

Verhaltensmodelle von Smart Power Switches – Ein Beitrag zur effizienten Systementwicklung.

*Behavioural Models of Smart Power Switches –
A contribution to efficient System Design*

Dieter Metzner, Jürgen Schäfer, Chihao Xu
Infineon Technologies AG
Postfach 800949 , D-81609 München

Zusammenfassung:

Anhand einiger Anwendungsbeispiele wird der Nutzen der Simulation in der Entwicklung von elektronischen und mechanischen Systemen der KFZ Entwicklung dargestellt. Die Basis einer aussagekräftigen Simulation bilden dabei adäquate Verhaltensmodelle der Einzelkomponenten, die im Idealfall vom Komponentenzulieferer bereitgestellt werden.

Eine Schlüsselrolle spielen hier die Smart Power –Komponenten, intelligente Halbleiterschalter welche einerseits bestehende Relais-, und Sicherungskonzepte ablösen, andererseits neue Anwendungsfelder erschließen. Der Beitrag von Infineon hierzu ist eine sich stetig vergrößernde Modellbibliothek auf Basis des in der Automobilindustrie verbreiteten SABER Simulators.

Summary:

On the basis of several application examples the potential of electronic and mechatronic system simulation in the automotive systems development is demonstrated. Hereby adequate behavioural component models are required from the component manufacturer, especially in the field of Smart Power Switches.

These semiconductor devices are presently substituting conventional electromechanical solutions such as relays and fuses, but are also making new applications feasible. Infineons contribution to integrate the simulation into the design process is a steadily increasing model library based on the SABER simulation tool which is widely accepted in the Automotive industry.

1.) Einleitung:

Die Entwicklung von elektronischen Systemen für Automobilanwendungen ist u.a. durch folgende Trends gekennzeichnet: Reduktion der Entwicklungszeiten und -kosten, zunehmend vernetzte und komplexere Systeme, verringerte Dimensionierungsreserven (z.B. thermisch).

Auf Seiten der Zulieferindustrie ist zunehmend Systemkompetenz gefordert. Die Gesamtsystem-betrachtung umfaßt dabei Performance und Kosten gleichermaßen. Integrierte CAE Tools werden derzeit. aber nur selten eingesetzt. Ein Hauptthemnis für die Integration von Simulationstools in den Designprozess ist der Mangel an entsprechenden Modellen, selbst einfachster Art. So muß der Systementwickler - will er simulieren- entweder viel Zeit aufwenden oder sich mit trivialen Aussagen zufrieden geben, womit die Simulation zum Dokumentationstool wird.

Auch deshalb häufen sich in letzter Zeit Anfragen zu Verhaltensmodellen von Anwendern der Systeme und Komponenten, es sind bereits Tendenzen zu erkennen, die Modellerstellungspflicht in Lastenhefte zu übernehmen. Dieser Wunsch ist deshalb legitim, weil das Know-How über das Verhalten beim System- /komponenten-Zulieferer liegt.

Die Vorteile, die sich auf beiden Seiten ergeben, falls adäquate Simulationsmodelle vorliegen:

- Der Zulieferer bekommt besseren Einblick in die oft komplexen Vorgänge und Anforderungen der Applikation
- Der Anwender erkennt Grenzen, Potentiale und Fehlermöglichkeiten der Komponenten im System früher.
- Damit ist eine gemeinsame Basis oder „Sprache“ für den Dialog beim Design-In zwischen Anwendern und technischem Marketing geschaffen .
- Gleiches gilt für die Produktdefinition und die frühe Konzeptphase, um Anforderungen und Machbarkeit abzustimmen

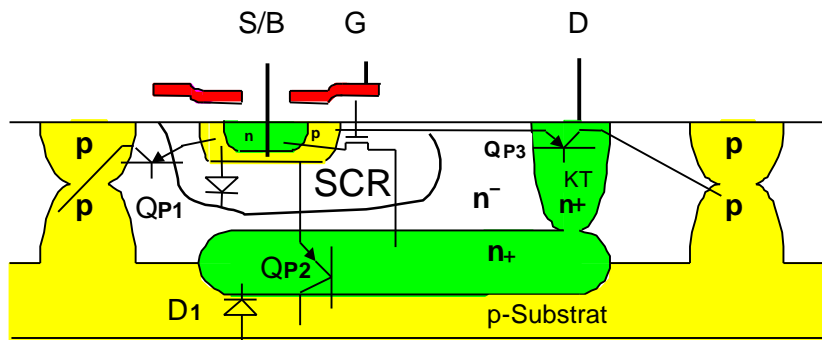
Um diesem Trend Rechnung zu tragen, wurde bei Infineon eine **Modellbibliothek für Smart Power Switches&Bridges** entwickelt, mit deren Hilfe die wichtigsten High-Side- und ;Low-Side – Schalter sowie Brücken in der Anwendung simuliert werden können. Der Fokus wurde dabei auf den Simulator SABER gelegt, der in der Automobilindustrie aufgrund seiner Mechatronik-Eignung weit verbreitet ist.

