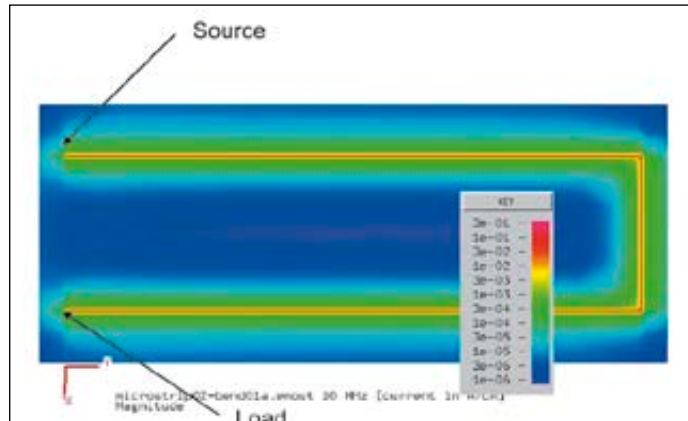


Masseführung auf Platinen mit gemischten Chips, Teil 1

Dieser dreiteilige Beitrag erläutert Probleme und Lösungen bei der Masseführung auf Leiterplatten mit gemischten integrierten Schaltungen.



Strompfad eines 1-MHz-Signals auf einer Leiterplatte

Dabei steht zunächst die für viele Anwendungen genügende einfache Methode mit einer durchgehenden Massefläche ohne Einschnitte im Vordergrund. Am Anfang stellt sich die Grundfrage: Wo fließt eigentlich der Strom? Später wird beschrieben, wie Komponenten optimal anzuordnen sind und wie man Signalleitungen führen muss, um das Übersprechen zu minimieren. Schließlich werden Versorgungsströme betrachtet und Schlussfolgerungen für allgemeine Anwendungen gezogen.

Leiterplattenentwickler spüren oft Unsicherheiten, wenn es darum geht, Komponenten bezüglich galvanischer Verkopplungen und gegenseitiger Beeinflussungen richtig zu platzieren und zu erden, insbesondere wenn es sich um analoge und digitale (gemischte) ICs handelt. Sollten die beiden Massen völlig separat ausgelegt (isoliert) ausgelegt sein? Sollten sie an nur einem einzigen Punkt zusammengeführt werden? Und wo soll dieser zentrale Masse-

punkt dann für beste Funktion liegen? Wie kann dieses Konzept implementiert werden, wenn es mehrere ICs gibt, die analoge und digitale Massen verlangen? Dieser Beitrag zeigt, wie man in üblichen IC-Konfigurationen die niederohmigste Masseimpedanz realisieren kann.

Ströme - und wo sie fließen

Man spricht von einem Schaltkreis oder Stromkreis, weil Strom (Elektronen) immer aus einer Quelle zu einer Last fließt, durch diese hindurch und dann auf einer weiteren Leitung zur Quelle zurück. So einfach dies scheint, so bedeutsam ist es für ein gutes Design im Analogbereich. Bei Digitalschaltungen liegen die Probleme bei der Massegestaltung und Signalführung ähnlich wie bei Analogschaltungen, was deutlich wird, wenn man sie rein physikalisch betrachtet: Im Analogbereich folgt das Ausgangssignal linear dem Eingangssignal, im Digitalbereich folgt es

lediglich nichtlinear. Die hohen Änderungsgeschwindigkeiten digitaler Signale bedeuten hohe Induktionsströme in den Leitungen, deren Induktivität sich nur minimieren, aber nicht völlig beseitigen lässt. Analoge wie digitale Schaltkreise enthalten im Grunde die selben Bauelemente (Transistoren, Dioden und Widerstände). Ströme und Spannungen innerhalb einer Schaltung folgen den selben physischen Prinzipien, wie die Schaltung auch aussehen mag. Wo ein Strom irgendwohin fließt, kehrt er auch wieder zur Quelle zurück.

