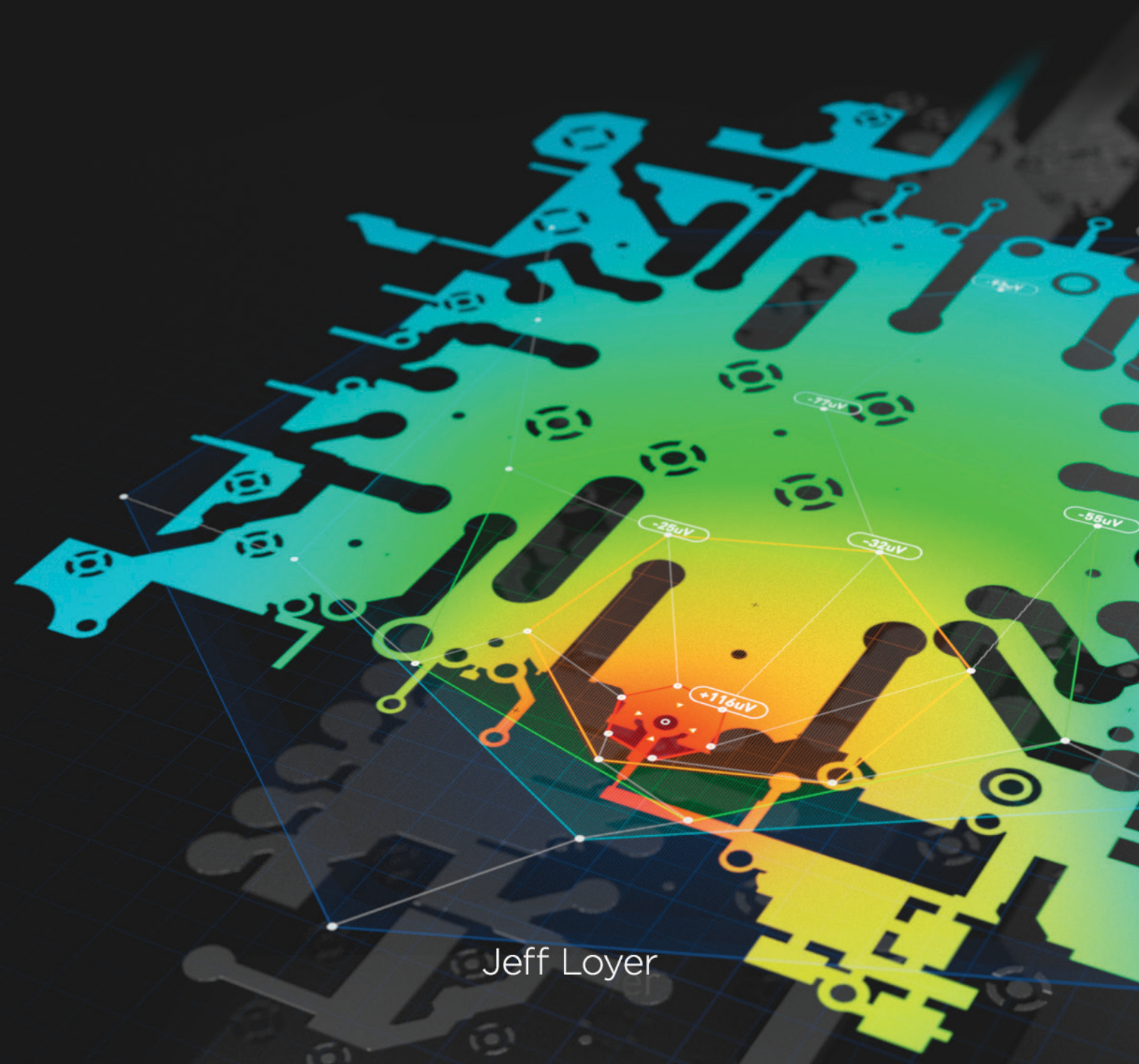


Altium[®]

**DC-Analyse eines PDN:
Für den digitalen Designer
unverzichtbar**



Jeff Loyer

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

EINLEITUNG

Die DC-Analyse eines Spannungsversorgungsnetzes („PDN“), auch als „Spannungsabfall“, „DC-Stromversorgungsintegrität“ oder als „PI-DC“ bezeichnet, beantwortet einige grundlegende Fragen, die sich jeder digitale (oder analoge) Designer stellen und beantworten sollte:

- Habe ich genug Metall zwischen meinen Quellen und Verbrauchern bereitgestellt, um jedem Verbraucher genügend Spannung zuzuführen?
 - Reichen die Stromversorgungs- und Massestrukturen aus?
 - Gibt es genügend Vias und sind sie groß genug?
- Kann ich meine PDN-Formen auf intelligente Weise optimieren?
- Welcher Teil meines Designs wird am ehesten überhitzen?
- Habe ich mit meinen Massestrukturen ansprechend entworfen?

Viele digitale Designer sind sich der Notwendigkeit einer genauen Analyse der Signalintegrität bewusst oder sie wissen, wie wesentlich ein Verständnis des AC-Aspekts des PDN ist (zum Beispiel „wie viele Glättungskondensatoren brauche ich?“), ohne jedoch die DC-PDN („PI-DC“-)Analyse zu berücksichtigen. Die PI-DC-Analyse ist jedoch ebenfalls von Bedeutung, da sie einen wichtigen Einblick in die Qualität eines Designs vermittelt, wertvolle Designflächen und -lagen spart und so ein kostengünstiges digitales Design gewährleistet. Die grundlegende Frage, die die Analyse beantwortet, ist relativ einfach: Habe ich genügend Metall (in unserem Fall fast ausschließlich Kupfer) zwischen meiner Stromquelle und allen Verbrauchern bereitgestellt, um diesen Verbrauchern ausreichend Strom zuzuführen? In der heutigen Welt der kleinen, integrierten Designs kann die genaue Beantwortung dieser Frage den Unterschied zwischen Erfolg und Misserfolg bedeuten.

Vor nicht allzu langer Zeit wurde das digitale Design von großen Formfaktoren dominiert – zu Beispiel von Desktop-PCs und großen Servern. In jenen Designs konnten ganze Metalllagen der Stromversorgung zugeordnet werden, um einen minimalen Spannungsabfall zwischen Quelle und Verbraucher sicherzustellen. Mit konservativen Faustregeln konnte man abschätzen, wie viel Metall benötigt wurde, ohne dass dies Konsequenzen hatte, wenn mehr als eine Fläche für die Stromversorgung vorgesehen war. Ein digitaler Designer achtete nur darauf, dass die DC-Stromversorgung „angemessen“ war und dachte nicht daran, die Stromversorgungsstrukturen zu optimieren, um Fläche und Lagen zu minimieren.

Aber diese Zeiten sind vorbei. Selbst Serverdesigns werden immer dichter und die Leiterplattenfläche ist ein höchst knappes Gut. Man darf sie also nicht mit übermäßig konservativen Designpraktiken vergeuden. Alles Metall in der Energieverteilung muss wirklich nötig sein. Wir haben also nicht den Luxus, weitere Lagen hinzuzufügen oder die Leiterplatte größer zu machen. Die PI-DC-Analyse bietet eine ausgeklügelte Methode um sicherzustellen, dass das Metall für die Stromversorgung nicht nur ausreichend sondern auch notwendig ist.