2.) Modellierungsmethodik

Smart Power IC's werden in den verschiedensten Automobil-Anwendungen eingesetzt und dienen dort meist zur Ansteuerung von komplexen Lasten wie Motoren, Ventilen, Lampen oder Zündkerzen. Neben diesen systemspezifischen Anforderungen müssen diese Modelle, die zur Entwicklung und zur Simulation von heterogenen Systemen eingesetzt werden, ein Optimum zwischen Genauigkeit und Simulationszeit besitzen.

Aus diesen Anforderungen ergibt es sich, dass die Verhaltensmodelle von Smart Power IC's mittels zweier Prinzipien modelliert sind. Zur präzisen Nachbildung des transienten Schaltverhaltens sind die Leistungsendstufen (Power MOS-FET bzw. IGBT) und die thermodynamischen Eigenschaften der Smart Power IC's durch physikalisch basierte Kompaktmodelle modelliert. Die zur Ansteuerung der Leistungsendstufen benötigten Treiberstufen sind ebenso wie alle Schutz und Diagnosefunktionen in Form von empirischen Verhaltensmodellen modelliert. Dieser Ansatz gewährleistet eine sehr gute numerische Stabilität und eine sehr kurze Simulationszeit.

Die physikalisch basierte Modellierung bedeutet, dass das elektrische Verhalten der Leistungsendstufen durch physikalische Differentialgleichungen beschrieben ist. Bei einem Simulationsmodell für einen Power MOS-FET unterscheidet man wieder zwischen dem DC-Verhalten und dem nichtlinearen Schaltverhalten. Die DC-Charakteristik ist abhängig vom internen Kanalwiderstand, von der Driftzone und von verschiedenen parasitären Anschlusswiderständen (Source Metallisierung). Das nichtlineare transiente Schaltverhalten des Power MOS-FETs wird zusätzlich durch parasitäre Effekte, wie sie die spannungsabhängige Miller-Kapazität (zwischen Gate und Drain) hervorruft, bestimmt (Abb.1).



Neben diesen „normalen“ Betriebszuständen sind auch die Eigenschaften der parasitären Inversdiode implementiert. Auch der Lawinendurchbruch-Effekt ist in diesem Strukturelement modelliert, der an der Sperrspannungsgrenze der jeweiligen Technologie zum Tragen kommt (Abb.1).

Alle diese bisher beschriebenen Modellinhalte sind in ihrem Verhalten sehr stark von der Selbsterwärmung des Power MOS-FETs abhängig. Um die dynamische elektrothermische Wechselwirkung möglichst genau zu modellieren, ist es notwendig, die elektrischen und thermischen Eigenschaften der Leistungsendstufe zu koppeln (Abb.2). Das transiente thermische Kompaktmodell von Leistungsendstufen wird durch thermische Kapazitäten und Widerstände abgebildet, welche die verschiedenen Schichten des Halbleiters und des Gehäuses repräsentieren und direkt von der Geometrie abhängen. Um das transiente thermische Verhalten des Chips unter allen Randbedingungen und Zeitbereichen hinreichend genau abbilden zu können, muß der dreidimensionale Wärmetransport und die Selbsterwärmung im gesamten Volumen des Siliziums berücksichtigt werden. Dies ist besonders bei Mehrkanalschaltern und Brücken zu beachten.