Bild 1 wirkt simpel. Doch ist Ihnen klar, dass überhaupt kein Signalstrom fließen würde, wäre die Eingangsimpedanz von IC2 unendlich groß? In der Realität jedoch fließt Strom von IC1 nach IC2 und über die Masseleitung zurück. Diese wird in manchen Darstellungen einfach weggelassen (Bild 2). Was bedeutet dieser Strom im Ausgang von IC1 und im Eingang von IC2? Das ist eine durchaus interessante Frage. Natürlich sind die ICs selbst nicht die Quellen des Stroms. Der Signalstrom stammt aus der Stromversorgung. Um die Dinge einfach zu halten, nehmen wir eine einzige Versorgungsstromquelle an, wie eine Batterie. Um vollständig zu sein, betrachten wir auch die üblichen Abblockkondensatoren direkt an den ICs. In Bild 3 wird zudem noch der vollständige geschlossene Verlauf eines Gleichstroms (oder DC-Anteils im Signalstrom) zwischen den ICs angegeben. Dieser ist im Analogbereich meist null (kapazitive oder induktive Kopplung), während er bei Digitalschaltungen das vollständige Signal darstellen kann. Fast immer ist er nur ein Teil der möglichen Ströme in diesem kleinen System. Hinzu kommen können ein AC-Signalstromanteil, der Eingangstrom von ICs (falls es sich nicht um einen Generator handelt) und der Ausgangstrom von ICs (falls dieser belastet wird). All diese

Originaltitel: "Successful PCB Grounding with Mixed-Signal Chips - Follow the Path of Least Impedance" by Mark Fortunato, Senior Principal Member of Technical Staff, Maxim Integrated Products, Inc., October 2012
frei übersetzt von FS

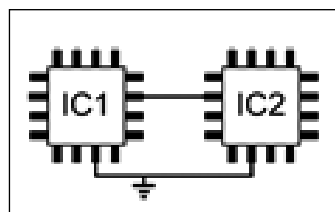


Bild 1: Eine einfache Verbindung mit Rückfluss über Masse

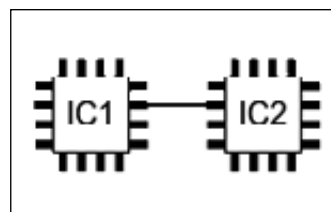


Bild 2: Die Rückverbindung wird manchmal nicht extra angegeben.

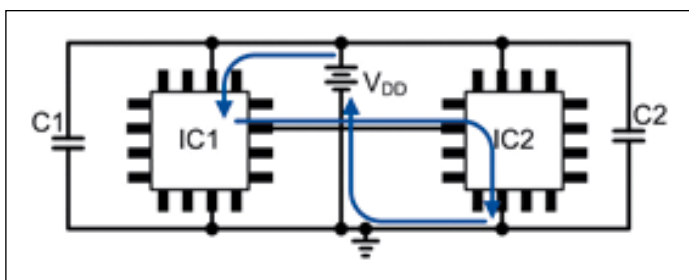


Bild 3: Der Stromkreis des DC- oder sehr niederfrequenten Anteils im Signal

Ströme sind im Analogbereich üblicherweise reine Wechselströme. Im Falle des Signalstroms zwischen den ICs verläuft dieser dann gemäß Bild 4, wenn die Leitungsimpedanzen und der Blind- sowie Verlustwiderstand des Abblockkondensators C1 vernachlässigbar gering sind. Dies gilt auch für schnelle digitale Signale mit ausgeglichenen H/L-Zeiten, wie bei selbsttaktenden Codes. Der Strom beginnt und endet quasi beim Bypasskondensator.

Es ist nun wichtig, sich daran zu erinnern, dass ein IC-Ausgang nicht die eigentliche Quelle des Ausgangsstroms ist. Das wird spätestens klar, wenn man einen Ausgang mit Pullup-Widerstand betrachtet. Besonders interessant ist dieser Fall dann, wenn sich der Pullup-Widerstand im Eingangsbereich der folgenden Stufe befindet, wie z.B. bei TTL-Systemen. Bild 5 zeigt, wo der Signalstrom zwischen zwei ICs dann fließt: Im Prinzip die gleiche Situation wie zuvor, nur jetzt komplett auf IC2 verlagert! Der Strom „hebt“ gemäß seiner Stärke und dem ohmschen und induktiven Widerstand der Masseverbindung nicht IC1, sondern IC2. Dies ist nicht unbe-

dingt gleich zu vermuten. Mehr noch: Beim statischen L-Zustand (höherer Strom als bei H) fließt der Strom direkt aus der Batterie und über IC1 nach Masse, wo er am ohmschen Widerstand der Masseverbindung eine unerwünschte Spannung hervorruft. In der Praxis kann es bei solchen Systemen also leicht dazu kommen, dass die Masseproblematik bei beiden ICs Beachtung verlangt.

