

Einfluss der Routinglage in Via-Arrays auf die Signalqualität bei hohen Datenraten

Sebastian Müller, Heinz-D. Brüns, Christian Schuster
Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Theoretische Elektrotechnik

1. Einleitung

Gegenstand der folgenden Untersuchungen ist der Einfluss der Routinglage (Verdrahtungslage) auf die Signalqualität bei hohen Datenraten. Ein Anwendungsfall, für den die Ergebnisse einer solchen Untersuchung relevant sind, ist in Bild 1 gezeigt: Ein Chip ist über Package und Sockel mit einer Leiterplatte verbunden. Die Ausgangssignale des Chips werden über ein Via-Array auf die Routinglagen der Leiterplatte geführt. In der Regel existieren mehrere Signalarten mit unterschiedlichen Eigenschaften (beispielsweise verschiedenen Datenraten oder Routinglängen), die den verschiedenen Lagen zugeordnet werden müssen. Kenntnisse über den Einfluss der Routinglage auf die Signalqualität erlauben somit eine optimierte Zuordnung der einzelnen Signale.

Da das Verhalten der Streifenleitungen sich auf verschiedenen Lagen bei entsprechendem Entwurf nicht unterscheidet, ist der Einfluss der Routinglage im Wesentlichen durch die Übertragung des Signals durch die Via bestimmt. Es lassen sich zwei Effekte unterscheiden: der Anteil der Via oberhalb der Streifenleitung wirkt als Diskontinuität im Signalpfad, während der untere Teil der Via das Signal als offener Stub beeinflusst. Der Viastub-Effekt, der in der Regel den größeren Einfluss besitzt, lässt sich prinzipiell sowohl durch Zurückbohren der Vias als auch durch eine geeignete Entzerrung des Signals vermindern. Aufgrund der damit verbundenen Kosten ist es allerdings besser, wenn auf diese Maßnahmen verzichtet werden kann. Der Viastub-Effekt wurde bereits in [1] im Frequenzbereich sowie in [2–4] im Frequenz- und Zeitbereich untersucht. In [5] wurde die optimale Anzahl der Signallagen für ein Design unter Berücksichtigung des Viastub-Effekts ermittelt. Im vorliegenden Papier wird der Einfluss der Routinglage sowohl bei voller Beeinflussung durch Viastubs als auch bei zurückgebohrten Vias untersucht. Es werden dabei – anders als in [1–4] – nicht einzelne Vias, sondern Vias in Arrays unter kompletter Berücksichtigung aller umgebenden Vias betrachtet, wozu sowohl auf Mess- als auch auf Simulationsdaten zurückgegriffen wird. Die Untersuchungen werden für Datenraten bis zu 25 Gb/s und sowohl für Übertragung mit einem Signalleiter („single-ended“) als auch für differentielle Übertragung durchgeführt.

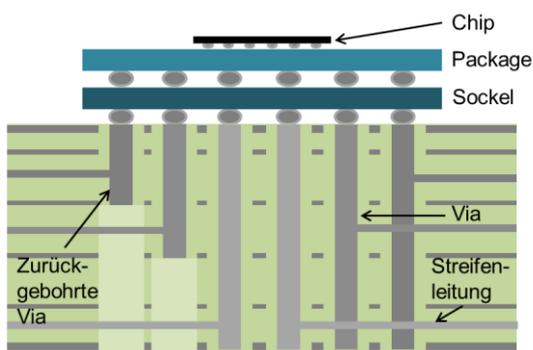


Bild 1: Typische Struktur für den Übergang von Signalen vom Chip auf die Leiterplatte (Querschnitt). Der Chip ist über Package und Sockel mit der Oberfläche der Leiterplatte verbunden. Innerhalb der Leiterplatte werden die Signale über Vias auf Streifenleitungen auf den einzelnen Routinglagen geführt. Unterschiede in der Signalqualität auf den verschiedenen Routinglagen ergeben sich maßgeblich durch den Einfluss der Vias.

2. Durchgeführte Messungen und Simulationen

Für die durchgeführte Analyse wurde eine Teststruktur entworfen, die es ermöglicht, den Einfluss der Routinglage für Vias an verschiedenen Positionen innerhalb eines Via-Arrays zu untersuchen. Zusätzlich zu den Messungen an der Teststruktur wurden Simulationen mit effizienten quasianalytischen Modellen durchgeführt. Die Simulationsergebnisse werden anhand der Messdaten validiert, um die Modelle anschließend zur Untersuchung weiterer, nicht auf der Teststruktur vorhandener Fälle einzusetzen. Einzelheiten der Messungen und Simulationen werden im Folgenden beschrieben.