VOM PI-DC-WERKZEUG BEREITGESTELLTE DATEN

Die ersten Daten, die das PI-DC-Werkzeug liefert, ist der Spannungsabfall von der Quelle zu den Verbrauchern aufgrund der Widerstandsfähigkeit des Stromnetzes. Wir können nicht länger davon ausgehen, dass er aufgrund einer unbegrenzt großen Stromversorgungs-„Fläche“ Null ist. Wenn wir Designs verkleinern, gilt das Konzept der Stromversorgungsflächen womöglich nicht. Auch wenn wir eine Fläche haben, die primär der Stromversorgung gewidmet ist, wird diese Fläche möglicherweise in viele Teilbereiche (Netze) unterteilt, die um das Design herum einzigartige Spannungen liefern. PI-DC zeigt uns, wie viel Spannungsabfall in den einzelnen Netzen induziert wird, sodass wir jedem Spannungsnetz die richtige Fläche zuweisen können. Abbildung 1 zeigt ein typisches 3-D-Spannungsdiagramm einer 1,8 V-Stromstruktur von der Quelle (U4, ein VRM) zum Verbraucher (U1, ein FPGA) entlang ihres 2-Lagen-Pfads (Vias sind in dieser Ansicht ausgeblendet). Eine sorgfältige Überprüfung des Spannungsdiagramms würde ergeben:

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

- Nur 10 mV Spannungsabfall zwischen U4 (1,7 V wurde vom nominalen 1,8 V um 5 % herabgesetzt) und U1 (1,69 V).
- Die eine Leiterbahn von U4 zum FPGA-Spannungsring ist die größte Spannungsabfallquelle.
- Einige Vias weisen einen Spannungsabfall auf – die Farbe des Netzes am oberen Teil einiger Vias unterscheidet sich von der Farbe am unteren Teil.
- Zwischen der Quelle und dem Glättungskondensator, C3, gibt es erwartungsgemäß keinen DC-Spannungsabfall. Kondensatoren werden für die DC-Analyse als „offen“ behandelt.

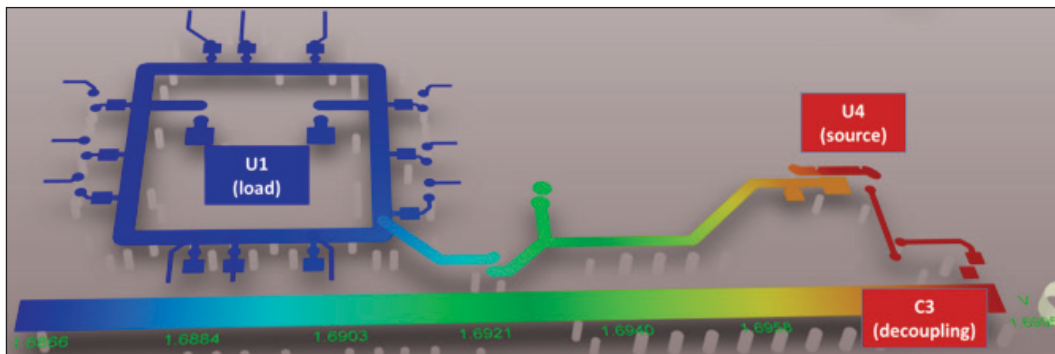


Abbildung 1: Spannungsdiagramm von der Stromquelle (U4) zu einem einzelnen Verbraucher (U1, ein FPGA)

Ein PI-DC-Werkzeug meldet auch die aktuellen Stromdichten („J“) innerhalb der betreffenden Strukturen, sodass sich der Designer darauf konzentrieren kann, bei Bedarf Korrekturen an den Bereichen mit der höchsten Stromdichte („Klemmpunkte“) mit J_{max} anzubringen. Beachten Sie, dass dieses Diagramm bestätigt, was wir aus dem Spannungsdiagramm geschlossen haben. Vielleicht stellt es dies für gewisse Überlegungen auf einfachere Weise dar. Leider muss normalerweise kein bestimmter Schwellenwert als Grenze für die Stromdichte festgelegt werden, sodass häufig nur relative Werte verwendet werden. Die thermische Leistung hängt nicht nur von der Stromdichte ab, sondern auch von der Wärmeableitung des Systems und sogar vom Querschnitt der Struktur, wie von Doug Brooks und Johannes Adam in ihrer Arbeit „Trace Currents and Temperatures Revisited“ (Doug Brooks, nd) beschrieben ist.

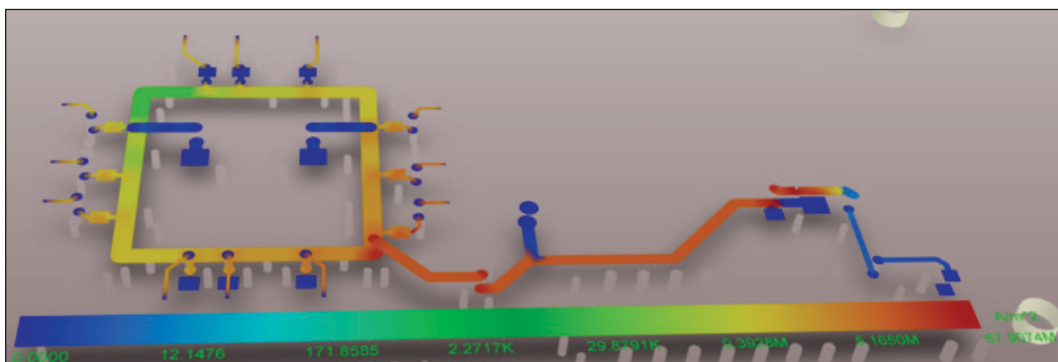


Abbildung 2: Stromdichtediagramm des Stromnetzes zwischen der Quelle (U4) und einem einzigen Verbraucher (U1, ein FPGA)

Ohne ein PI-DC-Werkzeug wird der Designer wahrscheinlich herkömmliche Regeln anwenden, die eine bestimmte Breite vorgeben, basierend auf dem Strom, den die Stromversorgungsstruktur trägt. Bei diesem Ansatz gibt es mindestens zwei Probleme :

- 1) Die Verwendung der gleichen Mindestbreite, unabhängig von der Distanz zwischen der Quelle und den Verbrauchern, ist häufig nicht sinnvoll – Sie verwenden auch nicht dieselbe Kabelstärke für ein Verlängerungskabel von 10 oder 100 Metern.
- 2) Wenn die gleiche Breite über die gesamte Länge der Struktur verwendet wird, wird dadurch nicht nur Leiterplattenfläche verschwendet, sondern es stellt auch nicht das effizienteste Design der Stromversorgungsstruktur dar.

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

Die Ergebnisse eines PI-DC-Werkzeugs ermöglichen Designern, die Größe ihrer Stromversorgungsstruktur je nach der Länge richtig einzustellen, die Struktur für kurze Distanzen nach Bedarf zu verengen und die Struktur zu erweitern, wenn mehr Leiterplattenfläche zur Verfügung steht. Ein PI-DC-Werkzeug ist für das Ermitteln der optimalen Struktur des Stromversorgungsnetzes entscheidend.

Auch kann heutzutage nicht mehr angenommen werden, dass Massestrukturen unendlich sind – die modernen Designs schränken den für die Massefläche verfügbaren Bereich ein. Diese Einschränkungen für die Massefläche können zu erheblichen Spannungsniveaus an der „Masse“ führen. Wir können nicht mehr davon ausgehen, dass sie Null sind. Zudem ist das Problem der Spannung an der Masse komplexer als bei Stromnetzen – die tatsächliche Spannung an jedem Punkt auf dem Massenetz ist eine Überlagerung der Spannungen, die durch die Ströme aus den verschiedenen Stromnetzen induziert werden. Zum Beispiel kann bei einem Design sowohl 1,8 V als auch 3,3 V an ein Gerät geliefert werden. Obwohl die Spannungen auf den zwei Stromnetzen theoretisch unabhängig sind, stellt das Gerät an seinen Masse-Pins eine Spannung fest, die aus der Summe der von den 1,8 V- und 3,3 V-Strömen induzierten Spannungen besteht. Es ist wichtig, diese Beziehung genau zu verstehen und zu modellieren. Die gute Nachricht ist, dass für Gleichstrom die Überlagerung ziemlich einfach ist und die bloße Addition (oder Subtraktion für Lieferungen mit entgegengesetzten Polaritäten) ausreichend ist. Ein Designer muss sich jedoch darüber im Klaren sein, dass die Massestrukturengröße an jedem Punkt Ströme aus mehreren Quellen aufnehmen muss, wohingegen die Stromstrukturengrößen einfacher sind.

Ein PI-DC-Werkzeug sollte in der Lage sein, die DC-Spannung für ein Gerät bereitzustellen unter Verwendung der Massespannung dieses Geräts als Referenzspannung. Die Spannung relativ zu einem willkürlichen „Masse“-Punkt (wie der Spannungsquelle) ist oft bedeutungslos. Die Ströme in der Massestruktur können eine bedeutende Spannung am Massenetz verursachen und dies muss in der DC-Analyse des Stromversorgungsnetzes berücksichtigt werden.