Willkommen in der Realität!

Die Betrachtung war bisher einfach, weil die Signale in DC und AC eingeteilt wurden. Allerdings muss man in der Praxis bei AC-Signalen niedriger Frequenz besser die DC-Betrachtung anwenden. Eine wohldefinierte Grenze zwischen den beiden Betrachtungsweisen gibt es leider nicht. Die Wahrheit ist, dass beide Pfade immer mehr oder weniger verwickelt sind. So stammt im Beispiel von Bild 6 beim ersten H/L-Wechsel der Strom (auch) vom Bypasskondensator C2. Dies kommt daher, dass der Ausgang von IC1 sehr niederohmig ist und somit einen hohen Strom aus dem Eingangspin von IC2 verlangt.

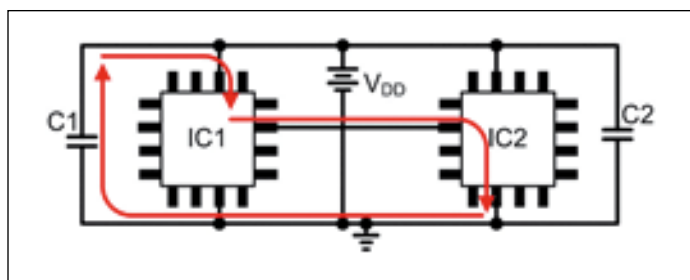


Bild 4: Der Stromkreis bei hochfrequentem Signal aus IC1

Wir stellen uns einen Bypasskondensator C2 mit sehr kurzen Verbindungen zu seinem Chip vor, um AC-Anforderungen auch bei hohen Frequenzen bzw. geringen Schaltzeiten zu genügen. Die Betriebsspannungsquelle kann den bei steilen Flanken erforderlichen Strom nicht liefern, da ihr Innenwiderstand zu hoch und die Leitungslänge (Induktivität) zu groß ist. Das ist ja der Grund, warum man Bypasskondensatoren so nah als möglich am IC platziert. Weil dabei die Kapazität die Induktivität deutlich überwiegt, bleibt bei schnellen und kräftigen Stromänderungen die Spannung dennoch ausreichend konstant. Die Stromversorgung mit ihrer Zuleitungsinduktivität kann das nicht leisten. Wenn die schnelle Stromänderung abklingt, kommt mehr und mehr Strom aus der Batterie und immer weniger vom Bypasskondensator.

Wir vereinfachen dieses Konzept nun durch die Annahme, dass der DC-Strom aus der Batterie kommt und der AC-Strom vom Bypasskondensator. Wir wissen natürlich, dass die Wirklichkeit ein bisschen komplexer ist.

Wenn wir mehr die dynamischen Situationen betrachten, stellen wir fest, dass alle Ströme durch eine Kombination der oben genannten vier Pfade fließen. Der gemeinsame Pfad in jeder Richtung beginnt am Betriebsspannungs-Pin des betreffenden Bauteils (IC1 oder IC2), führt durch diese Komponente und teilt sich nach Masse und zum Ausgang auf, wenn dieser belastet wird. Über die Last oder den angeschlossenen IC fließt der Teilstrom nach Masse. Der gesamte aus der Batterie stammende Strom tritt also in der Masseleitung wieder auf und fließt über diese zur Quelle zurück. Die Frequenz des Signals bestimmt, wie der Signalstrom-Kreislauf genauer ausfällt. Bei Gleichstrom fließt der Signalstrom komplett durch die Batterie, bei hochfrequentem Strom fließt er stattdessen durch den Bypasskondensator der betreffenden Komponente. Diese beiden Pfade werden in der Realität immer mehr oder weniger extrem verteilt genutzt. Selbst wenn ein Digitalsignal mit langsamer Rate (z.B. 1 Hz) den logischen Zustand wechselt, kann die entsprechende Stromänderung genau so schnell wie