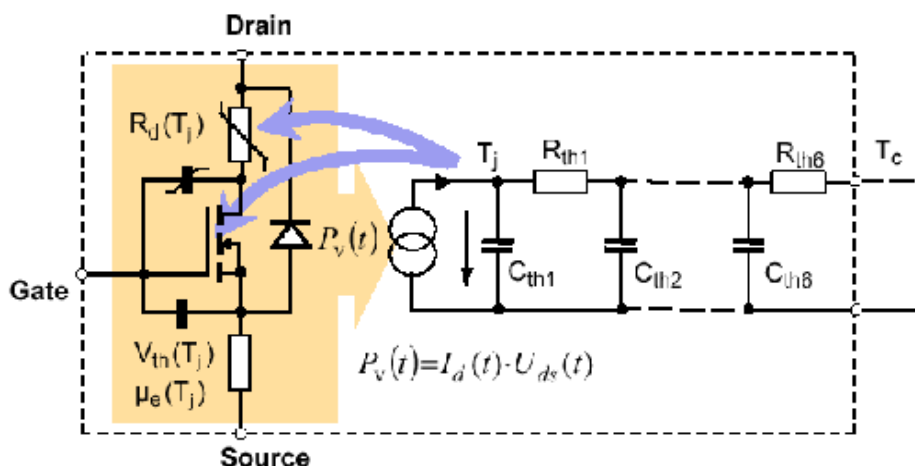


Abb. 2 Elektrothermische Kopplung eines Power MOS-FETs Modell [mmpn]

Die Grundlage zur Beschreibung des transienten Wärmeflusses ist die dreidimensionale Diffusionsgleichung:

$$\mathbf{l} \cdot \text{div}(\text{grad}(T(x, y, z))) = p - c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Um nun ein implementierbares Kompaktmodell zu erhalten, wird die dreidimensionale Lösung der partiellen Differentialgleichung in ein Netzwerk aus den oben genannten thermischen Widerständen und Kapazitäten abgebildet (Abb.3). Hierzu wird mittels einer Finiten Elemente Simulation die Lösung (thermische Sprungantwort) der partiellen Differentialgleichung bestimmt, die die oben genannten Effekte beschreibt. Angelehnt an die simulierten Wärmepfade wird nun die Struktur des eindimensionalen Kompaktmodells aufgestellt, dessen Parameter anfangs unbestimmt sind. Diese werden mit einem Optimierungsalgorithmus an die thermische Sprungantwort angepasst. (Abb.3).

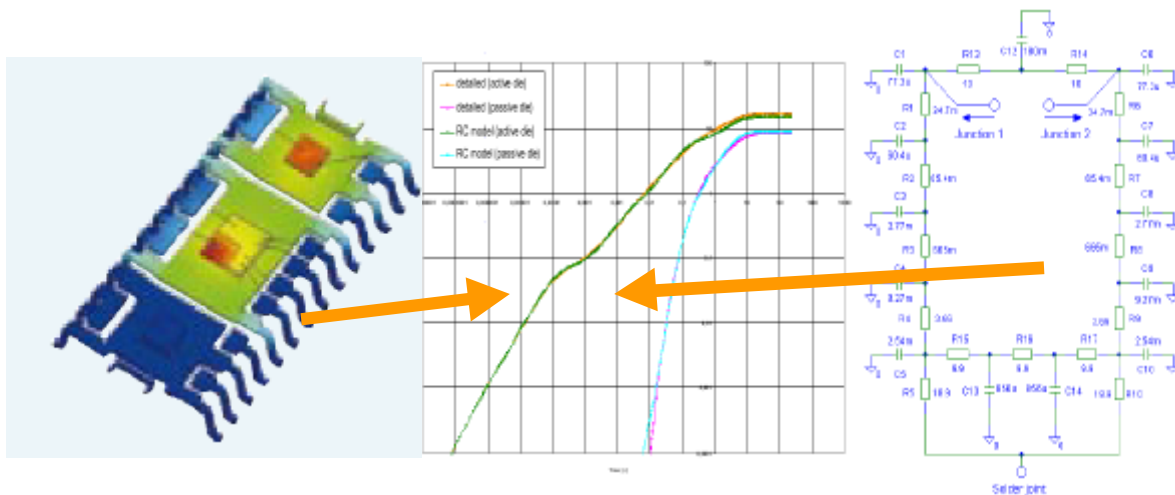


Abb. 3 Parameterextraktion aus einer Finiten Elemente Simulation [noe]

Treiberstufen bzw. Schutz- und Diagnosefunktionen werden in Smart Power ICs mit analogen Schaltungen realisiert und bestehen in der Regel aus einer Vielzahl einzelner Transistoren. Die prinzipielle Wirkungsweise der Schutz- und Diagnosefunktionen beruht auf dem Prinzip der rückgekoppelten Regelschleife (Abb.4). Speziell die Simulation solcher Konzepte auf Transistorlevel (BSIM Modelle) ist in sehr vielen Fällen aufgrund der vielen nichtlinearen Elemente numerisch sehr instabil und langwierig. Um nun ein Optimum zwischen Genauigkeit, Simulationszeit und numerischer Stabilität zu erlangen, wurde für diese Funktionen der „Mixed Signal“ Verhaltensmodellansatz gewählt. Bei diesem Ansatz werden die einzelnen Komparatoren, Stromspiegel und Verstärker mit einer höheren Modellierungssprache empirisch nachgebildet (Beispiel1).

