

# Electronic Design Automation (EDA)

## Mixed Signal Simulation

Mixed-Signal-Simulation

Erweiterte Simulationskerne

Kopplung von Simulatoren

Analog nach Digital

Digital nach Analog

Zeitschrittsynchronisation

Lockstep/Backtracking

## Mixed Signal Simulation: Mixed-Signal-Simulation

### Mixed-Signal-Simulation

- Die Bedeutung von gemischt analog/digitalen Schaltungen hat stark zugenommen.
- Analog-/ und Digitalsimulation beruhen auf unterschiedlichen Verfahren:
  - analog: Lösen umfangreicher Differentialgleichungssysteme mit numerischen Verfahren.
  - digital: zeit- und wertdiskret, Auswertung einfacher Datenstrukturen zu diskreten Zeitpunkten.
- Die aufwendigen Berechnungen der Analogsimulation arbeiten langsamer als die Digitalsimulation.

In den letzten Jahren hat die Bedeutung von gemischt analog/digitalen Schaltungen stark zugenommen. Die Simulation solcher Schaltungen ist jedoch problematisch, da die Verfahren für Analog- und Digitalanordnungen sehr unterschiedlich sind. Während bei einem Analogsimulator komplexe Differentialgleichungssysteme mit numerischen Verfahren gelöst werden, können sich digitale Simulatoren aufgrund verschiedener Eigenschaften digitaler Schaltungen (zeit- und wertdiskrete Signale) auf die Auswertung einfacher Datenstrukturen zu diskreten Zeitpunkten beschränken (Ereignissteuerung).

Die Schwierigkeit einer gemischten Simulation (Mixed-Signal-Simulation) liegt insbesondere in der unterschiedlichen Geschwindigkeit, mit der die beiden Schaltungsarten ausgewertet werden können. Im Idealfall soll es möglich sein, den gesamten Leistungsumfang des Digitalanalogators zu nutzen, ohne die Präzision bei den analogen Schaltungsberechnungen einzuschränken.

## Mixed Signal Simulation: Erweiterte Simulationskerne

### Erweiterte Simulationskerne

- Nur bei jeweils kleinen Anteilen der anderen Schaltungsart praktikabel.
- Keine Signalüberführung nötig.
- Analogsimulator benötigt analoge Beschreibungen digitaler Zellen.
- Digitalsimulator benötigt zusätzlich digital modellierte Analogzellen.

Besteht eine Schaltung überwiegend aus Bauelementen einer der beiden Welten, ist es praktikabel, die Fähigkeiten bestehender analoger bzw. digitaler Simulatorkerne um die Komponenten der jeweils anderen Welt zu erweitern. Eine Umrechnung in die jeweils andere Signaldarstellung ist dadurch nicht notwendig.

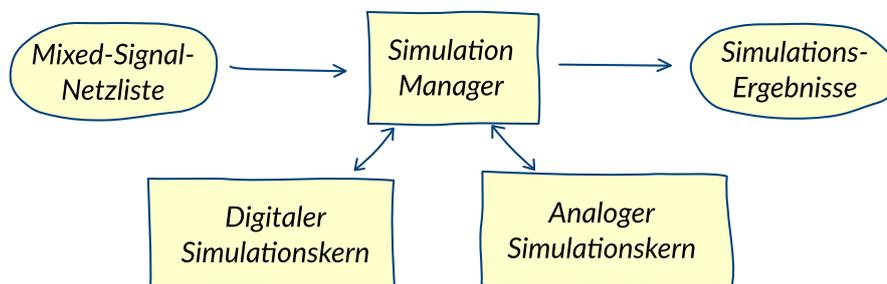
So erweiterte Analogsimulatoren beinhalten analoge Beschreibungen digitaler Elemente und liefern Simulationsergebnisse ohne Präzisions- und Laufzeitverluste. Nicht ohne weiteres universell einsetzbar sind dagegen erweiterte Digitalsimulatoren. Für sie müssen die analogen Bauteile je nach Anwendung mit den Beschreibungsmöglichkeiten des Simulators digital modelliert werden.