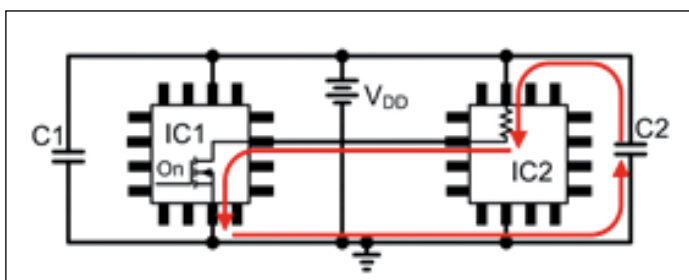


Bild 5: Der HF-Signalstromkreis in dem Fall, wenn sich ein Pullup-Widerstand in IC2 befindet

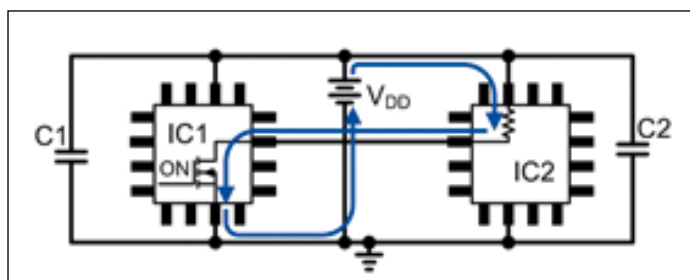


Bild 6: Der DC-Signalstromkreis in dem Fall, wenn sich ein Pullup-Widerstand in IC2 befindet

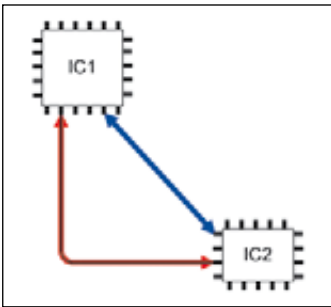


Bild 7: Hinweg (rot) und DC-Rückweg. Doch welchen Rückweg nimmt HF?

z.B. bei einem 10-MHz-Signal erfolgen. Sie tritt lediglich nicht so oft auf.

Natürlich gehen wir hier immer von einem guten Platinenentwurf aus; die Bypasskondensatoren und ICs liegen sehr nahe, und die Masseverbindung ist so kurz und induktivitätsarm wie möglich. Dies durchzusetzen, macht den Job eines Entwicklers viel leichter. Es ist nun möglich, Bypasskondensator und IC als Einheit zu betrachten, was das Herangehen an die Stromverläufe auf der Platine vereinfacht. Die Verbindungswege innerhalb eines ICs sind äußerst kurz, sodass auch bei sehr schnellen Digitalsignalen keine Probleme auftreten sollten. Als Problem bleibt scheinbar der verhältnismäßig große Abstand zwischen dem Ausgang des einen und dem Eingang des anderen Chips. Dieser bedingt zwar eine beachtliche Länge des Rückkehrpfads (Masse), jedoch ist bei höheren Frequenzen bzw. kurzen Schaltzeiten die parasitäre Kapazität der Verbindungsleitung nur dann

eine Störgröße, wenn die Verbindung inhomogen ausgeführt wurde. Üblich ist jedoch die Auslegung als homogene Leitung (Streifenleitung mit definiertem Wellenwiderstand). In diesem Fall spielen die verteilten parasitären Kapazitäten/Induktivitäten keine Rolle mehr. Der Ausgang „sieht“ den Wellenwiderstand wie einen ohmschen Widerstand. Denken Sie also immer an definierte Streifenleitungen, wenn die ICs in einem größeren Abstand angeordnet werden. Die Bypasskondensatoren bleiben stets nahe bei ihnen.

Digitale und analoge Masse

Bisher wurden die ICs nicht explizit als digital oder analog angesehen. IC1 könnte ein Op Amp mit einem einfachen FET im Ausgang sein, IC2 ein Analog/Digital-Konverter. Genauso gut könnte IC1 ein Mikrocontroller mit Gegentaktausgang und IC2 ein D/A-Konverter sein.

Wir erwähnen ADCs und DACs, da dies normalerweise die Komponenten sind, die besondere Sorgen bei der Erdung sowohl für die Analog- als auch die Digitalsignale verursachen.