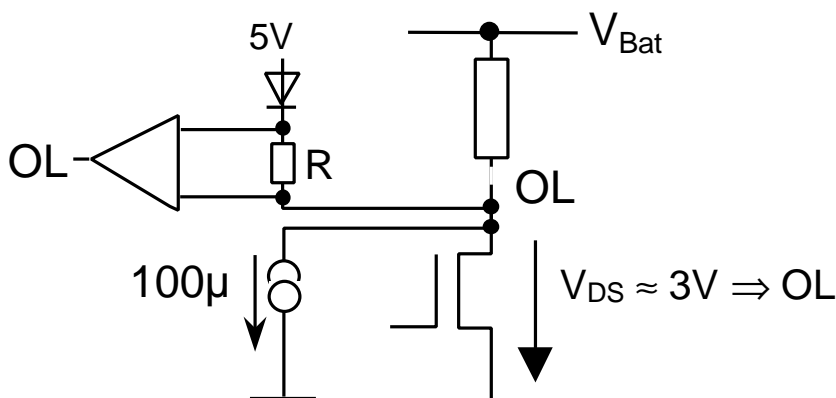


Abb. 4 Prinzipschaltung der Open Load Erkennung

```

### threshold induced change of opldq status only during off-command
when(threshold(v(vbat,ol),3.0,before,after)) {
    if((after==1) & (on==l4_0)) {
        schedule_event(time,opldq,l4_1)
    }

    else if((after==1) & (on==l4_0)) {
        schedule_event(time,opldq,l4_0)
    }
}

```

Beispiel 1: Empirisches Modell der Open Load Erkennung

Neben den oben beschriebenen analogen Schaltungskonzepten besitzen die Smart Power ICs verschiedene digitale Eingangs- und Statusschaltungen. Als markantes Beispiel hierfür kann man die SPI (Serial Parallel Interface) nennen. Die Modellierung der digitalen Funktionsblöcke erfolgt ausschließlich mit digitalen Anweisungen einer Höheren Modellierungssprache. Diese Sprachelemente nutzen nur den „Event gesteuerten“ Lösungsalgorithmus eines Netzwerksimulators und die entsprechenden Modelle sind numerisch sehr stabil und benötigen nur sehr kurze Rechenzeiten.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen unterschiedlichen Modellierungsmethodiken ermöglichen ein Optimum zwischen Genauigkeit und Rechenzeit. Durch diesen Ansatz wird die Simulationszeit vom Transistorlevelmodell zum Verhaltensmodell um den Faktor 2000 herabgesetzt und ermöglicht so erst den effizienten Einsatz von Smart Power Simulationsmodellen in der Systementwicklung.

3.) Beispiele

A) Highside-Lampenschalter:

Beim Schalten von Lampen im KFZ bietet der Einsatz von intelligenten Highside Schaltern neben der Sicherungsfunktion den Vorteil einer möglichen Einschaltstrombegrenzung und damit einer höheren Lampenlebensdauer.

Ohne die Strombegrenzungsfunktion des Schalters sind gegenüber dem Lampen-Nennstrom bis zu zehnfach überhöhte Einschaltwerte meßbar.

Ein Konflikt ergibt sich hier im Zusammenhang mit der Erkennung und Unterscheidung einer solchen kapazitiven Charakteristik vom Kurzschlußfall: Wenn das Schutzkonzept ein dauerhaftes Abschalten im Kurzschluß vorsieht, darf die Schuttschwelle beim Einschalten nicht erreicht werden. Andererseits nimmt die Robustheit gegen Kurzschluß mit steigendem Schutzlevel (Begrenzungsstrom) ab.