## Mixed Signal Simulation: Kopplung von Simulatoren

### Kopplung von Simulatoren

Zur Kopplung von Simulatoren werden benötigt:

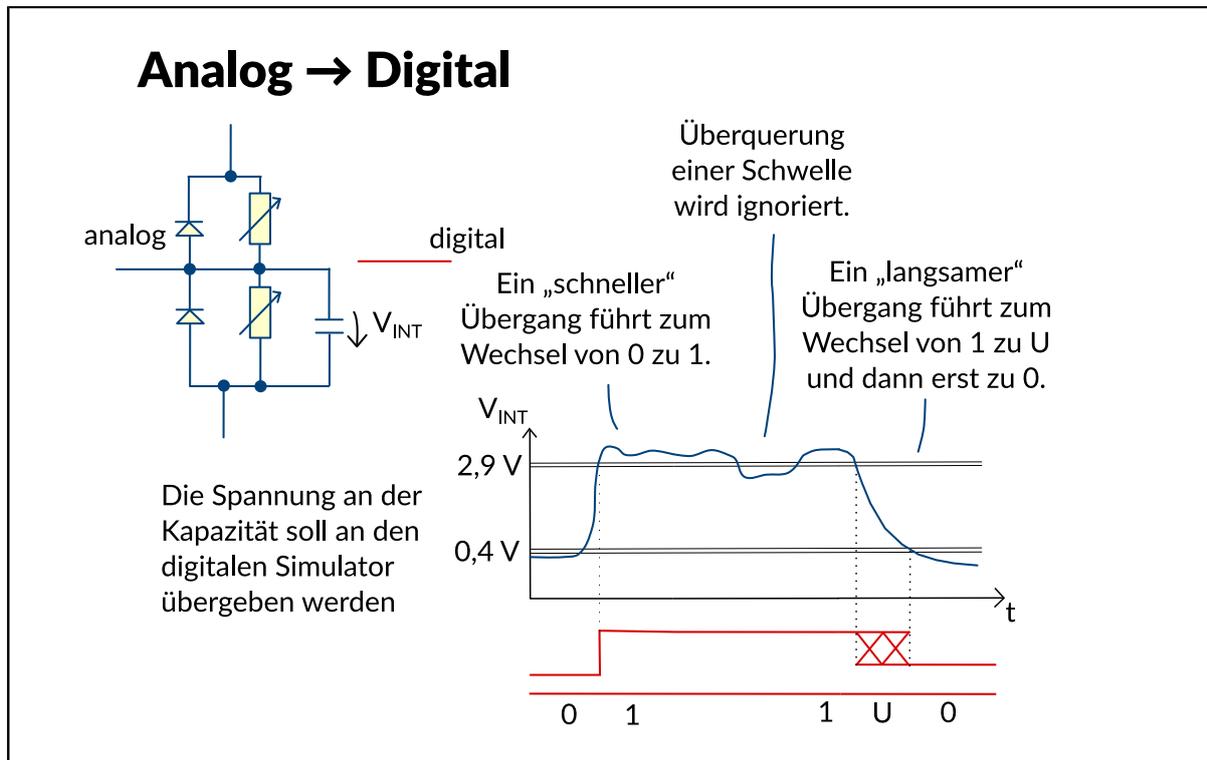
- Signalkonverter für Datenaustausch
- Übergeordneter Prozess zur Timingkontrolle (Zeitschrittsynchronisation)



Ein weiterer Ansatz ist die lose Kopplung eines digitalen mit einem analogen Simulator. Allgemein ist es hier notwendig, jeden Verbindungspunkt zwischen Analog- und Digitalsimulator über eine Konverterstruktur zu führen. Durch die dort erfolgende Wertkonvertierung werden die digitalen auf analoge Signale und die analogen auf digitale Signale abgebildet.

Die Kopplung wird durch einen übergeordneten Prozess vorgenommen, der den Datenaustausch kontrolliert. Seine Aufgabe besteht in der Synchronisation beider Simulatoren, die durch eine Abstimmung der Zeitschritte in den Berechnungen erfolgt (Zeitschrittsynchronisation). Zusätzlich kann durch diesen Prozess auch eine einheitliche Netzlistenverwaltung implementiert werden.

## Mixed Signal Simulation: Analog nach Digital



Die Schnittstelle von der analogen zur digitalen Welt gestaltet sich vergleichsweise einfach. Im Allgemeinen verbindet man logische Zustände mit definierten Spannungen (beispielsweise 0 V für logisch Null und 3.3 V für logisch Eins). In der Praxis wird ein bestimmter Grenzwert (Threshold-Spannung) für die interne Spannung an der Schnittstelle definiert, ab der sich ein Zustandswechsel vollzieht. Tritt während der Simulation eine Grenzwertüberschreitung auf, wird für den Digitalsimulator ein entsprechendes Ereignis (Event) erzeugt.

Durch Definition von zwei Grenzwerten ist es zusätzlich möglich, den im Digitalen verwendeten U-Zustand (unsicherer Zustand) einzuführen. Betrachtet man die oben dargestellte beispielhafte Konvertierung, so erfolgt bei einem hinreichend schnellen Anstieg der Spannung über die Grenzwerte von 0,4 V nach 2,9 V ein Zustandswechsel von logisch 0 nach logisch 1. Bei langsamen Transitionen wird jedoch der U-Zustand generiert.

