

Einfluss der Rückätzung auf die Impedanz von Leiterzügen

Hans-Jörg John, Hermann Reischer, Arnold Wiemers

Einleitung

Bei der Definition eines Multilayer-Lagenaufbaus wird zunehmend auch die Impedanz der Leiterzüge berechnet. Die eingesetzten Aufbaumaterialien (Innenlagen und Prepregs) sollten so ausgewählt werden, dass sich bei einer vorgegebenen Leiterzug(-Nenn)-Breite auf allen Signallagen ähnliche Impedanzwerte für die Einzelleitung ergeben. Die Berechnung der Impedanz basiert in der Regel auf der Annahme eines rechteckigen Querschnittes des fertigen Leiterzuges. Der tatsächliche Querschnitt ist aber eher als trapezförmig zu bezeichnen und kann von Leiterplattenhersteller zu Leiterplattenhersteller variieren.

Wenn die bestückte Leiterplatte vom Entwickler im Labor in Betrieb genommen wird und die Schaltung nicht die erwartete Funktion zeigt, wird häufig der Print verantwortlich gemacht. Man hört dann Fragen wie: Ist die Annahme eines rechteckigen Querschnittes für die Impedanzberechnung zulässig? Welcher Fehler kann dadurch entstehen? Da Näherungsformeln keine Antwort liefern und nicht jeder Fieldsolver beliebige Querschnitte berechnen kann, soll die Problematik und deren Abhängigkeiten hier aufgezeigt werden. Durch die Kenntnis der Zusammenhänge kann die Designsicherheit verbessert werden. Allerdings ist die Querschnittsgeometrie nur **ein** Einflussfaktor auf den Endwert der Impedanz. Technologische Faktoren bei der Leiterplattenherstellung und Materialparameter sind ebenso zu beachten, sollen aber hier nicht diskutiert werden.

Rückätzung

Durch den Prozessschritt Ätzen während der Leiterplattenherstellung wird eine durchgehende Kupferschicht strukturiert. Der eigentliche Ätzvorgang wirkt in die Tiefe der Kupferschicht (Kupfer wird an nicht abgedeckten Stellen entfernt), er wirkt aber auch an den abgedeckten Stellen seitlich. Diese sogenannte prozessbedingte Rückätzung verändert die Querschnittsfläche und ggf. die Breite der Leiterzüge. Weitere Einzelheiten können [1] entnommen werden. Der fertige Leiterzug hat also nicht mehr die Form eines Rechteckes sondern ist mit einem Trapez vergleichbar.

Bild 1 zeigt für eine Einzelleitung den Unterschied zwischen idealem und realem Leiterzugquerschnitt.

Das Verhältnis aus Dicke der Leitung t zur Flankenneigung wird als Ätzfaktor bezeichnet. Wenn man die Auswirkungen des Ätzfaktors auf die Impedanz untersuchen will, muss festgelegt werden, auf welche Geometrie die Impedanzänderung bezogen werden soll. Ausgehend von den CAD-Daten (Leiterzüge mit Nenn-Breite) soll deshalb hier von einem Rechteck dieser Breite ausgegangen werden. Durch den Ätzprozess soll diese Breite in Höhe der halben (End-)Kupferdicke konstant bleiben. Der Leiterplattenhersteller kann das (vor der Leiterbelichtung) durch eine entsprechende Skalierung aller oder nur der betroffenen D-Codes erreichen. Mit den Bezeichnungen in Bild 1 ergibt sich der Ätzfaktor zu $(t/2x)$. Wenn $2x = t$ ist, beträgt der Ätzfaktor = 1, bzw. der

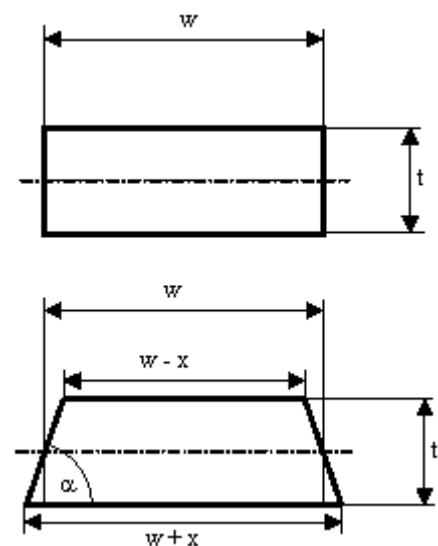


Bild 1: Einzelleitung

zugehörige Winkel $\alpha = \arctan(t/2x) = 45^\circ$. Im Fall des Rechtecks ist der Ätzfaktor unendlich bzw. der Winkel $\alpha = 90^\circ$

Einzelleitung

Um die Auswirkungen der Querschnittsgeometrie einer Einzelleitung auf die Impedanz zu ermitteln, wurden verschiedene Strukturen mit unterschiedlichen Fielddsolvern berechnet. Die Fielddsolvers werden am Ende des Beitrages vorgestellt.