Ein PI-DC-Werkzeug vermittelt auch wertvolle Informationen über die Anzahl und Größe der Vias, die für die Stromversorgung benötigt werden. Obwohl dies eine unbedeutende Aufgabe zu sein scheint, verbrauchen Power Vias wertvollen Platz auf allen Lagen und blockieren das Routing auf Lagen über und unter ihren zugewiesenen Versorgungslagen. Die Verwendung von zu vielen oder extrem großen Vias ist ein Luxus, den sich die modernen Designs nicht leisten können. Ein besonders ironisches Ergebnis der übermäßig konservativen Zuweisung der Stromversorgungs-Vias ist die Tatsache, dass jene Vias womöglich eine andere Strom- oder Massefläche durchdringen und mehr Probleme verursachen als sie lösen.

VERSTEHEN DER TEMPERATURAUSWIRKUNGEN

Was die meisten PI-DC-Werkzeuge nicht direkt liefern, sind die thermischen Auswirkungen des Stroms – wie stark er das Metall erwärmt. Dies kann in Anbetracht der I²R-Beziehung zwischen Strom und Leistung kritisch sein – selbst ein kleiner Widerstand kann bei hohem Strom große Energiemengen ableiten, was zu lokalen Hotspots und damit verbundenen Fehlern der dielektrischen Materialien oder Leitern führt. PI-DC-Werkzeuge liefern jedoch Informationen über die Stromdichte und Massestrukturen, damit Designer eine Optimierung für eine niedrige Stromdichte und damit eine geringerer Energieableitung durchführen können.

IPC-Spezifikationen 2152 (vormals 2221) bietet eine Orientierung zur Fehlervermeidung mithilfe von Leiterbahn-Mindestbreiten für akzeptable Temperaturanstiege. Leiterplattendesigner missbrauchen dies häufig. Sie geben sehr konservative Temperaturanstiegswerte (z. B. 1 °C) ein und verwenden dann die entsprechende Leiterbahnbreite als Mindestbreite für die gesamte PDN-Struktur von der Quelle bis zu allen Verbrauchern. Wenn Designer Spezifikationen auf diese Weise anwenden, werden sie gezwungen, der Stromversorgung mehr Fläche als erforderlich zuzuweisen und verbrauchen so wertvolle Designfläche oder benötigen mehr Lagen für das Design. Um ein möglichst effizientes Stromversorgungsdesign zu erstellen, muss IPC-2152 gut verstanden und nicht blind angewendet werden. Designer, die die Spezifikationen durchdacht anwenden und zudem die Informationen, die ein PI-DC-Werkzeug bietet, nutzen, können den PDN-Bereich reduzieren und gleichzeitig ein sicheres Design gewährleisten.

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

Anstatt einen willkürlich niedrigen zulässigen Temperaturanstiegswert bei der Anwendung von IPC-2152 zu verwenden, sollte der Digitaldesigner einen Wert für einen Temperaturanstieg verwenden, den das dielektrische Material und Metall aufnehmen kann, ohne beschädigt zu werden oder fehzuschlagen. Beispiel: Abbildung 3 zeigt, wie ein Temperaturanstieg von 45 °C anstelle von nur 1 °C dem Designer ermöglicht, die minimale Leiterbahnbreite von 0,3 Zoll (rot) auf nur 0,02 Zoll (blau) für einen Strom von 2 A auf 1 Unze Kupfer zu reduzieren. Mit einem PI-DC-Werkzeug kann dann sichergestellt werden, dass die Spannungsanforderungen aller Verbraucher bei Anwendung dieser Mindestbreite erfüllt werden werden.

Leider ist das thermische Problem sehr kompliziert, und selbst wenn ein thermisches Simulationswerkzeug angewendet wird, führt dies aufgrund der Komplexität des Problems nur zu begrenzten Erkenntnissen¹. Für eine genaue Antwort sind genaue Modelle für die Vielzahl von Komponenten erforderlich, die zur thermischen Leistung des Systems beitragen, unter anderem PCB-Material, Anzahl der Lagen, Kupferdichte, Wärmezeugung und Wärmeableitung der verschiedenen Komponenten, Luftströmung um das Design herum, Umgebungsbedingungen usw. Ein digitaler Designer wird im Allgemeinen gezwungen sein, konservativ zu sein, sollte jedoch einige kritische Aspekte im Zusammenhang mit thermischen Auswirkungen berücksichtigen:

- Nicht alle Designs sind thermisch gleich. Ein Design, das sich in einer kühlen Umgebung mit Komponenten mit geringem Stromverbrauch befindet, sollte weniger Aufwand für thermische Auswirkungen erfordern als ein Design, das viel Strom verbraucht und sich in einem sehr heißen Gehäuse befindet.
- Nicht alle Bereiche in einem Design sind thermisch gleich. Besondere Vorsicht ist geboten, wenn die Wärmeableitung am geringsten ist – zum Beispiel in den Außenlagen und unter oder in der Nähe sehr heißer Komponenten. Bereiche, die von den heißen Komponenten weit entfernt sind, sind in der Regel weniger thermischen Auswirkungen ausgesetzt, da die Energie besser abgeleitet wird. Die Speisung eines Strom fressenden Geräts mit schmalen Leiterbahnen durch sein Breakout ist ein Rezept für eine Katastrophe.
- Wie stark erhöht sich die Stromdichte? Erwärmung ist eine Funktion der von der Struktur verbrauchten Energie, proportional zu IR^2 . Bei den Stromdichtediagrammen ist besondere Vorsicht geboten und Kupfer sollte an Stellen mit maximaler Stromdichte hinzugefügt werden. Wie bereits erwähnt, ist es wahrscheinlich nicht möglich, einen Grenzwert für die „maximale Stromdichte“ festzulegen, da die thermischen Auswirkungen von vielen anderen Faktoren abhängen. Mit dem PI-DC-Werkzeug können Designer jedoch die wahrscheinlichsten Problembereiche hervorheben und die relative „Qualität“ der Designbereiche abschätzen.
- Liegt die Struktur auf Außen- oder Innenlagen? IPC-2152-Daten weisen darauf hin, dass Innenlagen (Streifenleitungen) Wärme leichter ableiten als Mikrostreifenlagen (dies hängt jedoch womöglich von der Menge des Luftstroms auf der Leiterbahn ab, die die Konvektionskühlung erhöht – es kann einige Mikrostreifen-Leiterbahnen geben, die Wärme gut ableiten).
- Thermische Anforderungen hängen stark von dem verwendeten Material ab. Flex-Designs (insbesondere solche, die aktiv flexibel sind) sind in der Regel weniger temperaturbeständig als feste Leiterplatten.
- Befindet sich relativ kühles Kupfer in der Nähe, das die Wärme besser ableitet als die dielektrischen Materialien?

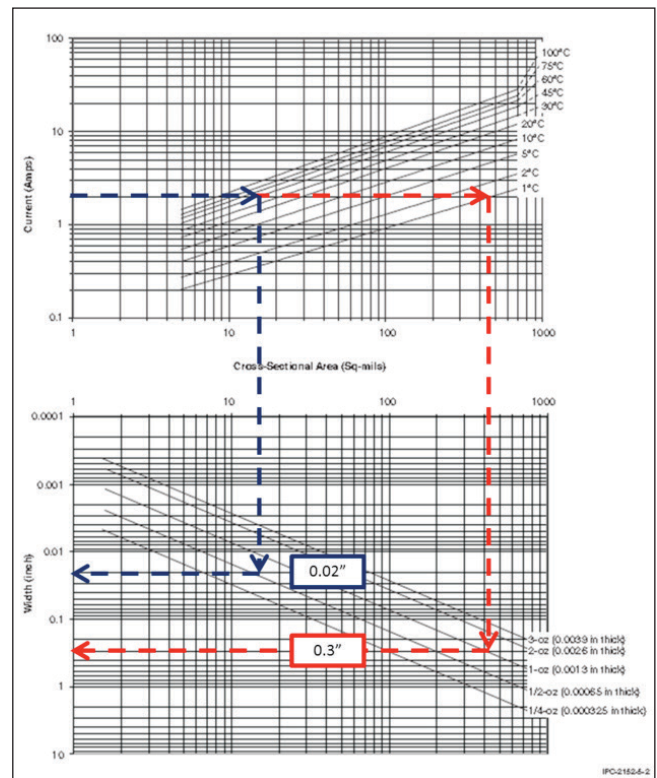


Abbildung 3: Reduzierung der Leiterbahnbreite von 0,3 Zoll auf 0,02 Zoll mit IPC-2152

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

VERMEIDUNG VON PI-DC GIGO („MÜLL REIN, MÜLL RAUS“)

Das PI-DC-Werkzeug muss natürlich genaue Ergebnisse liefern, wenn es nützlich sein soll. Die Genauigkeit des Werkzeugs hängt nicht nur von der verwendeten hochentwickelten 2D- oder 3D-Modellierungs-Engine ab, sondern auch von den in die Simulation eingegebenen Annahmen. Alle, die diese Werkzeuge verwenden, müssen unbedingt mit den wichtigen Annahmen und Parametern, die in das Werkzeug eingegeben werden, vertraut sein.