Dieser Konflikt kann durch einen PWM-Einschaltvorgang gelöst werden: Bevor die interne Kurzschlußerkennung aktiv wird, wird der Laststrom per Steuerbefehl wieder abgeschaltet. Der folgende Einschaltvorgang weist aufgrund der inzwischen erwärmten Lampe bereits geringere Stromüberhöhungen auf. Nach einer geringen Anzahl von Pulsen ist der Stromlevel soweit abgeklungen, daß die Begrenzung inaktiv bleibt. Bei dieser Betriebsart stellt sich u.a. die Frage nach der thermischen Belastung des Halbleiters, die nur mit Hilfe der Simulation beantwortet werden kann (Abb 5). Neben dem Verhaltensmodell des Highside Schalters wird hierfür ein Lampenmodell benötigt, das den realen Einschaltstromverlauf wiedergibt.

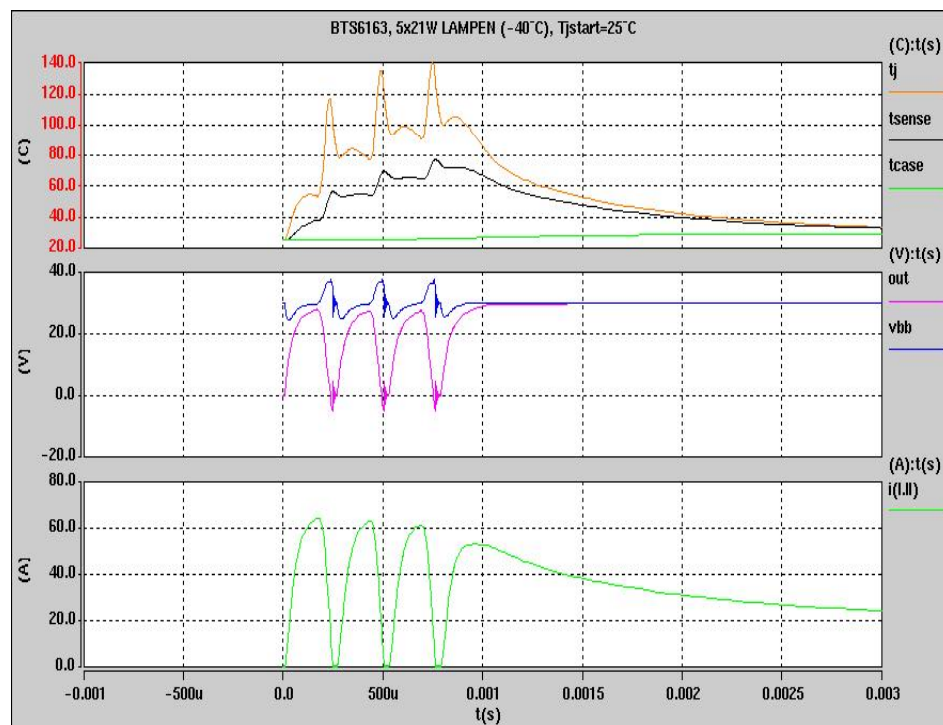
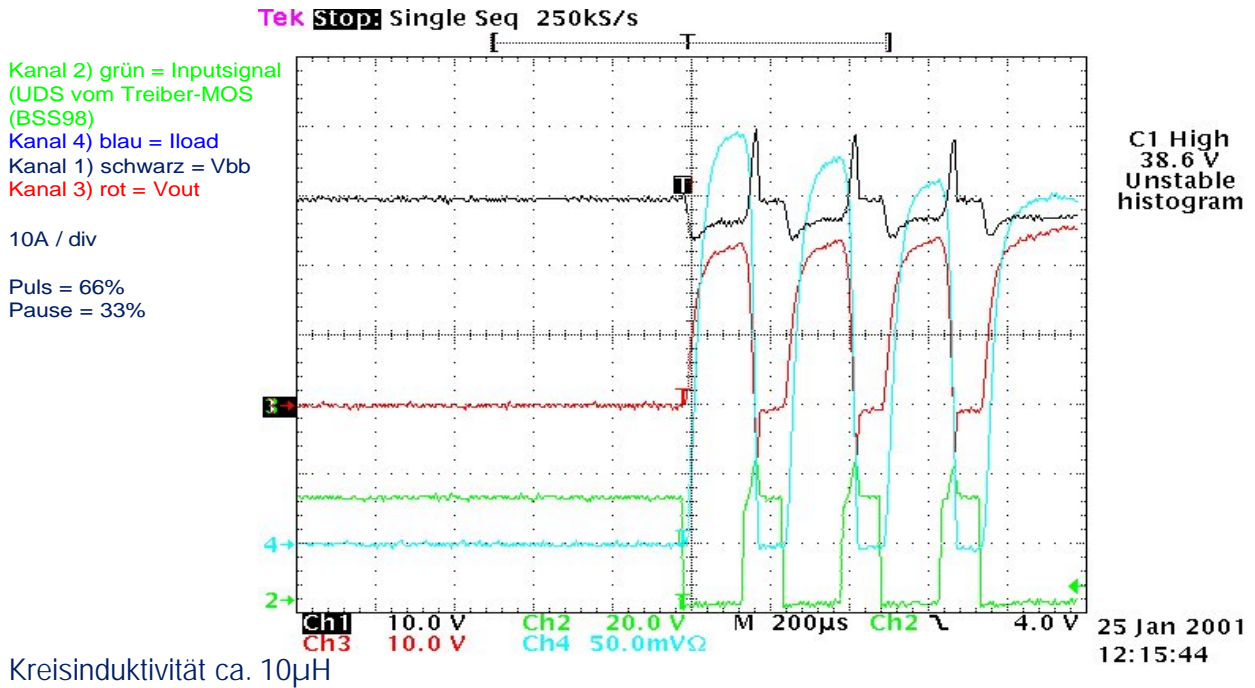