2.1 Teststruktur und Messaufbau

Als Teststruktur wurde das in Bild 2(a) gezeigte Array aus 10x10 regelmäßig angeordneten Vias mit einem jeweiligen Abstand (Mittelpunkt zu Mittelpunkt) von 80 mil (1 mil = 0,0254 mm) verwendet. Das Verhältnis von Signal- zu Massevias beträgt 1:1. Die Teststruktur ist zusätzlich von einem quadratischen Käfig aus Massevias (23 Vias pro Kante, ebenfalls mit einem jeweiligen Abstand von 80 mil) umgeben, um sie gegenüber anderen Strukturen auf der vermessenen Leiterplatte ausreichend abzuschirmen. Zur Untersuchung des Einflusses der Routinglage werden Streifenleitungen der Länge 400 mil auf drei verschiedenen Signallagen aus dem Array herausgeführt. Die Position der Signallagen im Stackup ist in Bild 2(b) dargestellt. Die Streifenleitungen enden jeweils in einer Zugangsvia, die von sechs Massevias umgeben ist. Vor Durchführung der Messungen wurden an der Stelle der Zugangsvias spezielle Messzugänge, sogenannte „Recessed Probe Launches“ [6, 7], angelegt. Dazu wurde das Material oberhalb der jeweiligen Streifenleitung abgefräst und die Zugangsvia abgetrennt, so dass eine Messung direkt an der Streifenleitung gegen bereits in der Leiterplatte vorhandene Massepads möglich war. Es konnte somit eine genauere Untersuchung des elektrischen Verhaltens der Vias im Array – ohne störenden Einfluss der Zugangsvias auf die Messdaten – vorgenommen werden.

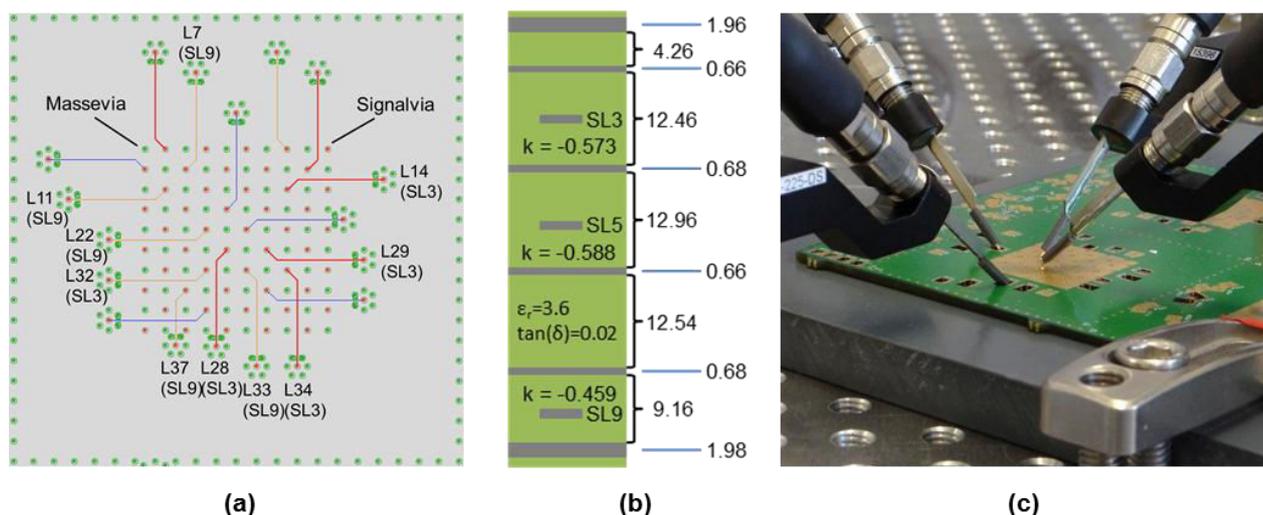


Bild 2: (a) Aufsicht auf das vermessene Via-Array in schematischer Darstellung mit Kennzeichnung der untersuchten Leitungen. (b) Stackup mit Dicken der einzelnen Lagen in mil aus der Vermessung eines Querschnitts der Testleiterplatte. (c) Messaufbau mit Teststruktur und positionierten Messspitzen.

Alle Messungen wurden als Viertormessungen mit einem Vektornetzwerkanalysator (Agilent E8364C, 12-port, 10 MHz – 50 GHz) durchgeführt. Es konnten somit pro Messung zwei Vias mit angeschlossenen Streifenleitungen charakterisiert werden. Es wurden Messspitzen der Firma GGB Industries (40A DS-style GS bzw. SG mit 225µm Pitch) nach Kalibration auf einem CS14-Substrat verwendet. Die Teststruktur mit den für die Messung positionierten Messspitzen ist in Bild 2(c) gezeigt.