Der erste Parameter, der richtig eingestellt werden muss, ist die Leitfähigkeit des im Design verwendeten Metalls. Dies scheint zwar einfach zu sein, ist jedoch weitaus komplizierter als die meisten Benutzer annehmen. Die meisten Strom- und Signalintegritätswerkzeuge gehen beispielsweise davon aus, dass Leiterplatten (PCBs) „Kupfer“ als Metall mit einer Leitfähigkeit von $5,88e7S / m$ verwenden. Aus den Industriedaten^{2,3} geht jedoch hervor, dass das in Leiterplatten verwendete galvanisch abgeschiedene „Kupfer“ mit nur $4,7e7S / m$ bei 25 °C deutlich weniger leitfähig ist als reines Kupfer. Wenn Validierungs- und Simulationsergebnisse abweichen, sollte die Leitfähigkeit des Metalls überprüft werden.

Diese Leitfähigkeit muss auch an die tatsächliche Betriebstemperatur des Designs angepasst werden. Die Leitfähigkeit von Kupfer sinkt beispielsweise mit jedem Grad Celsius um 0,4 %. Das Metall eines Kupferdesigns, das bei 125 °C arbeitet, ist 40 % weniger leitfähig als bei einem Wert von 25 °C. Der Unterschied muss in der Simulation berücksichtigt werden. Es nützt nichts, eine hochentwickelte Simulations-Engine zu haben, wenn sie mit fehlerhaften Annahmen arbeitet. (Hinweis: Bei Designs, die bei extrem niedrigen oder hohen Temperaturen arbeiten, muss auch die Linearität des Temperaturkoeffizienten von 0,4 % / °C für die erwarteten Bereiche geprüft werden.

Eine andere grundlegende Hypothese, die leicht falsch verstanden wird, ist die Größe der Vias. Viele PCB-Designwerkzeuge verwenden nur einen einzigen Wert, um die Größe eines bestimmten Via darzustellen und was diese Zahl darstellt, ist unklar. Im Allgemeinen wird angenommen, dass Vias durchgezogene Säulen sind. Das ist jedoch oft nicht der Fall. Sie sind möglicherweise nicht vollständig gefüllt und können deshalb hohle Säulen mit Innen- und Außendurchmessern sein (I.D. bzw. O.D.). Die tatsächliche Querschnittsfläche der Via hängt von beiden Abmessungen ab – ein großer aber sehr hohler Zylinder kann eine kleinere Querschnittsfläche haben als ein gefüllter kleiner Zylinder. Bei Vias, die normalerweise für die Stromversorgung verwendet werden, gehen die meisten Benutzer davon aus, dass der eine Wert, der für die Via angegeben wird, die Bohrergröße (Außendurchmesser) darstellt. Es wird angenommen, dass die Via vollständig gefüllt ist oder am besten durch eine durchgezogene Säule dargestellt wird. Diese Annahme ist möglicherweise nicht richtig und gibt fehlerhafte Ergebnisse.

Um die richtige Modellierung der Vias genau zu verstehen, muss der Benutzer wissen, wie die Abmessungen der Via bestimmt werden und wie die tatsächliche Implementierung dieser Spezifikationen aussehen wird (wie sieht die Via im Querschnitt aus?). Die meisten Werkzeuge erlauben es dem Benutzer nicht, sowohl einen Innen- als auch einen Außendurchmesser anzugeben und lassen nur durchgezogene Vias zu. Wenn dies der Fall ist und es bekannt ist, dass die Vias in der tatsächlichen Implementierung hohl sind, muss der Außendurchmesser der Via angepasst werden, um die Querschnittsfläche richtig darzustellen. Glücklicherweise ist das Auffinden des richtigen Durchmessers für eine durchgezogene Säule, die dieselbe Querschnittsfläche wie eine hohle Säule mit einem Außendurchmesser und einem Innendurchmesser hat, eine triviale mathematische Aufgabe – dies ist lediglich der Unterschied zwischen den beiden, Außendurchmesser minus Innendurchmesser. Die Herausforderung besteht darin, die Vias bei der Simulation richtig zu skalieren, ohne dass dies unbeabsichtigte Konsequenzen für das physische Design hat.

Wenn die Außenlagen der Leiterplatte für die Stromversorgung verwendet werden, ist die Modellierung besonders problematisch. Die Dicke des Kupfers auf den Außenlagen der Leiterplatte hängt von der Plattierungsdichte ab und kann auf der gesamten Leiterplatte erheblich variieren. Messen Sie unbedingt die Dicke der Außenlagen, wenn sie für die Stromversorgung verwendet werden und die Simulationsergebnisse nicht mit den Labormessungen übereinstimmen.

¹ Doug Brooks, Johannes Adam. Articles on Trace Current/Temperature/Power/Resistance. In UltraCAD: http://ultracad.com/article_temperature.htm

² Loyer, Kunze, Burkhardt. Accurate Insertion Loss and Impedance Modeling of PCB Traces. DesignCon 2013. San Jose, CA.

³ Loyer, Kunze. Humidity and Temperature Effects on PCB Insertion Loss. DesignCon 2013. San Jose, CA.

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

Die korrekte Darstellung der Verbraucher scheint einfach zu sein, ist es aber nicht. Designer könnten annehmen, dass für einen passiven Verbraucher wie einen Widerstand oder eine Diode der Verbraucher am besten als Widerstand modelliert wird und dass aktive Komponenten wie FPGAs als Stromsenken modelliert werden. Wenn Designer die aktiven Komponenten als Stromsenken modellieren, dann könnten sie versucht sein, den Maximalstrom (I_{max}) als Stromaufnahme zu verwenden. Wenn PI-DC-Simulationen verwendet werden, um den Spannungsabfall des PDN zu messen, ist dies schwer zu rechtfertigen und kann zu übermäßig pessimistischen Ergebnissen führen. Die maximale Stromaufnahme tritt wahrscheinlich nur dann auf, wenn maximale Spannung (V_{max}) angewendet wird. Wir simulieren normalerweise an den unteren Grenzen des Spannungsbereichs und die Stromaufnahme sollte dies widerspiegeln, damit wir genaue Simulationsergebnisse erhalten. Ein sinnvollerer Modell für einen aktiven Verbraucher während Spannungsabfallsimulationen könnte stattdessen ein Widerstand sein, dessen Wert eine Funktion der Nennspannung und des Nennstroms des Geräts ist, V_{nom}/I_{nom} . Andererseits haben einige Designer womöglich maximale Stromdichtewerte, die sie aus thermischen Erwägungen vermeiden möchten (anstelle von minimalen Spannungswerten aus elektrischen Erwägungen). Für Simulationen der maximalen Stromdichte mithilfe von PI-DC (für thermische Erwägungen) sollten wahrscheinlich V_{max} für Quellen, R_{min} für passive Verbraucher und I_{max} für aktive Verbraucher verwendet werden. Dies gibt eine genauere Darstellung möglicher Maximalströme.

Bei der Verwendung eines PI-DC-Werkzeugs müssen Sie alle inhärenten Annahmen, die in die Simulation eingegeben wurden, verstehen und überprüfen, ob sie korrekt sind. Andernfalls sind die Ergebnisse möglicherweise bedeutungslos.