Symmetrische Stripline

Eine exakt in der Mitte zwischen zwei Bezugsebenen liegende Einzelleitung soll als erstes untersucht werden. Bild 2 zeigt die entsprechende Geometrie. Dieses Beispiel hat in der Praxis kaum Bedeutung, da es unmöglich ist, Innenlagen und Prepregs so zu kombinieren, dass die Leitung exakt symmetrisch zwischen den Bezugsebenen angeordnet ist. Dieses Beispiel lässt aber einige Plausibilitätsüberlegungen zu, die sonst nicht so einfach möglich sind.

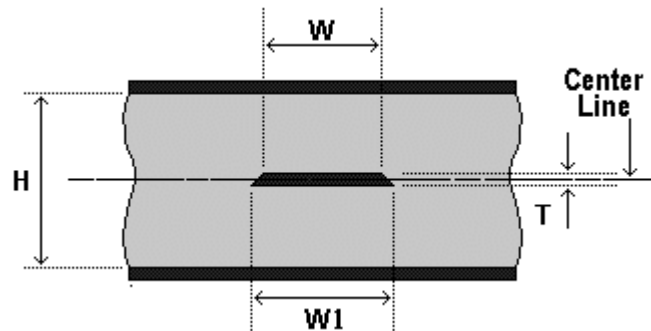


Bild 2: Symmetrische Stripline

Für die in Bild 2 gezeigte Struktur mit $H = 600 \mu\text{m}$, $T = 15 \mu\text{m}$, $w = 70 \mu\text{m}$ und $\epsilon_r = 4,2$ für das gesamte Dielektrikum wurde die Änderung der Impedanz bei Änderung des Leiterzugquerschnittes berechnet. Die Breite $w = 70 \mu\text{m}$ in Verbindung mit der Dicke von $15 \mu\text{m}$ ist als Beispiel gedacht und erhebt keinen Anspruch auf technologische Machbarkeit!