Modifiziert man den vorgestellten Ansatz, ist es möglich, Gatter mit Hysterese-Eingängen nachzubilden. Ein Signalwechsel von Null nach Eins erfolgt hier bei einem Grenzwert von 2,9 V. Befindet sich das Gatter im Logisch-1-Zustand, erfolgt der Wechsel zu Null jedoch erst wieder bei einem Spannungswert von 0,4 V. Als Gatter mit einer derartigen Hysterese sei beispielsweise ein einfacher Schmitttrigger genannt.

## Mixed Signal Simulation: Digital nach Analog

### Digital → Analog

Probleme:

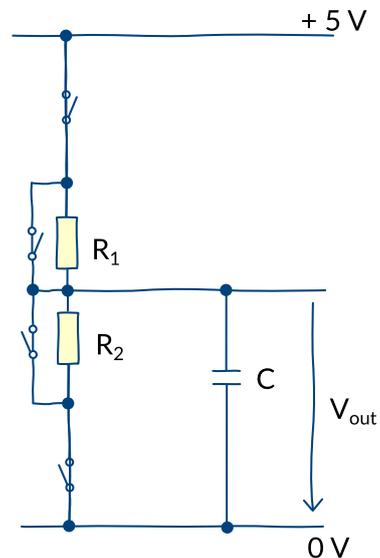
„Digitale Sprünge“ führen zu numerischen Problemen im Analsimulator.  
→ Modellierung der Übergänge durch Flanken mit endlicher Steigung.

Behandlung des X-Zustands.

→ X-Zustand muss in realen Wert umgewandelt werden.

Behandlung des U- und Z-Zustandes:

Digital	R1	R2	V <sub>out</sub>
0	hoch	niedrig	nahe 0V
1	niedrig	hoch	nahe 5V
U	niedrig	niedrig	nahe 2,5V
Z	hoch	hoch	hochohmig



Die Konvertierung digitaler in analoge Signale gestaltet sich schwieriger, da am Analogteil nicht einfach die digitalen Signalsprünge umgesetzt werden können. Die resultierenden Unstetigkeiten im Signalverlauf könnten durch die numerischen Verfahren des Analsimulators nicht behandelt werden. Stattdessen müssen beim Signalwechsel fallende bzw. steigende Flanken modelliert werden, die in ihrem Verlauf der verwendeten Technologie angepasst werden können. Weiterhin ist es wünschenswert, die digitalen Signalwerte U, X und Z (hochohmiger Ausgang) in die Betrachtung mit einzubeziehen.

Der nicht bekannte Zustand X (das Signal sei 1 oder 0) ist in den analogen Modellen nicht vorhanden. Zu seiner Abbildung in ein analoges Signal existieren einfache Wege, die je nach Einsatz und Anwendung gewählt werden. So wird X beispielsweise als mittlerer Pegel oder als 0- oder 1-Pegel behandelt, der letzte bekannte Wert des Knotens wird beibehalten oder 0- oder 1-Pegel werden willkürlich zugewiesen. Allerdings sind die so gewonnenen Simulationsergebnisse für die Gesamtschaltung zweifelhaft. Zumindest sollte der Entwickler beim Eintreffen eines nicht bekannten Zustands an der Schnittstelle eine Warnung erhalten, wodurch ihm Gelegenheit gegeben wird, den digitalen Teil der Schaltung so zu dimensionieren, dass dieser Zustand die Schnittstelle nicht erreicht.

Der unsichere Zustand "U" kann besser abgebildet werden, z.B. durch einen mittleren Spannungspegel.

Ein hochohmiger Zustand impliziert, dass zwischen dem treibenden Gatter und der Schnittstelle ein offener Schalter existiert. Eine praktische Umsetzung einer Schnittstelle, die den Z-Zustand mit einbezieht, ist oben dargestellt. Die Widerstände R1 und R2 werden abhängig vom gewünschten Zustand geschaltet. Wählt man für R1 einen großen und für R2 einen kleinen Wert entsprechend des Ausgangswiderstandes des Logik-Gatters, so stellt sich eine Ausgangsspannung nahe 0 V ein. Dies entspricht einem Logisch-0-Zustand. Für eine logische 1 werden R1 und R2 umgekehrt gewählt. Sind beide Widerstandswerte groß, ist der Ausgang praktisch vom Digitalteil getrennt und somit hochohmig. Weiterhin kann die Ausgangskapazität des Logikgatters durch die Kapazität C modelliert werden.