ÜBERPRÜFUNG DER ERGEBNISSE

Es ist wichtig, dass jedes Design richtig überprüft wird, um die Genauigkeit der Simulation und der eingegebenen Parameter sicherzustellen. Glücklicherweise ist dies für das PI-DC-Werkzeug recht einfach. Die Spannung der einzelnen Verbraucher kann normalerweise leicht gemessen werden, auch unter Verwendung einer örtlichen Masse als Referenz. Die vielleicht schwierigsten Aspekte sind: 1) ein Mittel zu finden um sicherzustellen, dass alle Verbraucher bei der Durchführung der Messungen ihre maximale Leistung verbrauchen, wenn die Spannung auf der Massestruktur ein wesentlicher Faktor sein könnte und 2) die thermischen Auswirkungen auf den spezifischen Widerstand richtig zu verstehen. Eine Überlagerung kann erforderlich sein, wenn es nicht zweckmäßig ist, alle Verbraucher gleichzeitig an ihren Grenzen zu belasten. In diesem Fall besteht die Herausforderung darin, die Spannung auf „Masse“ bei jedem Verbraucher zu messen, relativ zur gleichen Referenz, die in den Simulationen verwendet wurde. Für den thermischen Aspekt ist es erforderlich, einen Begriff von der aktuellen Temperatur der Energiestrukturen zu haben, um die korrekte Metallleitfähigkeit zu berechnen, die in Abhängigkeit von der Temperatur variiert. Dafür sind Instrumente erforderlich, die normalerweise in den meisten Laboren fehlen, unter anderem Thermoelemente, Infrarot-Thermometer oder IR-Temperatursensoren.

Wenn die gemessenen Spannungen nicht mit den Simulationen übereinstimmen, müssen alle Annahmen und Ergebnisse der Simulation überprüft werden. Wir haben versucht, genügend Informationen zu vermitteln, um die richtigen Annahmen zu gewährleisten. Aber wie können die Ergebnisse überprüft werden? Die grundlegendsten Daten, die ein PI-DC-Werkzeug korrekt bestimmen muss, sind der Widerstand zwischen Quelle und Verbraucher, die normalerweise nicht direkt angegeben werden. Es ist jedoch ziemlich einfach, eine Testschaltung zu erstellen, die einen Wert liefert, den Sie mit einer tatsächlichen Ohmmeter-Messung eines unbestückten Designs vergleichen können. Wenn die Quelle als 0-V-Batterie und der Verbraucher als eine 1-A-Stromsenke modelliert ist, repräsentiert die Spannung am Verbraucher direkt den Widerstand zwischen der Quelle und dem Verbraucher (ignorieren Sie das Vorzeichen der Spannung). Das Beispiel unten (Abbildung 4) zeigt die Ergebnisse der Ermittlung des Widerstands zwischen der Quelle (U4 Pin 2 für Strom, J1 Pins 2 & 3 für Masse) und dem Verbraucher (U1) mithilfe eines PI-DC-Simulators.

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

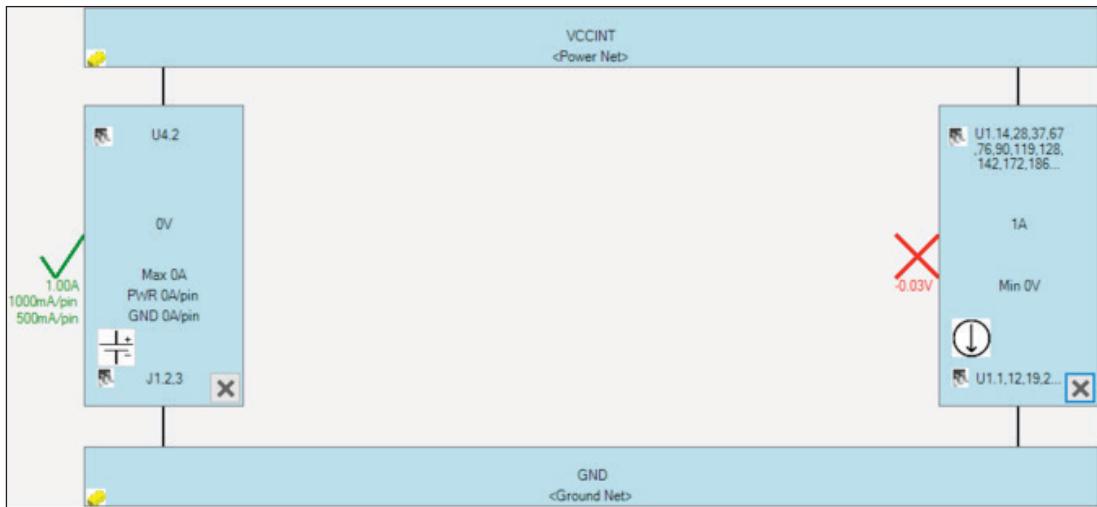


Abbildung 4: PI-DC-Setup für die Messung des Widerstands (1V = 1Ω)

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Widerstand von 30 mΩ im PDN für U1 besteht (beachten Sie die 30 mV bei U1 in **Abbildung 4**, dargestellt als „-0,03 V“). Um dies im Labor zu bestätigen, platzieren Sie einen 0-Ohm-„Kurzschluss“ zwischen U4 Pin 2 und J1 Pins 2 & 3 (z. B. ein großes Stück Metall), und messen den Widerstand zwischen den Stromversorgungs- und Masse-Pins von U1. Ein anderer Wert als 30 mΩ zeigt einen Fehler in der Simulation. (Möglicherweise müssen Sie spezielle Techniken wie Vierleitermessungen verwenden, um diese niedrigen Widerstände zu messen).

Wenn Sie zwischen dem Widerstand der Strom- und Masseflächen unterscheiden müssen, können Sie dazu in diesem Testschaltkreis die Spannung auf beiden analysieren. Hinweis: In **Abbildung 5** sind 27 mΩ auf der Stromstruktur (dunkelblau bedeutet 27 mV, = 27 mΩ) und in **Abbildung 6** sind 3 mΩ auf der Massestruktur (rot dargestellt).

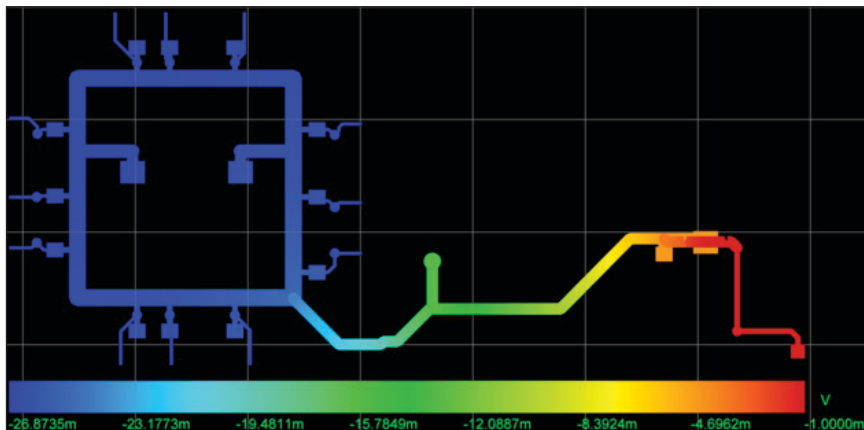


Abbildung 5: Spannungsdiagramm der Stromstruktur – Ergebnisse der Widerstandsmessung (1 V = 1 Ω)

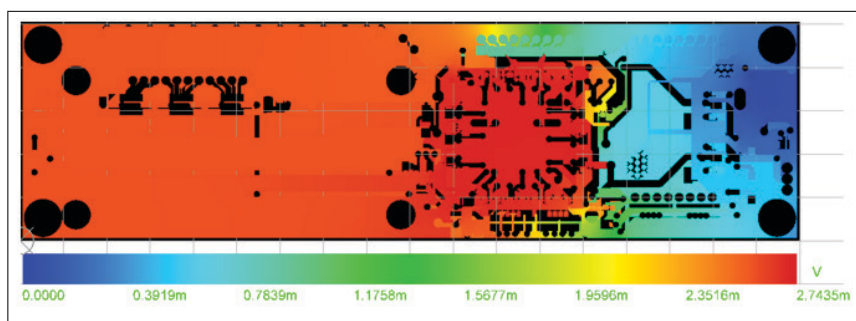


Abbildung 6: Spannungsdiagramm der Massestruktur – Ergebnisse der Widerstandsmessung (1 V = 1 Ω)

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

Ein kritischerer Faktor, den Sie während der Überprüfung berücksichtigen müssen, ist der Unterschied im Widerstand aufgrund der Temperatur. Der Widerstand von Kupfer steigt normalerweise um etwas 0,4 % pro Grad Celsius. Der Widerstand eines PDN kann bei einem Design, das bei 75 °C ausgeführt wird, um 20 % steigen im Vergleich mit der Raumtemperatur von 25 °C. Dies kann auch von Vorteil sein. Wenn die Spannung eines Systems die Erwartungen erfüllt, wenn es unter Vollast heiß läuft, kann der Designer sicher sein, dass das Kupfer nicht viel heißer als erwartet ist, wodurch das Risiko eines katastrophalen Ausfalls aufgrund unerwarteter Temperaturen in dieser Struktur verringert wird.