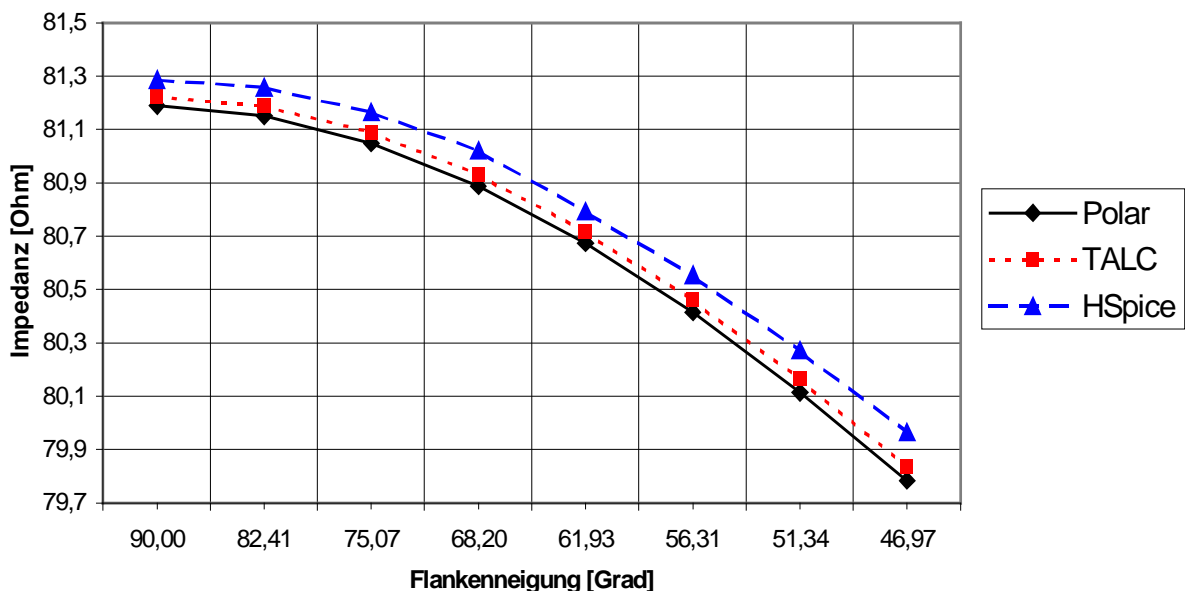


Bild 3: Impedanzänderung einer symmetrischen Stripline nach Bild 2

Aus den Berechnungen nach Bild 3 können folgende Ergebnisse abgeleitet werden: Die Impedanz reduziert sich um $1,4 \Omega$ oder $1,7 \%$ bei 45° in Bezug auf den Wert des Rechtecks. Ein Winkel von 45° ist sicherlich schon ein Extremfall, deshalb ist die Impedanzreduzierung in der Praxis durch die Flankenneigung geringer, immer unter der Voraussetzung, dass die Leiterzug-Nenn-Breite des äquivalenten Rechtecks beim Ätzen beibehalten wurde. Die Ergebnisse mit den drei Fieldsolvern unterscheiden sich um $0,1 \Omega$ beim Rechteck und um $0,18 \Omega$ bei 45° . Diese Übereinstimmung ist als sehr gut zu bezeichnen.

Für ein auf dem Kopf stehendes Trapez erhält man exakt das gleiche Ergebnis wie in Bild 3. Bei einer symmetrischen Stripline muss man also nicht die Schichtung von Innenlagen und PrePregs bei der Bestimmung der Impedanzänderung berücksichtigen.

Asymmetrische Stripline

Wenn man jetzt die Center Line in Bild 2 von $300 \mu\text{m}$ auf $100 \mu\text{m}$ nach unten verschiebt bei ansonsten gleichen Bedingungen ergibt sich eine Impedanzänderung gemäß Bild 4.