Abb. 5: Antakten einer Lampe, Signale (oben: Messung – unten: Simulation), Signale:

Tj:	Sperrschicht –Temperatur,
Tsense:	Temperatur des Sensors zur Abschaltung bei thermischer Überlastung
tcase:	Temperatur am Gehäuseboden,
out:	Spannung über der Lampe,
vbb:	Batteriespannung inclusive Einfluß der Netzimpedanz,
i(I):	Lampenstrom.Kurzschlußfestigkeit von Hochstromschaltern

B) Kurzschlussfestigkeit von Hochstrom-Schaltern

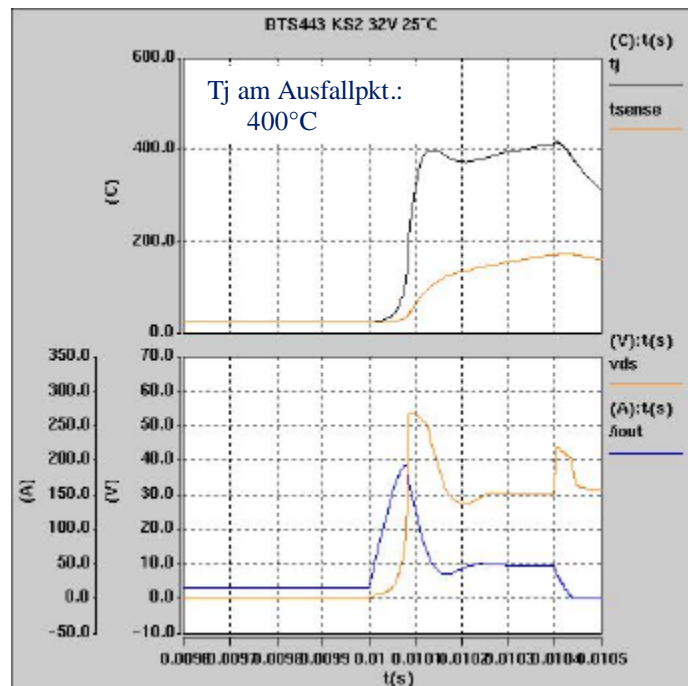
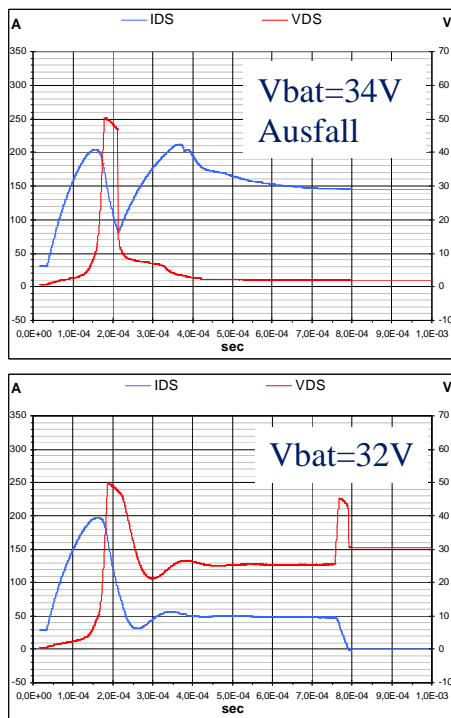
Tritt an einer Last während der Einschaltdauer ein Kurzschluß auf, so wird dieser in der Regel über einen Anstieg der Durchlaßspannung am Schalter erkannt (U_{ds} – Erkennung). Die resultierende Verzögerung ermöglicht zunächst einen Anstieg des Kurzschlußstromes, der nur durch die Impedanz des Kurzschlußpfades begrenzt ist. Bei erkanntem Kurzschluß muß nun das MOS Gate des Leistungstransistors schnell entladen werden, um die Verlustleistung am Schalter zu begrenzen.