Analogschaltkreise müssen in der Regel Signale verarbeiten, die recht kontinuierlicher Art sind; Spannung oder Strom ändern sich zeitlich und im Pegel nicht extrem. Digital-ICs müssen hingegen abrupte Wechsel verarbeiten, sowohl von der Geschwindigkeit als auch von den Signalpegeln her (H und L sind physikalische Extremzu-

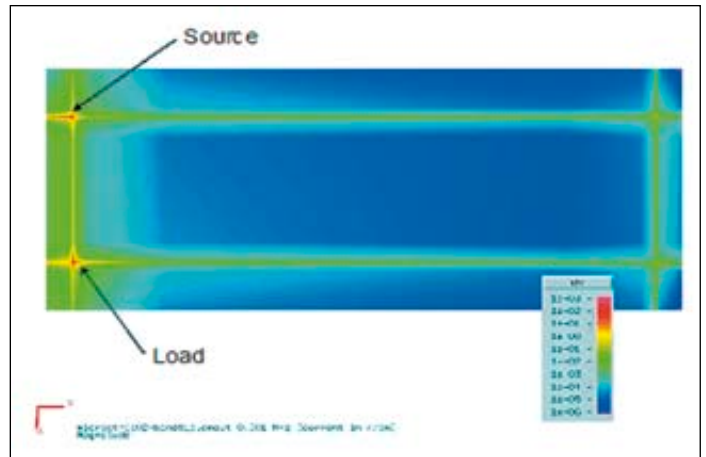


Bild 9: Thermografie-Ergebnis bei 1 kHz (Quelle: B. Archambeault)

stände). Diese abrupten Wechsel können Analogsignale beträchtlich stören, wenn die Signalpfade nicht konsequent voneinander getrennt werden. Daher sind in ICs, die analoge und digitale Signale verarbeiten/generieren, getrennte Massen für Analog- und Digitalteil vorgesehen.

Der Pfad der geringsten Widerstände

Es ist klar, dass Strom tatsächlich den „Weg des geringsten Widerstands“ nimmt. Ist damit nur der ohmsche Widerstand gemeint, dann gilt dies leider nur für Gleichstrom. Für Wechselstrom hingegen trifft zu, dass er im Pfad der geringsten Blindwiderstände fließt. Dabei ist interessant, dass parasitäre Blindwiderstände (Längsinduktivität und Parallelkapazität pro Längeneinheit einer Leitung) ihre schädliche Wirkung verlieren, wenn die Leitung homogen (gleichförmig) ausgeführt wird, konkret als Stripline.

der spezifische Widerstand der Massefläche ortsunabhängig ist. Der höchste Teilstrom fließt deshalb im direkten, geradlinigen Pfad und der geringste Teilstrom im längsten, am meisten vom direkten Weg abweichenden Pfad. Der Einfachheit halber kann man sich bei Gleichstrom auf den geraden Weg beschränken, wobei man nicht vergisst, dass es eine ziemlich breite Stromverteilung abseits dieses Hauptweges gibt.

In dieser Betrachtung geht es vor allem um Wechselstromsignale in einem sehr breiten Frequenzspektrum. Für ein PCB mit einer der Signalebene benachbarten Massefläche lässt sich oft jeder Signalpfad als Stripline ausführen. Damit spielen parasitäre Kapazität und Induktivität insofern keine Rolle mehr als sie quasi im Wellenwiderstand aufgehen, der rein ohmsch zu verstehen ist, im Unterschied zu einem echten ohmschen Widerstand jedoch keine Wärme entwickelt. Das tut nur der wesentlich geringere und daher meist zu vernachlässigende Verlustwiderstand der Stripline. Der Wellenwiderstand, oft Impedanz genannt, hängt von der Geometrie der Leitung, der Dicke und dem Material (besser dessen Dielektrizität) der Platine ab. Die Details sind in der Grundlagenliteratur ausführlicher erläutert. Für die hier vorzunehmenden Betrachtungen ist dieses Detailwissen nicht notwendig. In dem einfachen Beispiel in Bild

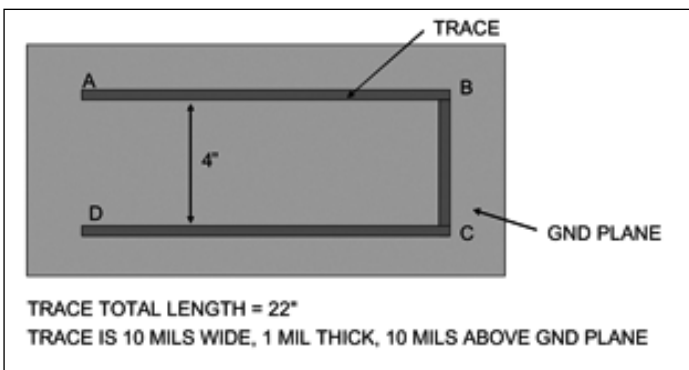


Bild 8: Geometrie für die folgenden Beispiele (Quelle: B. Archambeault)