ANDERE PI-DC-ERGEBNISSE

Ausführen von PI-DC für Designs kann auch viele Unzulänglichkeiten aufdecken, die ansonsten nicht offensichtlich wären. Das Auftragen der Stromdichte der Stromversorgungs- und Massestrukturen macht beispielsweise „Halbinseln“ und „Inseln“ dieser Strukturen leicht sichtbar. **Abbildung 7** zeigt die Stromdichtediagramme eines 2-Lagendesigns nach dem Ausführen von PI-DC. Beachten Sie die dunkelblaue „Halbinsel“ in der oberen Lage und die „Insel“ in der unteren Lage. Diese einzigartige PI-DC-Ansicht hebt Aspekte des Designs hervor, die ansonsten nicht erkennbar sind. Hinweis: Sie müssen sich genau überlegen, ob eine Struktur, die für das PI-DC einer bestimmten Spannung nicht verwendet wird, auch sonst nicht benötigt wird. Diese Struktur wird möglicherweise für eine andere Spannung oder für die AC-Stromversorgung (an Kondensatoren angeschlossen) verwendet. Wenn während einer PI-DC-Simulation kleine Widerstände anstelle der Kondensatoren eingesetzt werden und die entsprechende Stromverteilung überprüft wird, kann ein Designer feststellen, ob eine Insel oder Halbinsel in einer Stromversorgungsstruktur für die AC-Stromversorgung verwendet wird. (Beachten Sie, dass die DC-Stromergebnisse für diese Simulation ungültig sind.) „Strominseln“ und „Halbinseln“ sind insofern besonders problematisch, als sie spezifische Resonanzfrequenzen haben und möglicherweise nur dann Fehler verursachen, wenn bestimmte Bedingungen vorliegen. Die Fehler können zufällig auftreten und sind daher äußerst schwer zu beheben – ein Rezept für eine verzögerte Validierung.

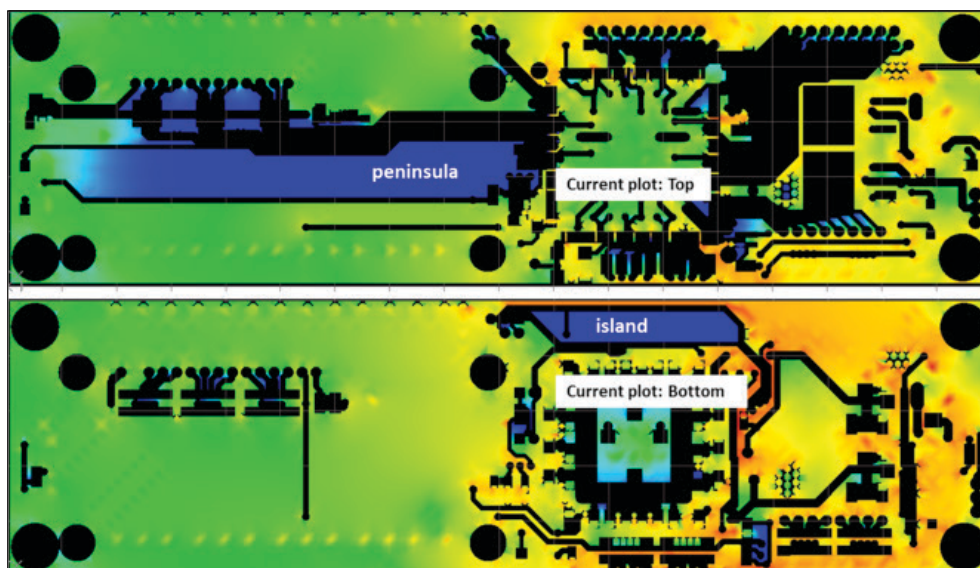


Abbildung 7: Stromdichtediagramme der Massestruktur mit „Halbinseln“ und „Inseln“

Die Stromdichte- und Spannungsdiagramme der Strom- und Massestrukturen können auch Probleme bei dem Design aufzeigen, wenn es darum geht, Strom effizient zwischen Stromquelle und Verbraucher(n) zu leiten. Das Spannungsdiagramm auf der oberen Massestruktur in **Abbildung 8** verdeutlicht die Ineffizienz der Pfade zwischen den Quellen (den Spannungsreglern oder VRs) und dem Verbraucher (FPGA). Es mag triftige Gründe dafür geben, dass zwischen den VRs und FPGA kein direkter Pfad besteht, aber das PI-DC hebt die Ineffizienzen hervor, damit sie nach Möglichkeit behoben werden können. Hinweis: Diese Struktur ist für die AC-Stromversorgung problematisch, weil sie möglicherweise eine übermäßige Induktivität im Massepfad und einen entsprechenden „Ground-Bounce“ hervorruft (die Induktivität nimmt mit dem Schleifenbereich zu).

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

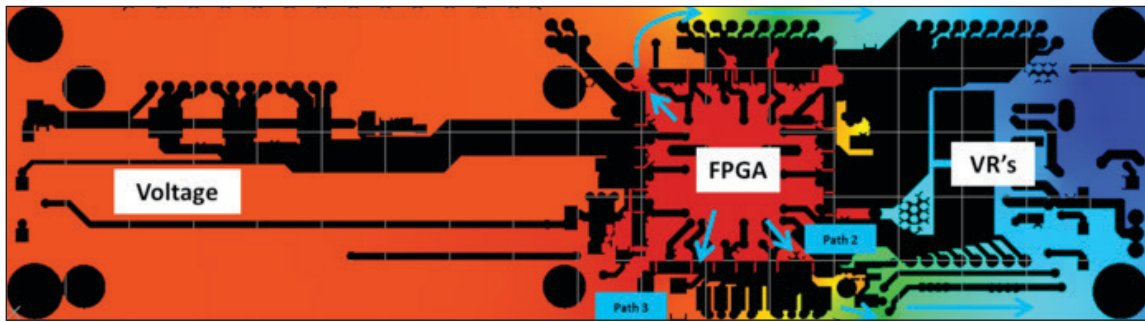


Abbildung 8: Spannungsdiagramm der Massestruktur zeigt die Rückstrompfade

Der Designer muss natürlich die Massestrukturen auch im Zusammenhang mit ihrer Verwendung als Rückweg für Hochgeschwindigkeitssignale betrachten, die sich nicht mit ihrer Funktion als DC-Rückweg überschneiden dürfen. Massestrukturen (und auch gewisse Stromstrukturen), die für die DC-Stromverteilung nicht erforderlich erscheinen, können für die Signalintegrität von entscheidender Bedeutung sein. Aber selbst in diesem Zusammenhang sollten „Inseln“ und „Halbinseln“ vermieden und nur entworfen werden, wenn keine andere Option besteht. PI-DC hebt diese unerwünschten Strukturen an ihrer Position oft gut hervor.

Ein weiteres Beispiel, in dem ein PI-DC-Stromdichtediagramm sehr aussagekräftig sein kann, ist in **Abbildung 9**. In diesem Beispiel ist ein kleiner Bruch in einer Massefläche sehr offensichtlich – die Farbe der Stromdichte ändert sich beim Bruch abrupt von grün zu blau. Dies macht einen großen Unterschied in der DC-Stromversorgung dieser Struktur. Es ist zweifelhaft, ob das Problem ohne die Verwendung dieser PI-DC-Ergebnisansicht erkannt werden würde.