2.2 Simulationsmethodik

Zur Simulation der Teststruktur sowie weiterer, nicht auf der Teststruktur vorhandener Fälle wurden effiziente quasianalytische Modelle für Vias und Streifenleitungen entsprechend der in [8] dargestellten Methodik verwendet. Zur Modellierung des Viafernfelds wurde die Parallelplattenimpedanz nach einer auf der Konturintegralmethode beruhenden Formulierung für unendliche Platten [9] berechnet. Zur Modellierung des Vianahfelds wurde das Modell nach [10] in der in [11] dargestellten Weise verwendet. Streifenleitungen wurden durch ihre Netzwerkparameter berücksichtigt, die für einfache Streifenleitungen analytisch aus der vorgegebenen charakteristischen Impedanz und für differentielle Streifenleitungen numerisch nach [12] aus dem Streifenleitungsquerschnitt bestimmt wurden. Der zur Einbindung der Streifenleitungen in das Gesamtmodell erforderliche Faktor k (siehe [8, 13]) ist für die drei Routinglagen in Bild 2(b) angegeben, in dem auch die Materialparameter des Substrats vermerkt sind.

3. Auswertung der Transmission auf verschiedenen Signallagen

In diesem Abschnitt wird die Auswirkung der Signallage in verschiedenen Szenarien – insbesondere mit Viastubs sowie nach Zurückbohren der Vias – untersucht. Es werden dabei Übertragung mit einem Signalleiter und differentielle Übertragung unterschieden.

3.1 Übertragung mit einem Signalleiter

Der Einfluss verschiedener Faktoren auf den Frequenzgang der Transmission wird für den Fall der Übertragung mit einem Signalleiter in Bild 3 untersucht. Für drei auf der gleichen Routinglage (SL3, siehe Bild 2(b)) geführte Verbindungen werden Messdaten für die Transmission zwischen Oberseite der Via im Array und dem verbundenen Messzugang (z.B. L14) in Bild 3(a) dargestellt. Trotz leichter Abweichungen zwischen den Kurven, die auf eine Abhängigkeit von der genauen Position der Via im Array hinweisen, lässt sich eine Übereinstimmung des charakteristischen Kurvenverlaufs erkennen, der vor allem durch die beiden Resonanzfrequenzen der Viastubs sowie durch Reflektionen am umgebenden Masseviakäfig geprägt ist. Im Gegensatz dazu zeigt der Vergleich zwischen Verbindungen auf verschiedenen Routinglagen in Bild 3(b) deutliche Unterschiede in den Kurvenverläufen. Während die Kurven im Frequenzbereich bis 8 GHz ähnlich verlaufen, ist die Transmission zwischen 8 GHz und 20 GHz umso besser, je tiefer die Routinglage liegt (je kürzer also der Viastub ausfällt). Im Frequenzbereich oberhalb von 20 GHz hingegen ergibt sich ein kompliziertes Frequenzverhalten. Insgesamt überwiegt der Einfluss der Routinglage deutlich den der Position im Via-Array.

Der Vergleich zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen ist für eine auf SL3 geroutete Verbindung in Bild 4 dargestellt. Das simulierte Modell weicht von der gemessenen Teststruktur insofern ab, als die Eigenschaften der Messzugänge in Kombination mit den Messspitzen vom Modell nicht berücksichtigt werden können. Als Zugang zur Streifenleitung wurde in der Simulation ersatzweise eine kurze Blindvia verwendet, die sich nur zwischen den beiden Masselage ober- und unterhalb der entsprechenden Routinglage erstreckt. Die in Bild 4(a) zu erkennende Abweichung zwischen gemessener und simulierter Reflexion ist wesentlich auf diese ungenaue Modellierung zurückzuführen. Der Vergleich zwischen gemessener und simulierter Transmission (Bild 4(b)) zeigt trotz der abweichenden Modellierung eine gute Übereinstimmung der Kurvenverläufe bis ca. 30 GHz sowie eine näherungsweise Übereinstimmung auch darüber hinaus, allerdings bei merklicher Frequenzverschiebung. Die Ergebnisse der quasianalytischen Modelle sollten somit für Untersuchungen von Datenraten von bis zu 20 Gb/s – näherungsweise auch 25 Gb/s – geeignet sein.