Für Gleichstrom ist nur der ohmsche Anteil wichtig. Im Falle einer Massefläche ist der Weg, den der Gleichstrom nimmt, im Prinzip eine Gerade. In der Realität verteilt sich der Strom rechts und links davon, da der Widerstand mit der Breite der leitenden Fläche sinkt. Man könnte von indirekten Pfaden sprechen, die eine theoretische Vereinfachung darstellen. Die Höhe des Teilstroms in jedem Pfad verhält sich umgekehrt zur Länge und somit zum Widerstand des Pfades, da

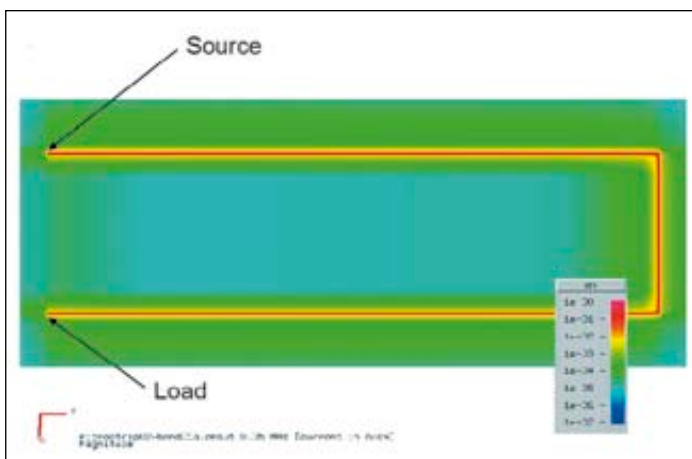


Bild 10: Thermografie-Ergebnis bei 500 kHz
(Quelle: B. Archambeault)

7 sollen nicht eingezeichnete andere Komponenten die direkte „heiße“ Verbindung zwischen den ICs (rot) nicht zulassen. Der Rückstrom über die unten liegende Massefläche nimmt dann vermutlich den direkten, in jeder Hinsicht widerstandsärmsten Weg (blau). Diesen Weg würde garantiert auch Gleichstrom nehmen. Doch was für Gleichstrom ohne Bedeutung ist, wiegt für Wechselstrom mit steigender Frequenz immer schwerer: Die angenommene Verbindung wäre recht inhomogen. Ein Wellenwiderstand ließe sich nur differentiell definieren. Dieser Wellenwiderstand wäre in erster Näherung direkt abhängig vom Abstand der Wege zueinander und daher an IC2 am geringsten, an IC1 etwas größer und in der Mitte der Leitung, am Knickpunkt, maximal. Das bedeutet Reflexionen. Für Hochfrequenz wäre dieser Pfad ungeeignet. Hochfrequenz nimmt daher einen anderen Weg, der gleich gezeigt wird.

Simulationen führen weiter

Aber was ist hier „Hochfrequenz“? Das ist theoretisch schwer zu definieren. Wo Signalreduzierungen bzw. Reflexionen auf dem blauen Pfad praktisch noch nicht vorkommen oder stören würden, läge die obere Signalfrequenz für diesen Pfad. Sie wird also von der Geometrie der „heißen“ Leitung (Länge, Breite, Verlauf) und von der

Dicke der Platine sowie deren Material bestimmt. Die Qualität der Massefläche spielt eine untergeordnete Rolle. Wie gesagt: Die mathematische Behandlung dieses Phänomens ist recht komplex. Glücklicherweise hat Dr. Bruce Archambeault hierzu praktische Ergebnisse geliefert, die für die Praxis sehr wichtig und hilfreich sind. Sie sind visuell schnell zu erfassen und viel besser als eine Seite voller Gleichungen. Bild 8 bringt ein Beispiel. Eine U-förmige Leitung liegt über einer Massefläche. Dies kann als Extremfall der oben dargestellten Problematik aufgefasst werden.