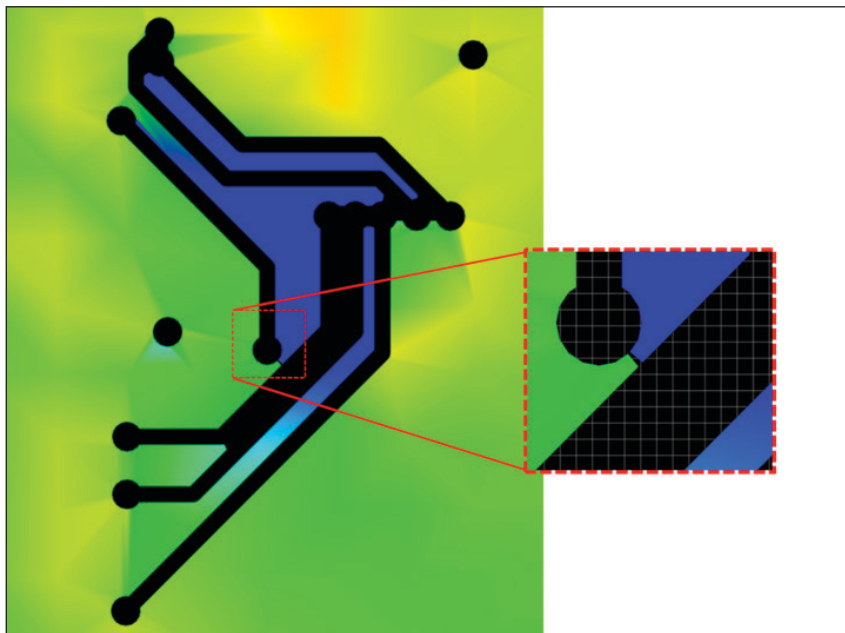


Abbildung 9: Kleine Unterbrechung in einer Massefläche im PI-DC-Stromdichtediagramm

Einige nicht intuitive Aspekte von PI-DC sind erwähnenswert. Der DC-Widerstand eines Pfads hängt nicht nur von der Breite des Pfads ab, sondern auch von der Länge. Ein DC-Pfad kann schmal sein, wenn er nicht zu lang ist, ohne dass die Leistungsabgabe wesentlich beeinträchtigt wird. Zum Beispiel haben die Pfade (b) und (d) in **Abbildung 10** den gleichen Widerstand. Um den DC-Widerstand von Strukturen zu verstehen, ist das Konzept der „Quadrate“ nützlich, wie in **Abbildung 10** dargestellt ist. Dies gibt dem Designer Flexibilität – er oder sie kann möglicherweise einen DC-Pfad auf eine schmale Breite beschränken, wenn er nur eine kurze Strecke lang ist, und eine möglichst große Verbreiterung des Pfads in weiten, offenen Bereichen gleicht die erforderlichen Einschränkungen aus. Die Verwendung der gleichen Breite für ein Stromversorgungsnetz auf seiner gesamten Länge ist ineffizient, bietet nicht die beste verfügbare Stromversorgung und verwendet unnötig große Stromstrukturen.

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

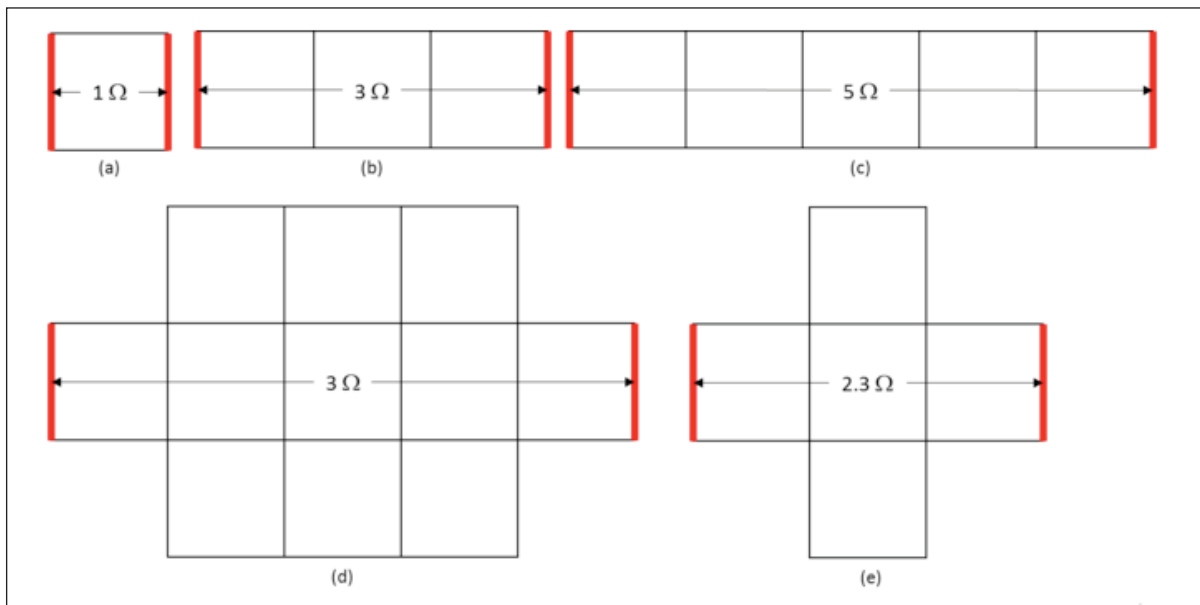


Abbildung 10: Widerstand der Stromstrukturen als „Quadrate“

Abbildung 11 zeigt 4 sehr unterschiedliche Stromstrukturen, die alle denselben Widerstand aufweisen. PI-DC bietet Entwicklern die Möglichkeit, die PDN-Strukturen so zu modifizieren, dass sie die Stromversorgungsanforderungen auf die effizienteste Art erfüllen.

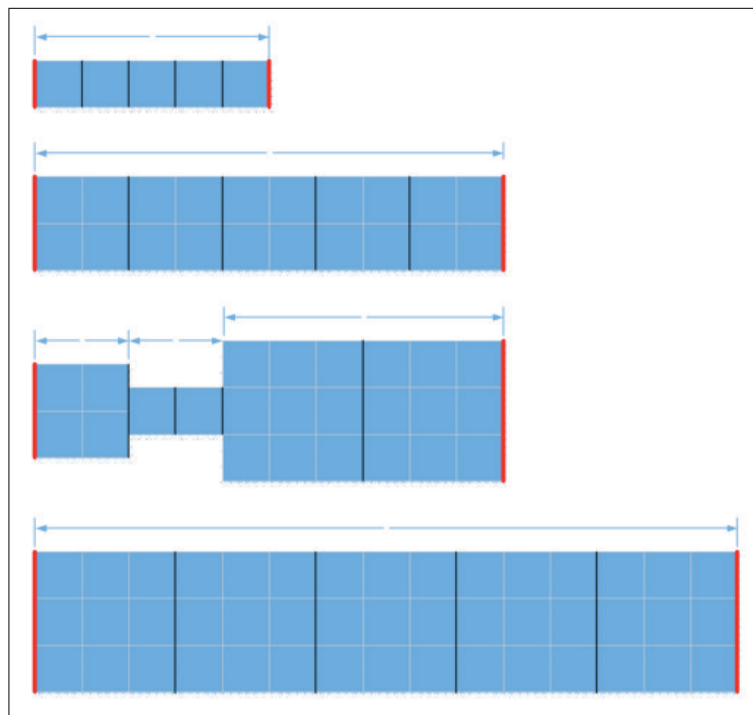


Abbildung 11: Unterschiedliche Stromstrukturen mit gleichem Widerstand

WARUM FUNKTIONIEREN DESIGNS, AUCH WENN SIE FEHLER AUFWEISEN?