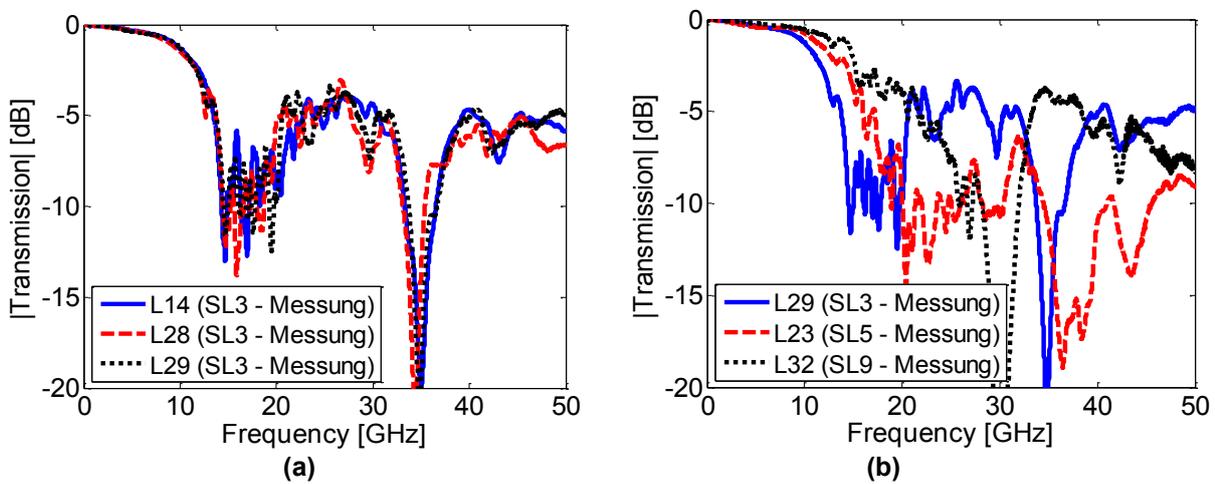


Bild 3: (a) Transmission zwischen Oberseite der Via im Array und dem angeschlossenen Recessed Probe Launch für verschiedene auf SL3 geroutete Verbindungen. (b) Entsprechende Transmission für Verbindungen auf unterschiedlichen Routinglagen. Der Einfluss der Routinglage überwiegt deutlich den der Position im Array.

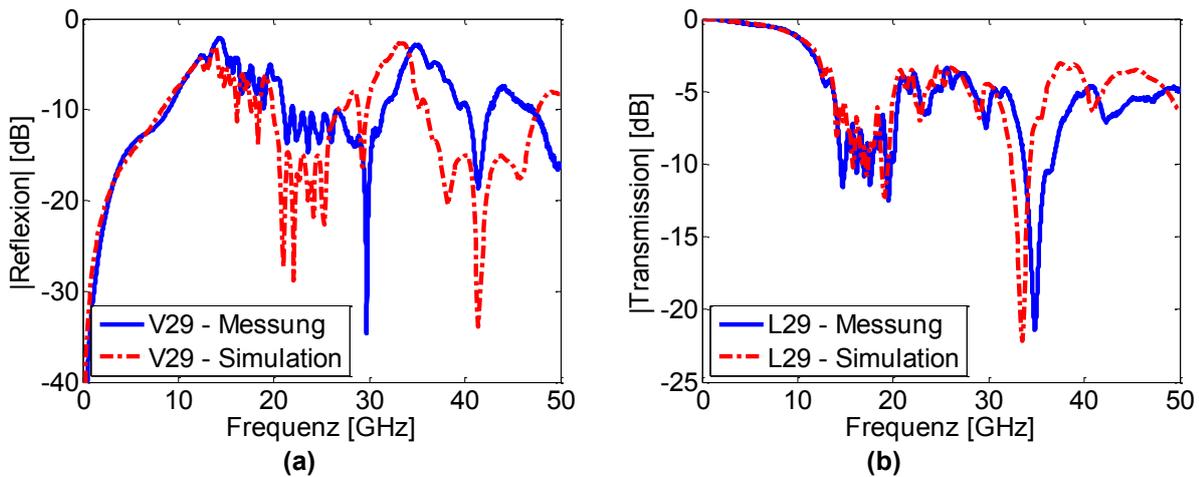


Bild 4: (a) Reflexion und (b) Transmission für eine auf SL3 geroutete Verbindung. V29 bezeichnet die mit L29 verbundene Via innerhalb des Arrays. Für die Transmission existiert eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für Frequenzen bis ca. 30 GHz.