## Mixed Signal Simulation: Zeitschrittsynchronisation

### Zeitschrittsynchronisation

- Kopplung analoger und digitaler Simulatoren erfordert Synchronisation der ereignis- und zeitschrittorientierten Abläufe.
- Einfache aber langsame Lösung:
  - Analoge Zeitschritte → Digitale Ereignisse
- Schnelle aber schwierige Lösung:
  - Ereignisgesteuerter Analogsimulator
- Schnellere Lösungen:
  - Lockstep-Algorithmus
  - Backtracking-Algorithmus

Ein weiteres Problem bei der Kopplung analoger und digitaler Simulatoren stellt die Synchronisation der ereignis- und zeitschrittorientierten Simulationsabläufe dar. Sie muss dafür Sorge tragen, dass die Geschwindigkeit eines digitalen Simulators erhalten bleibt, ohne dass für das Schaltverhalten wesentliche Signale im analogen Bereich ignoriert werden. Die einfachste Form der Synchronisation der Zeitverwaltung besteht darin, die Zeitschrittsteuerung des Analogsimulators auch auf den digitalen Bereich zu übertragen. Diese Art der Verbindung ist leicht durchzuführen und liefert darüber hinaus die aus der Analogsimulation gewohnt präzisen Ergebnisse. Sie hat aber den Nachteil, dass der Simulator extrem langsam wird.

Die Angleichung der analogen Simulation an die Ereignissteuerung verspricht eine Simulationsgeschwindigkeit, die der Leistungsfähigkeit digitaler Simulatoren entspricht. Allerdings ist sie nur sehr schwer zu verwirklichen, denn die Ereignissteuerung basiert auf der Tatsache, dass eintreffende Ereignisse - im Gegensatz zu analogen Signalen - vorausberechenbar sind. Im Folgenden werden zwei Ansätze vorgestellt, die eine solche Synchronisation näherungsweise verwirklichen.

## Mixed Signal Simulation: Lockstep/Backtracking

### Lockstep / Backtracking

#### Lockstep-Algorithmus:

- Ein Zeitraster wird für beide Simulatoren vorgegeben.
- Der Analogsimulator führt bei Konvergenzproblemen zusätzliche Zwischenschritte durch.
- Bei digitalen Ereignissen zwischen vorgegebenen Zeitschritten:  
→ Anpassung der Zeitschritte für beide Simulatoren.

#### Backtracking-Algorithmus:

- Die Simulatoren arbeiten zunächst unabhängig voneinander.
- Digitale Events, die den Analogteil beeinflussen, lösen ein Backtracking aus: Analoge Simulationsergebnisse werden zum Teil verworfen und die Simulation wird zu einem Zeitpunkt vor dem digitalen Ereignis neu gestartet.

Der Lockstep-Algorithmus gibt beiden Simulatoren ein festes Zeitraster vor. Sowohl Analog-, als auch Digitalsimulator werten ihren Schaltungsteil im Regelfall zu gleichen Zeitpunkten aus. Werden jedoch bei der Analogsimulation zusätzliche Zwischenschritte benötigt, um Konvergenzprobleme oder Rundungsfehler handhaben zu können, werden diese durchgeführt. Treten umgekehrt zwischen den Zeitschritten digitale Ereignisse auf, werden die Intervalle des Lockstep-Algorithmus für beide Simulatoren entsprechend angepasst.

Beim Backtracking-Ansatz werden beiden Simulatoren keine festen Zeitschritte vorgegeben. Der Analogsimulator ist zunächst unabhängig vom Auftreten digitaler Events, wodurch gegenüber dem Lockstep-Algorithmus ein Zeitgewinn zu verzeichnen ist. Treten jedoch digitale Events auf, die direkt die analoge Schaltung beeinflussen, muss ein Teil der bereits ermittelten Simulationsergebnisse verworfen werden und zu einem Zeitpunkt vor dem digitalen Event zurückgesprungen werden (Backtracking).

Das Backtracking bietet insbesondere auf Mehrprozessorsystemen Vorteile, da beide Simulatoren weitgehend unabhängig arbeiten und dadurch jeweils eine CPU für sich optimal ausnutzen können. Bei Schaltungen mit besonders großer Interaktion zwischen dem Digital- und dem Analogteil wird die Performance jedoch wiederum reduziert, da durch das Backtracking Simulationen wiederholt werden müssen. Ein weiterer Nachteil sind die relativ großen Datenmengen, die pro Simulationsschritt vorgehalten werden müssen. Um eine Berechnung zu einem früheren Zeitpunkt durchführen zu können, muss jeweils die vollständige Schaltung gespeichert werden.