Dr. Bruce Archambeault führte elektromagnetische Simulationen mit verschiedenen Signalfrequenzen durch und hielt genau fest, über welche Pfade der Strom floss. Oberhalb der Platine bestimmt natürlich die schmale Leitung den Weg, aber die Rückkehrströme können innerhalb der Massefläche verschiedene Hauptwege nehmen. Durch die thermografisch erfasste Erwärmung veraten sich diese Wege. Bild 9 zeigt, wie der Strom bei einem 1-kHz-Signal fließt, nämlich in erster Linie auf einem schmalen Pfad (gelb) direkt von der Last zurück zur Quelle. Jedoch lässt der hellblaue Bereich rechts daneben vermuten, dass bereits bei dieser geringen Frequenz ein kleiner Betrag des Stroms vom direkten Wege abweicht. Dies

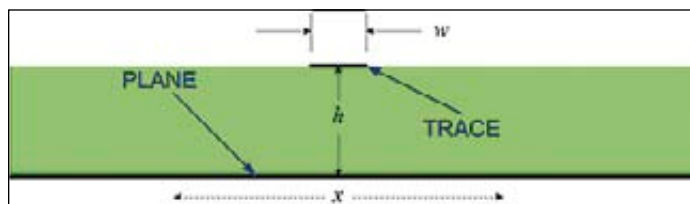


Bild 11: Zur Erklärung der Variablen in der Gleichung

ist allerdings auch mit sich ausbreitender Wärme vom direkten Weg erklärbar. Grün erscheint der U-förmige Weg auf der Platinenoberseite, während dunkelblaue Farbe Stromlosigkeit signalisiert.

Bild 10 zeigt die Situation bei 50 kHz. Der direkte Weg ist verblasst und wird nur noch in geringem Umfang genutzt. Der Strom fließt im Wesentlichen unterhalb des oberen Signalpfades (rote und gelbe Linien). Dies ist damit erklärbar, dass dieser Weg vom physikalischen Aufbau her homogen ist, dass also statt parasitärer Reaktanzen ein Wellenwiderstand wirksam wird. Von der schwachen grüneren Zeile (direkter Weg, kaum genutzt) dehnt sich zudem ein mittlerer Bereich (hellblau) bis fast zum Boden des Us aus. Das heißt: Strom fließt quasi überall.

Zuletzt ein Blick auf unser Aufmacherbild: Es informiert über die Pfade mit einem 1-MHz-Signal. Eigentlich ist es nur ein Pfad. Denn hier fließt der Rückkehrstrom nun ziemlich konsequent entlang des oberen Pfades. Der dunkelblaue Bereich bedeutet Stromfreiheit. Er überzieht auch den direkten Weg.

Wie breit ist die Spur?

Die Thermografie lässt vermuten, dass der Rückkehrstrom

eine breitere Bahn nutzt als der hinfließende Strom. Die Massefläche leitet jedoch Wärme gut, Kupfer ist ein guter Wärmeleiter. Daher ist die Temperatur als Maß der Breite des vom elektrischen Strom genutzten Teils der Masseebene nur eingeschränkt brauchbar. Man kann hier aber die physikalische Theorie bemühen: Die Verteilung des Strom ab einer bestimmten Frequenz (in unserem Beispiel etwa 1 MHz) wird durch Formel 1 beschrieben (s. u.):

In Bild 11 sind die Parameter grafisch dargestellt. Es ist interessant, dass die Gleichung von der Frequenz unabhängig ist, sobald diese eine bestimmte Größe überschritten hat. Wenn man die Gleichung auswertet, dann stellt man eine Gauß'sche Verteilung fest mit einem Gipfel direkt unter dem Zentrum des oberen Pfades. Wenn man den Strom im Bereich $x = 0 - 1$ und $x = h$ summiert, stellt man fest, dass 50% des gesamten Stroms in diesem Bereich fließt. Weiter verteilen sich 80% des Stroms zwischen $x = -3 h$ und $x = 3 h$. Was man intuitiv erwarten würde, gilt tatsächlich: Je dünner die Platine (je kleiner h), je näher oberer Pfad und untere Spur also zusammenliegen, umso konzentrierter erfolgt die Verteilung des Stroms. ◀

$$J(x) = \frac{I}{w\pi} \left[\tan^{-1}\left(\frac{2x-w}{2h}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{2x+w}{2h}\right) \right]$$

- Formel 1:** (x) **Stromdichte**
I **Stromstärke (Effektivwert)**
W **Breite der Spur**
h **Dicke des Dielektrikums**
x **Breite der Spur, in welcher Strom fließt**