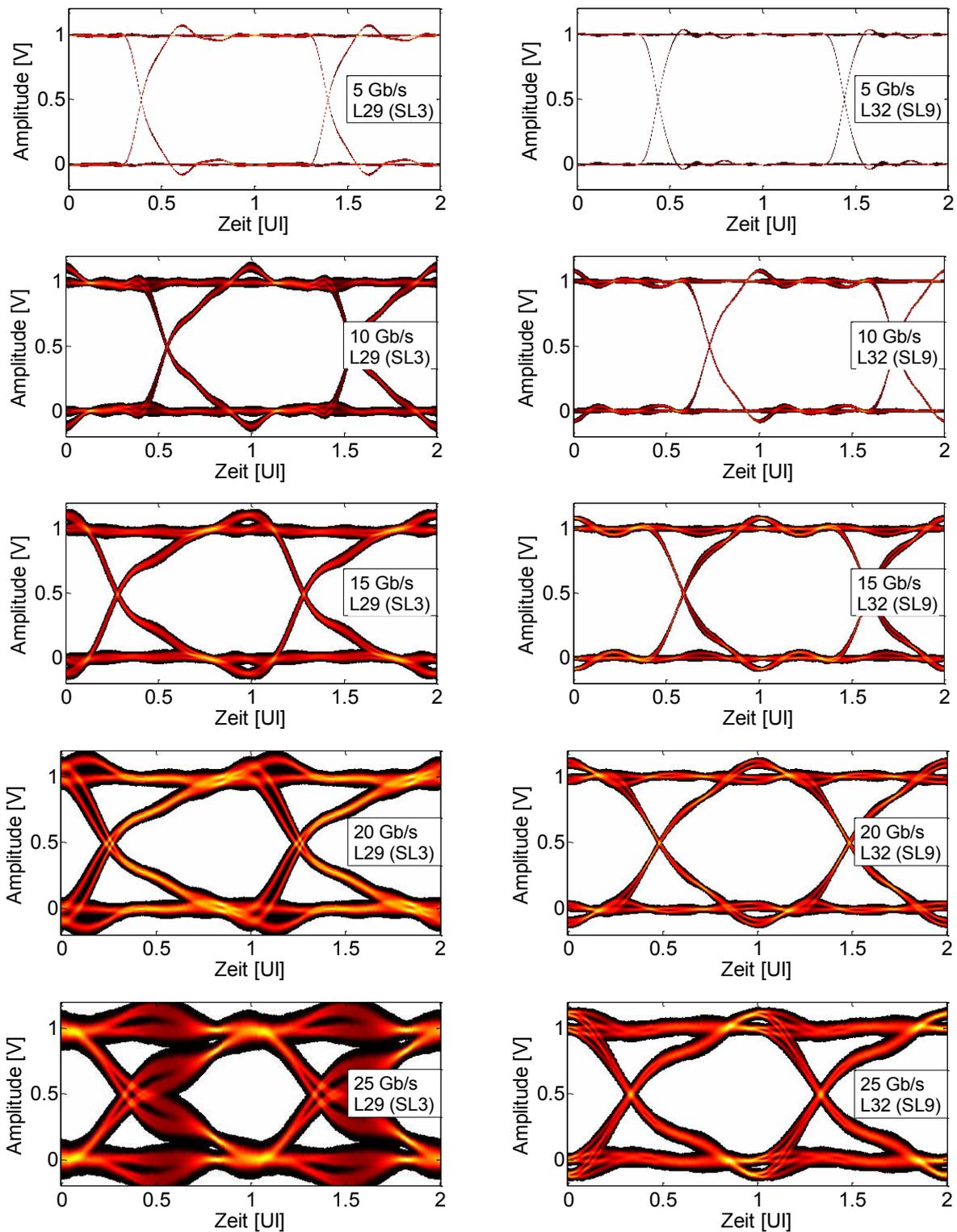


Bild 5: Vergleich zweier Augendiagramme auf Routinglage SL3 und Routinglage SL9 bei Datenraten von 5 Gb/s bis 25 Gb/s, basierend auf gemessenen S-Parametern. Bei 5 Gb/s sind beide Augendiagramme nahezu vollständig geöffnet, es ist kein relevanter Einfluss der Routinglage zu erkennen. Mit zunehmender Datenrate ist für beide Augendiagramme ein Einfluss des Viastubs zu erkennen, bei Routing auf SL3 (und somit einem längeren Viastub) ist der Effekt auf das Augendiagramm allerdings deutlich stärker.