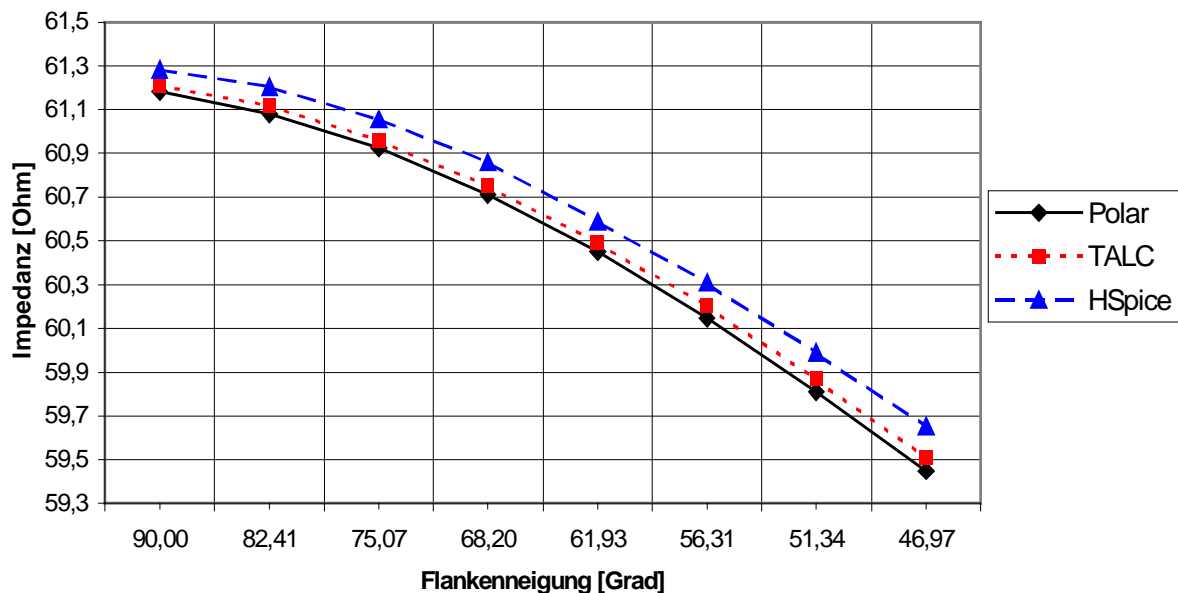


Bild 4: Impedanzänderung einer Asymmetrischen Stripline, Trapez nach oben

Die Impedanz einer solchen asymmetrischen Stripline ist deutlich geringer, da der Abstand zur Bezugsebene von $292,5 \mu\text{m}$ auf $92,5 \mu\text{m}$ reduziert wurde. Der Einfluß der Flankenneigung auf die Impedanz ist absolut mit $1,7 \Omega$ oder $2,8 \%$ etwas größer als bei der symmetrischen Stripline. Für diese Überlegungen wurde unterstellt, dass das Trapez nach oben zeigt (Innenlage – Prepreg – Innenlage). Sollte die Materialschichtung Prepreg – Innenlage – Prepreg sein, zeigt das Trapez nach unten. Der Impedanzwert des Rechtecks ist unabhängig von der Schichtung (unter der Voraussetzung gleicher Abstände zur Bezugsebene). Die Flankenneigung hat geringeren Einfluss auf die Impedanz: $0,9 \Omega$ oder $1,5 \%$. Bild 5 zeigt die Ergebnisse für das auf dem Kopf stehende Trapez mit den Abmessungen aus Bild 2, aber Center Line in $100 \mu\text{m}$. Der Winkel α ändert sich jetzt von 90° zu größeren Werten.

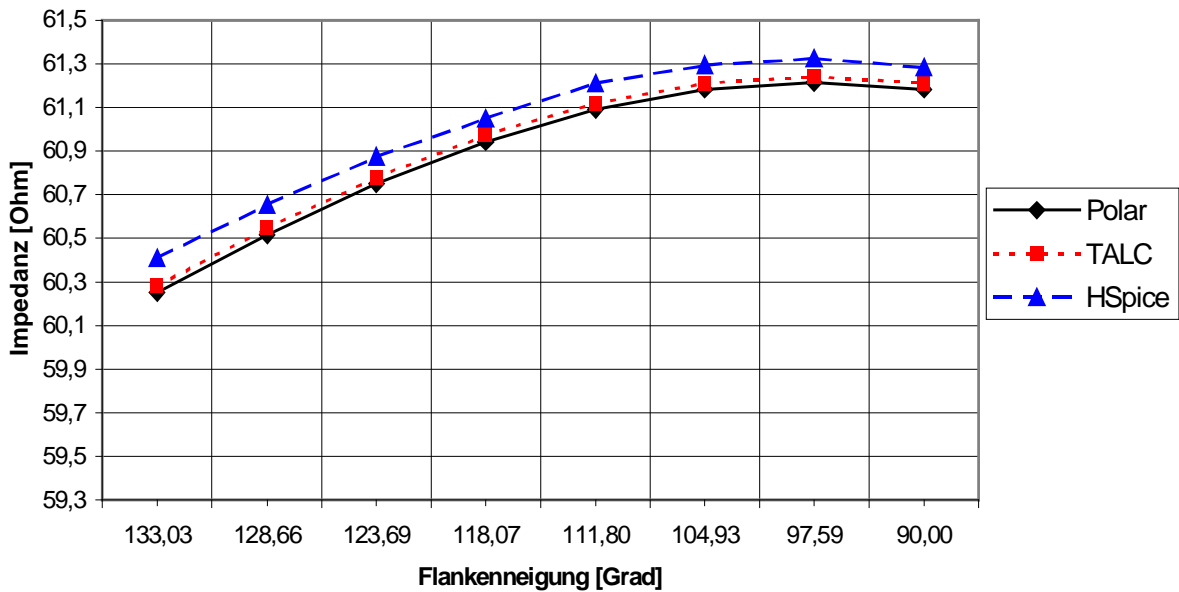


Bild 5: Impedanzänderung einer Asymmetrischen Stripline, Trapez nach unten

Für eine Stripline-Einzelleitung kann man feststellen, dass der Einfluss der Flankenneigung auf die Impedanz kleiner 3 % im Vergleich zu einem äquivalenten Rechteck ist.

Verkoppelte Leitungen

Im Fall von zwei verkoppelten Leitungen muss ebenfalls das Bezugssystem definiert werden. Bild 6 zeigt die betrachtete Anordnung.