Wird diese Verlustleistung zu hoch (wie es durch überhöhte Batteriespannungen in Abb. 6 simuliert wird) ist die Grenze der Kurzschlussfestigkeit erreicht und der Schalter wird thermisch zerstört wie es beim Vergleich der Messungen mit Simulationen deutlich wird.

Dies ist erfahrungsgemäß bei einer Sperrschichttemperatur von 350°C bis 400°C der Fall. Der zugrundeliegende Mechanismus ist die Erhöhung der Eigenleitungsträgerdichte von Silizium mit der Temperatur, d.h. das Material verliert seine Spannungsfestigkeit. Dieser Effekt ist in der Simulation nicht berücksichtigt, jedoch gibt das Verhaltensmodell beim Überschreiten der Zerstörungstemperatur eine entsprechende Meldung aus.

Die zulässige Dauertemperatur liegt lt. Datenblatt bei 150°C, so daß im Kurzschlußfall meist immer eine Temperatur vorliegt, die bei periodischem Auftreten die Lebensdauer des Schalters reduziert.

Mit Hilfe der Simulation können so anstelle go/no go-Aussagen Belastungen quantifiziert werden.



Thermisches Modell ohne Bonddrähte / Preßmasse

Abb. 6: Elektrothermische Simulation eines Kurzschluß 2 an der Ausfallgrenze (zwischen 32V und 34 Volt Batteriespannung) und Vergleich mit der Messung

C.) TrilithIC Motorbrücke im Überlast bzw. Blockbetrieb

In sehr vielen Komfortanwendungen des Kraftfahrzeugs wie Fensterheber, Sitzpositionseinstellung und elektrische Spiegeleinstellung werden Motorbrücken zur Ansteuerung von Gleichspannungsmotoren eingesetzt, die ihrerseits komplexe mechanische Systeme ansteuern. Die Systemverifikation solcher heterogenen Systeme an Prototypen erfordert einen sehr großen Zeitaufwand, da es sehr viele Betriebsfälle gibt. Eine effizientere Methode der Systemverifikation stellt die Systemsimulation dar. Die Systemsimulation bietet eine optimale Möglichkeit, die verschiedenen Korrelationen zwischen mechanischem Systemkomponenten und elektronischen Komponenten zu erkennen und zu verifizieren.