Zur Untersuchung der Signalqualität in Abhängigkeit von Routinglage und Datenrate wird von den S-Parametern zu Augendiagrammen übergegangen. Diese werden nach einem statistischen Ansatz [14] aus den gemessenen bzw. simulierten S-Parametern berechnet. Als Signal wird ein Zufallssignal mit gleichwahrscheinlichen Spannungspiegeln 0 V und 1 V sowie Anstiegs- und Abfallzeiten von 10% des Einheitsintervalls angenommen. Bild 5 zeigt beispielhaft die aus Messdaten ermittelten Diagramme für jeweils eine auf SL3 und eine auf SL9 geführte Verbindung bei Datenraten von 5 Gb/s bis 25 Gb/s. Es lässt sich erkennen, dass die Routinglage bei 5 Gb/s nahezu keinen Einfluss besitzt. Mit zunehmender Datenrate zeigt sich hingegen ein immer deutlicherer Einfluss. Die Augenöffnung reduziert sich für beide Routinglagen, auf SL3 fällt die Reduktion aufgrund des längeren Viastubs jedoch wesentlich stärker aus als auf SL9.

Um einen Überblick über den Einfluss der Routinglage in verschiedenen Konstellationen zu geben, wird im Folgenden nicht mehr das Augendiagramm als Ganzes, sondern lediglich die vertikale Augenöffnung als Kennzahl für die Signalqualität untersucht. Bild 6(a) zeigt die Abhängigkeit der vertikalen Augenöffnung von der Datenrate für gemessene Verbindungen auf der Teststruktur. Betrachtet werden vier Verbindungen auf Routinglage SL3 sowie sechs Verbindungen auf Routinglage SL9. Für jede der beiden Routinglagen ist das Band zwischen der schlechtesten und der besten Augenöffnung dargestellt. Es zeigt sich auch in dieser Darstellung, dass zwischen den beiden Routinglagen insbesondere bei hohen Datenraten ein deutlich größerer Unterschied besteht als zwischen den einzelnen Verbindungen einer Routinglage, wobei sich die Augenöffnungen bei verschiedenen Routinglagen um mehr als 20 % des Spannungspegels unterscheiden können. In Bild 6(b) ist ein entsprechender Plot basierend auf den simulierten S-Parametern für die Teststruktur erstellt worden. Die auf simulierten S-Parametern beruhende Auswertung erreicht zwar keine exakte Übereinstimmung mit der auf Messwerten beruhenden, zeigt aber eine sehr ähnliche Tendenz. In Bild 6(c) sind die vertikalen Augenöffnungen – basierend auf simulierten S-Parametern – nach Zurückbohren der Vias auf SL3 dargestellt. In der Simulation wurde dafür ein Zurückbohren bis zur ersten Maselage unterhalb von SL3 angenommen, so dass nur ein minimaler Viastub verbleibt. Die Vias auf SL9 bleiben unverändert, da sie bereits einen minimalen Stub besitzen. Wie erwartet führt das Zurückbohren der Vias zu einer deutlichen Verbesserung der Signalqualität bei hohen Datenraten. Zudem ist nun ein Routing auf der oberen Signallage (SL3) günstiger, da nach dem Wegfallen des Viastubs vor allem die Länge der durch die Via dargestellten Diskontinuität für die Signalqualität entscheidend ist. Die durch diesen Längenunterschied zwischen den Routinglagen verursachte Abweichung der Augenöffnungen kann bei 25 Gb/s mehr als 10% des Spannungspegels betragen.

3.2 Differentielle Übertragung

Für hohe Datenraten im Bereich mehrerer Gb/s ist eine differentielle Signalübertragung üblich und insbesondere aufgrund der höheren Immunität gegenüber Störungen häufig sogar notwendig. Aus diesem Grund werden die bislang vorgenommenen Untersuchungen hier auf den differentiellen Fall erweitert. Betrachtet wird ein Via-Array mit regelmäßig angeordneten Signal- und Massevias, aus dem an drei Stellen differentielle Leitungen herausgeführt werden (siehe Bild 7(a)). Für die Leitungsenden werden in der Simulation wie zuvor kurze Blindvias angenommen. Für jede Leitungsposition wurde eine Simulation mit Leitungsführung auf SL3 und eine Simulation mit Leitungsführung auf SL9 durchgeführt. Die sich ergebenden Augenöffnungen sind in Bild 7(b) dargestellt.

