9] Halter, Letters to the editor, J. of the Audio Engineering Society 1968, S.354
- [10] Pardee, "Determination of sliding friction between stylus and record groove", J. of the Audio Engineering Society 1981, S.890
- [11] Alexandrovich, "New approach to tone arm design", Audio Engineering Society preprint 149 (1960)
- [12] Rangabe, "The floating transcription arm: a new approach to accurate tracking with very low side-thrust", The Radio and Electronic Engineer, Oktober 1966, S.203

Klaus Rampelmann, Den Haag (Niederlande), Mai 2015