Bei der Berechnung des Einflusses der Flankenneigung auf die differentielle Impedanz eines Leitungspaares wird vorausgesetzt, dass sich die Leiterzugbreite des äquivalenten Rechtecks nicht ändert. Dadurch ist gewährleistet, dass der Abstand der verkoppelten Leitungen in der Mitte der Kupferschichtdicke ebenfalls konstant bleibt. Sobald diese

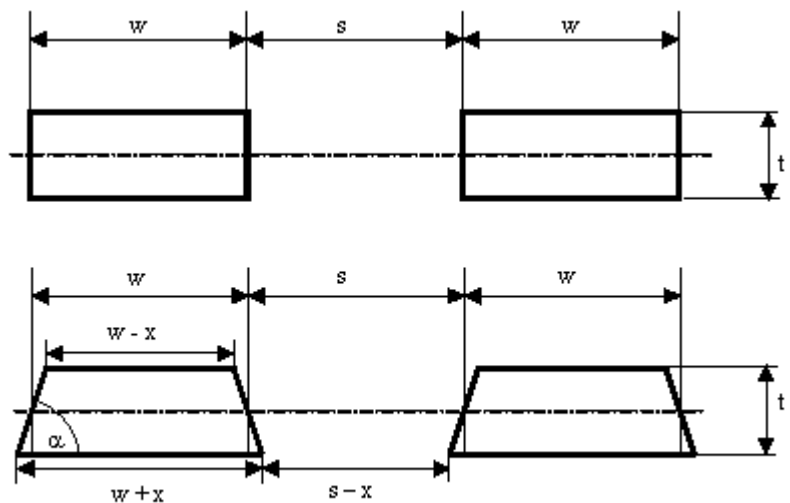


Bild 6: Leitungspaar

Voraussetzung nicht gegeben ist, kann nicht mehr unterschieden werden, ob die Impedanzänderung von der Flankenneigung oder von den geänderten geometrischen Parametern verursacht wird.

Bild 7 zeigt das Ergebnis der differentiellen Impedanz basierend auf den Maßen der symmetrischen Einzelleitung. Der Abstand s beträgt $100\ \mu\text{m}$.