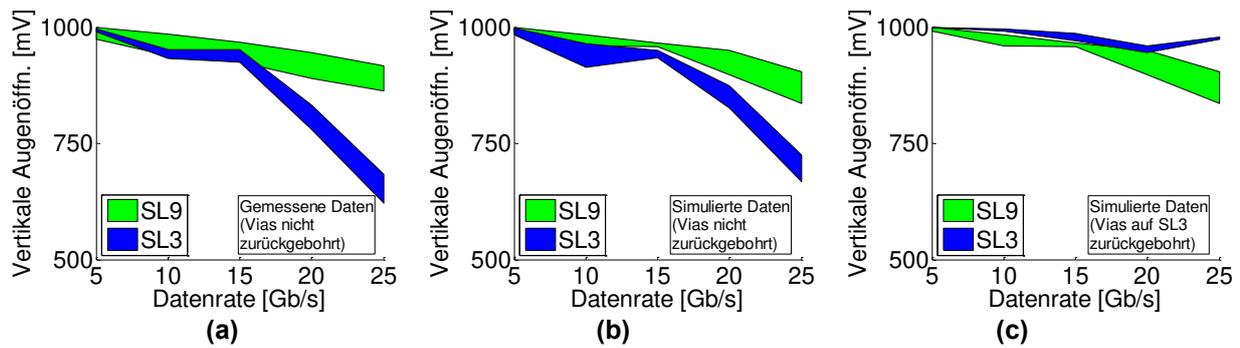


Bild 6: Auswertung der vertikalen Augenöffnungen in Abhängigkeit von Routinglage und Datenrate für die in Bild 2(a) gezeigte Struktur basierend auf (a) gemessenen Streuparametern, (b) simulierten Streuparametern und (c) simulierten Streuparametern bei zurückgebohrten Vias auf SL3.

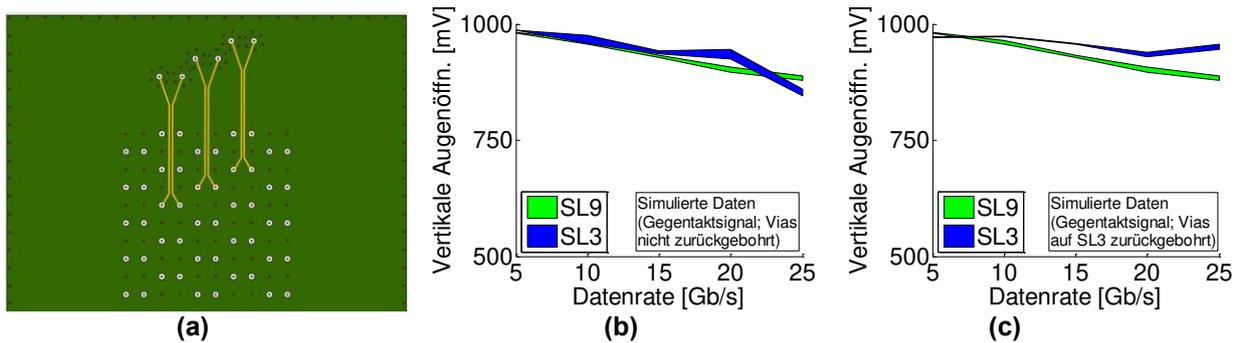


Bild 7: Auswertung der vertikalen Augenöffnungen bei differentieller Übertragung: (a) Ausschnitt der betrachteten Struktur mit den drei simulierten Linkpositionen. (b) Augenöffnungen ohne Zurückbohren der Vias. (c) Augenöffnungen bei zurückgebohrten Vias auf SL3.

Für die untersuchte Struktur fällt der Stubeffekt bei der differentiellen Übertragung geringer aus als bei Übertragung mit einem Signalleiter, und wirkt sich erst ab 25 Gb/s erkennbar aus. Eine differentielle Übertragung ist also nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Störimmunität, sondern auch aufgrund der geringeren Beeinflussung durch Viastubs insbesondere bei hohen Datenraten in Erwägung zu ziehen. Nach Zurückbohren der Vias auf SL3 hingegen ist – analog zum Fall der Übertragung mit einem Signalleiter – ein Routing auf SL3 bereits ab Datenraten von 10 Gb/s günstiger (Bild 7(c)).

4. Zusammenfassung

Eine messtechnische und simulatorische Untersuchung zeigt einen deutlichen Einfluss der Routinglage auf die Signalqualität. Eine Auswertung von Augendiagrammen bei einer Datenrate von 25 Gb/s und Übertragung mit einem Signalleiter zeigt für den Fall nicht zurückgebohrter Vias einen durch den Stubeffekt verursachten Unterschied von mehr als 20 % des Eingangsspannungspegels zwischen oberster und unterster Routinglage, wobei die beste Signalqualität auf der untersten Routinglage erreicht wird. Im Falle zurückgebohrter Vias existieren Unterschiede von mehr als 10 % des Eingangsspannungspegels aufgrund der unterschiedlichen Vialängen im Signalpfad, wobei die beste Signalqualität auf der obersten Routinglage erreicht wird. Eine differentielle Signalübertragung bietet für die betrachtete Teststruktur den Vorteil einer geringeren Auswirkung des Stubeffekts, dennoch gelten die zuvor getroffenen Aussagen im Grundsatz auch für die differentielle Übertragung.