Wenn Sie PI-DC für vorhandene Designs ausführen, wird es unvermeidlich sein, dass die Designs viele „Fehler“ aufweisen. Einige Benutzer haben bemerkt, dass sie bei praktisch jedem Design, das sie mit PI-DC analysieren, Fehler finden – „Wie können sie funktionieren, wenn sie voller Fehler sind?“ Es gibt zwei hauptsächliche Faktoren, die es ermöglichen, dass Designs mit Fehlern im PI-DC-Aufbau funktionieren:

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

1) Die DC-Stromversorgung ist historisch gesehen konservativ. Um die korrekte Leiterbreite für einen bestimmten Strom zu bestimmen, geben die IPC-Spezifikationen die Breite in Abhängigkeit vom zulässigen Temperaturanstieg an. Digitale Designer verfügen in der Regel nicht über verlässliche Daten über den angemessenen Temperaturanstieg. Daher verwenden sie konservative Werte, die wahrscheinlich auf früheren Erfahrungen beruhen, oder sie liefern „so viel Kupfer, wie verfügbar ist“. Wenn sie Zweifel haben, ob es ausreicht, zählen sie darauf, die Spannung (en) während der Validierung überprüfen zu können. Wenn das Design die Anforderungen erfüllt, erhöht dies ihre Erfahrung und sie verwenden diese Angaben als Richtlinie für zukünftige Designs. Wenn keine fehlerhaften Designs vorliegen, kann ein Designer nicht wissen, ob er die Menge an Kupfer reduzieren kann, die für die Stromversorgung aufgewendet wird. Deshalb nimmt er oder sie konservative Schätzungen vor. Das Design bietet genügend Spielraum, um auch erhebliche Mängel auszugleichen.

2) „Halbinseln“ oder „Inseln“ wirken sich nicht negativ auf die **DC-Stromversorgung** aus, können jedoch die AC-Stromversorgung bzw. die Signalintegrität auf scheinbar zufällige Weise beeinflussen. Sie sind ein Hinweis darauf, dass ein Design verbessert werden kann, führen jedoch möglicherweise nicht zu einem Fehlschlagen der DC-Stromversorgung. Sie verursachen jedoch andere Probleme für die AC-Stromversorgung und **Signalintegrität**, weil sie bei bestimmten Frequenzen „resonieren“ können. Wenn diese Frequenzen in der Struktur angeregt werden, kann übermäßiges AC-Rauschen auf dem PDN induziert werden. Oder wenn Signale neben der Struktur vorliegen, kann dies auf den Signalen bei ihren Resonanzfrequenzen bedeutendes Rauschen verursachen, was zu Logikfehlern führt. In beiden Fällen hängen die Fehler vom Vorhandensein der jeweiligen Resonanzfrequenzen ab und können zufällig erscheinen oder nur unter ganz bestimmten Umständen auftreten. Dies macht es sehr schwierig, sie zu replizieren und zu beheben. Deshalb ist es besser, diese besonders böswilligen Probleme präventiv zu verhindern.

Vielleicht sind „Unvollkommenheiten“, „verbesserungswürdige Bereiche“ oder „nicht ideale Zustände“ bessere Begriffe als „Fehler“. In der heutigen Zeit, in der die Betonung auf Batterielebensdauer und Kosteneinsparungen liegt, kann jedoch eine zu konservative Vorgehensweise oder das Zulassen von Fehlern in einer Stromstruktur wie Halbinseln den Unterschied zwischen einem fehlerhaften oder erfolgreichen Produkt ausmachen und kann nicht länger ignoriert werden. PI-DC gibt nicht nur Auskunft darüber, ob ein PDN angemessen ist, sondern auch, ob Stromversorgungsstrukturen notwendig sind.

BEGRENZEN SIE DEN STROM AUF IRGEND EINE WEISE

Ein wichtiger Gesichtspunkt beim Design eines PDN ist die Berücksichtigung ungeplanter Umstände. Der Designer muss sich darüber im Klaren sein, dass bei einem katastrophalen Anstieg des Stroms (z. B. Kurzschluss auf Masse) eine optimierte Stromstruktur diesen zusätzlichen Strom möglicherweise nicht aufnehmen kann und ein Versagen des Designs verursacht. Ein Mittel, um den Stromfluss im Falle von katastrophalen Fehlern einzuschränken, muss vorhanden sein (zum Beispiel Stromzufuhr zu einem Anschluss, der während der Installation kurzgeschlossen werden könnte).

DC-ANALYSE EINES PDN: FÜR DEN DIGITALEN DESIGNER UNVERZICHTBAR

BESTIMMUNG DER GRÖSSE UND ANZAHL DER VIAS

Als Faustregel für die Stromversorgung gilt, dass genügend Vias vorhanden sind, damit ihre Querschnittsfläche mindestens so groß ist wie die Stromstrukturen, die sie verbinden. Die Erfahrung zeigt, dass dies ausreichend ist, aber ein PI-DC-Werkzeug kann zeigen, ob es erforderlich ist. Übermäßige Vias oder zu große Vias führen zu Routing-Einschränkungen auf allen Lagen über und unter dem Übergang und sollten in den meisten heutigen Designs nicht leichtfertig verwendet werden. Unnötige Vias in einer Stromversorgungsstruktur können sich auf eine andere Stromversorgungsstruktur in anderen Lagen auswirken. Mit einem PI-DC-Werkzeug können Sie die Auswirkung von Vias auf das PDN messen. **Abbildung 12** zeigt 7 Vias (eingekreist und mit „a“ bis „g“ gekennzeichnet) in einem Stromversorgungsdesign. Eine sorgfältige Untersuchung zeigt, dass drei der Vias "a", "b" und "d" eine erhebliche Farbänderung zeigen, die auf einen entsprechenden Spannungsabfall aufgrund dieser drei Vias hinweist. Durch Prüfen der genauen Spannung an der Ober- und Unterseite dieser Vias (eine normale Funktion von PI-DC-Werkzeugen) kann der Designer feststellen, ob Größe und Anzahl der Vias angemessen und erforderlich sind. Wie bereits erwähnt, gibt es einige Unklarheiten bei der genauen Dimensionierung von Vias in Simulationen. Deshalb muss zum Beispiel die Auswirkung der Plattierungsdicke berücksichtigt werden. Vias werden normalerweise als „konzentrierte Elemente“ dargestellt, denen ein Widerstand in Abhängigkeit von Durchmesser und Länge der Vias zugewiesen wird. Sie werden in der Regel nicht als komplexe Säulen im Solver „gelöst“, was die Simulationen erheblich beschleunigt, ohne signifikante Einbuße der Genauigkeit.

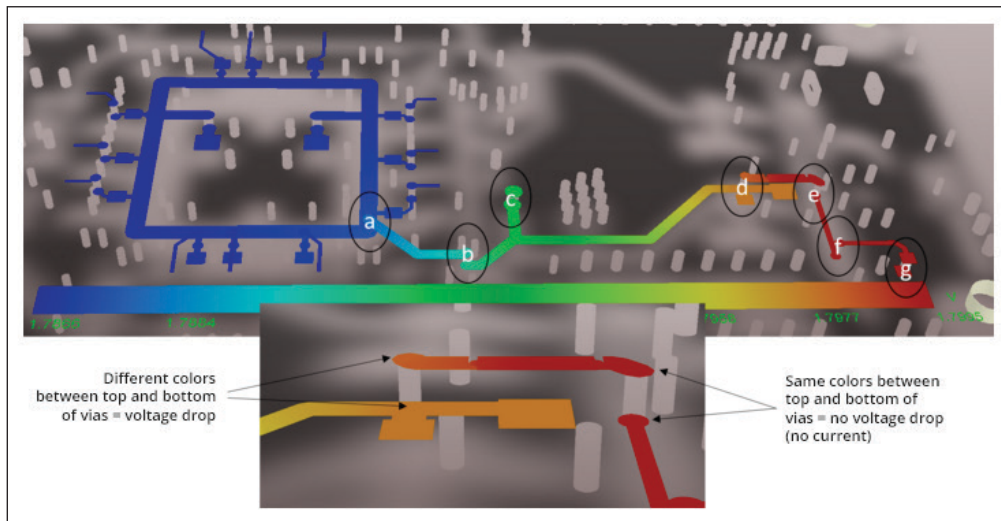


Abbildung 12: Spannungsdiagramm, zeigt den Spannungsabfall der Vias und Strukturen

SCHLUSSFOLGERUNG

Ein PI-DC-Simulator ist ein wesentliches Werkzeug für alle digitalen Designer und bietet wertvolle Erkenntnisse, wie die Größe und die Komplexität eines Designs reduziert und gleichzeitig die Leistung verbessert werden kann. Dank der Optimierung des Stromversorgungsnetzes können wertvolle Designflächen und Lagen eingespart werden. Dies führt zu niedrigeren Kosten bei höherer Leistung und Zuverlässigkeit. Die PI-DC-Simulation ist eine wesentliche Ressource für jeden digitalen (und analogen) Designer.