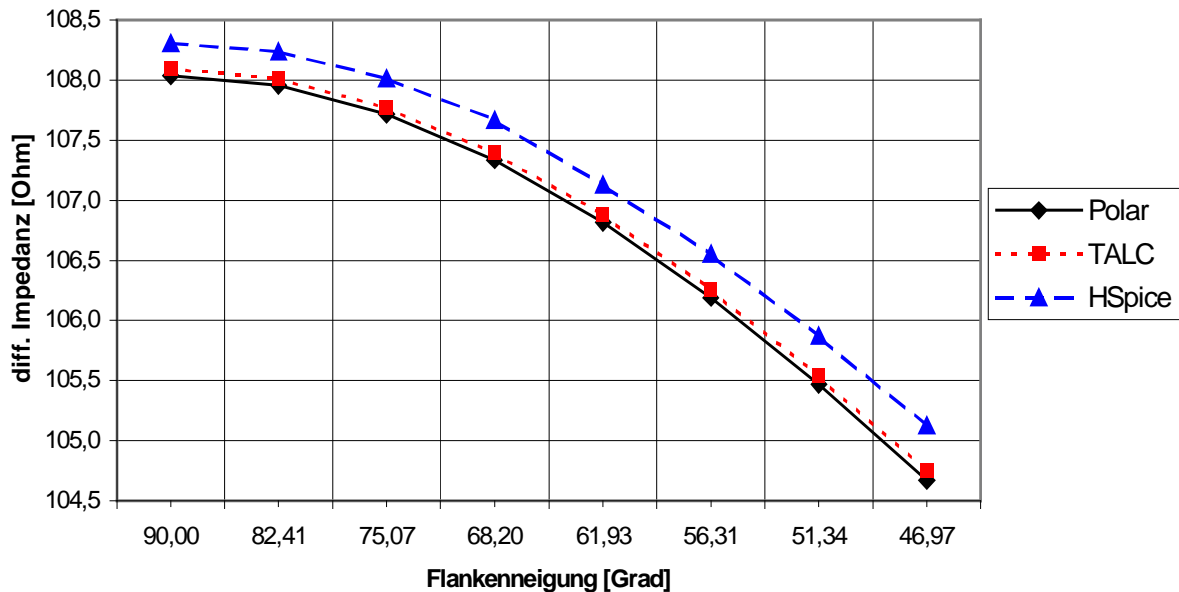


Bild 7: Änderung der differentiellen Impedanz eines symmetrischen Leiterpaares

Die differentielle Impedanz ändert sich durch die Berücksichtigung der Flankenneigung stärker als bei der vergleichbaren Einzelleitung. Sie beträgt im Bild 7 etwa $3,4\ \Omega$ bzw. $3,1\ \%$. Das begründet sich dadurch, dass sich nicht nur die Impedanz der Einzelleitungen sondern auch die Kopplung zwischen ihnen durch die Flankenneigung ändert. Solange aber die Nenn-Leiterzugbreite eingehalten wird, kann sich auch der Abstand zwischen den Leitungen nicht ändern. Deshalb kann man davon ausgehen, dass nur durch die bei der Definition eines Multilayer-Lagenaufbaus nicht berücksichtigte Flankenneigung auch bei differentiellen Übertragungswegen keine Toleranzverletzungen zu erwarten sind.

Fieldsolver

Die Berechnungen in diesem Beitrag wurden mit den Fieldsolvern Si6000b der Firma Polar [2], dem Fieldsolver TALC der Firma Zuken (vormals INCASES) [3] sowie mit dem im Analogsimulator HSpice enthaltenen Fieldsolver [4] durchgeführt. Das Feature, einen Leiterzug mit Polygonen zu beschreiben, ist in der heute von der Firma Zuken gelieferten Software nicht mehr aktiviert. In zukünftigen Softwarereleases soll es nach Auskunft der Firma Zuken wieder freigeschaltet werden. Die Ergebnisse belegen, dass alle drei Solver vergleichbare Ergebnisse liefern. In der Handhabung gibt es allerdings erhebliche Unterschiede, da weder HSpice noch TALC eine graphische Oberfläche zur Eingabe der Parameter anbieten (gilt für TALC in der unter [3] genannten Version). Für den produktiven Einsatz ist Polar zu favorisieren. Der Vorteil von TALC und HSpice besteht darin, dass der Anwender die L- und C-Matrizen ausgegeben bekommt. Erst diese ermöglichen die Nutzung der Berechnungsergebnisse in Simulationen einer realen Leitungsanordnung bzw. zur

Ermittlung weiterer Parameter, die das Leitungssystem charakterisieren. Diese Ausgabe wird bei Polar im nächsten Release implementiert.

Zusammenfassung

Der Einfluss der Flankenneigung auf die Impedanz eines Leiterzuges ist vorhanden. Die Impedanz wird kleiner im Vergleich zur Impedanz eines äquivalenten Rechtecks. Das ist aber nur eine Einflussgröße. Insbesondere bei verkoppelten Leitungen spielt die Breite des äquivalenten Rechtecks die größere Rolle. Wenn diese Breite von dem Nennmaß abweicht, ändert sich im gleichen Maß der Abstand zwischen den Leitungen. Dadurch kommt es zu einer überproportionalen Absenkung (oder Erhöhung) der differentiellen Impedanz: Leiterzugbreite w ist größer als die Nennbreite – Impedanz sinkt. Gleichzeitig wird der Abstand s kleiner als das Nennmaß – differentielle Impedanz sinkt nochmals durch die größere Kopplung zwischen den Leitungen. Im umgedrehten Fall steigt die Impedanz durch die kleinere Breite w im Vergleich zur Nennbreite. Der dadurch größer werdende Abstand s zwischen den Leitungen hat eine geringere Kopplung der Leitungen zur Folge, was zu einer Erhöhung der differentiellen Impedanz führt.

Sollte im Einzelfall eine sehr exakte Vorhersage der Impedanz notwendig sein, ist auf jeden Fall die Schichtungsreihenfolge im Multilayeraufbau mit zu berücksichtigen.

Literatur

- [1] Leiterplatten Handbuch, Ausgabe 7.3, ILFA GmbH, <http://www.ilfa.de/>
- [2] Polar Instruments Si6000b Field Solver, <http://www.polarinstruments.com/de>
- [3] TALC, **T**ransmission **L**ine **C**alculator V3.0PL3, 1995; 1994-2000 INCASES Engineering, 2000-2002 ZUKEN
- [4] HSpice, 2001.4, Avant! Corp., 2001