Referenzen

- [1] T. Kushta, K. Narita, T. Kaneko, T. Saeki, and H. Tohya, "Resonance stub effect in a transition from a through via hole to a stripline in multilayer PCBs," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett*, vol. 13, no. 5, pp. 169–171, May. 2003.
- [2] S. Deng, J. Mao, T. H. Hubing, J. L. Drewniak, J. Fan, J. L. Knighten, N. W. Smith, and R. Alexander, "Effects of open stubs associated with plated through-hole vias in backpanel designs," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2004.
- [3] J. Shin and T. Michalka, "Comprehensive design guidance for PTH via stub in board-level high speed differential interconnects," *60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2010.
- [4] C.-L. Yeh, Y.-C. Tsai, C.-M. Hsu, L.-S. Liu, S.-H. Tsai, Y. H. Kao, and G.-H. Shiue, "Influence of via stubs with different terminations on time-domain transmission waveform and eye diagram in multilayer PCBs," *IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS)*, 2012.
- [5] K. J. Han, X. Gu, Y. H. Kwark, L. Shan, and M. B. Ritter, "Modeling On-Board Via Stubs and Traces in High-Speed Channels for Achieving Higher Data Bandwidth," *IEEE Trans. Compon. Packag. Manufact. Technol*, to be published.
- [6] Young Kwark, Christian Schuster, Lei Shan, Christian Baks, Jean Trehwella, "The recessed probe launch—A new signal launch for high frequency characterization of board level packaging," *IEC DesignCon Conference*, 2005.
- [7] M. Kotzev, R. Rimolo-Donadio, Y. H. Kwark, C. W. Baks, X. Gu, and C. Schuster, "Electrical Performance of the Recessed Probe Launch Technique for Measurement of Embedded Multilayer Structures," *IEEE Trans. Instrum. Meas*, vol. 61, no. 12, pp. 3198–3206, 2012.
- [8] R. Rimolo-Donadio, Xiaoxiong Gu, Y. Kwark, M. Ritter, B. Archambeault, F. de Paulis, Y. Zhang, J. Fan, H.-D. Brüns, and C. Schuster, "Physics-Based Via and Trace Models for Efficient Link Simulation on Multilayer Structures Up to 40 GHz," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn*, vol. 57, no. 8, pp. 2072–2083, Aug. 2009.
- [9] X. Duan, R. Rimolo-Donadio, S. Müller, K. J. Han, X. Gu, Y. H. Kwark, H.-D. Brüns, and C. Schuster, "Impact of multiple scattering on passivity of equivalent-circuit via models," *IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS)*, 2011.
- [10] A. G. Williamson, "Radial-line/coaxial-line junctions: analysis and equivalent circuits," *International Journal of Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 91–104, 1985.
- [11] S. Müller, X. Duan, M. Kotzev, Y.-J. Zhang, J. Fan, X. Gu, Y. H. Kwark, R. Rimolo-Donadio, H.-D. Brüns, and C. Schuster, "Accuracy of Physics-Based Via Models for Simulation of Dense Via Arrays," *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, vol. 54, no. 5, pp. 1125–1136, Oct. 2012.
- [12] S. Müller, R. Rimolo-Donadio, H.-D. Brüns, C. Schuster, "Schnelle Simulation verlustbehafteter Verbindungsstrukturen auf Leiterplatten auf der Grundlage quasi-analytischer Via-Modelle und der Leitungstheorie," *Internationale Fachmesse für elektromagnetische Verträglichkeit (EMV Düsseldorf)*, 2010.
- [13] A. E. Engin, W. John, G. Sommer, W. Mathis, and H. Reichl, "Modeling of Striplines Between a Power and a Ground Plane," *IEEE Trans. Adv. Packag*, vol. 29, no. 3, pp. 415–426, 2006.
- [14] D. Timmermann, R. Rimolo-Donadio, Y. H. Kwark, T.-M. Winkel, C. Siviero, H. Harer, and C. Schuster, "Methods for calculation of eye diagrams for digital links with multiple aggressors having unknown time offsets," *IEEE 16th Workshop on Signal and Power Integrity (SPI)*, 2012.