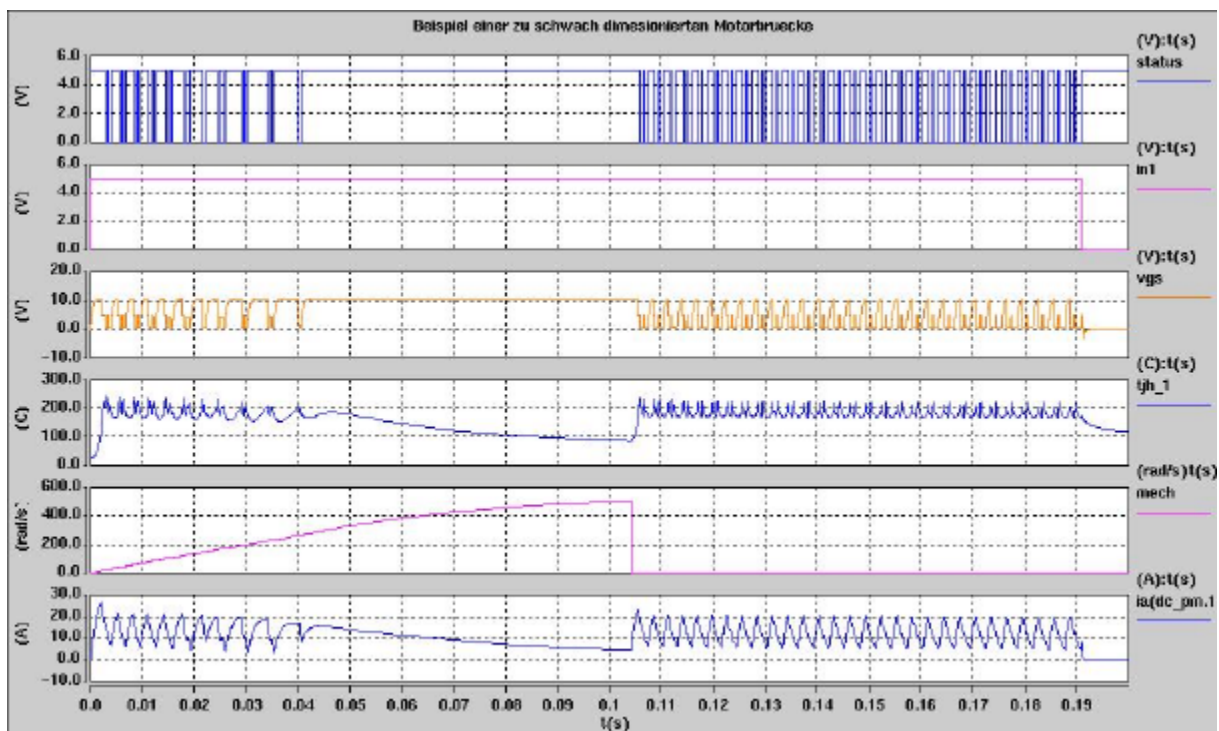


Abb. 7a: Simulation eines elektromechanischen Systems mit TrilithIC

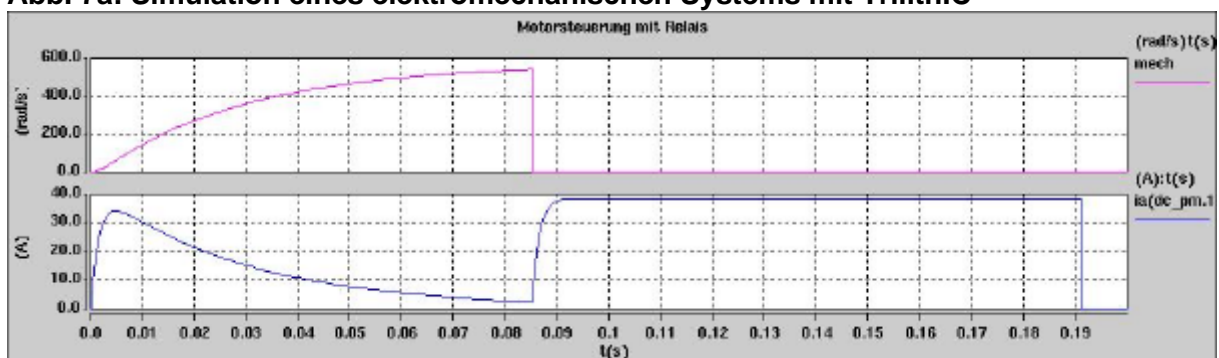


Abb. 7b: Simulation der Motorsteuerung mit Relais

In Abb.7a,b wurde ein elektromechanisches System einer Komfortanwendung simuliert. In diesem Anwendungsfall ist die Motorbrücke (TrilithIC BTS7710G) unterdimensioniert. Die Simulation (Abb.7a) zeigt einen Überlastbetrieb der Motorbrücke. Die Strombegrenzungsfunktion (Motorstrom: Signal $ia(dc_pm.1)$) bewirkt durch Reduktion

der internen Ansteuerspannung **vgs**, dass der Highside-Schalter im aktiven Bereich der Ausgangskennlinie betrieben wird. Die dadurch entstehende erhöhte Verlustleistung führt zur Selbsterwärmung des Siliziums, so dass der integrierte Temperatursensor die Motorbrücke wieder abschaltet. Unterschreitet die Sperrschichttemperatur **Tjh_1** des Highside-Schalters einen bestimmten Schwellwert, wird der Schalter wieder eingeschaltet. Durch die Wiederholung dieses Vorgangs wird die Motorbrücke effektiv in PWM betrieben. Dies verhindert zwar die Überlastung des Motors und die Zerstörung des Halbleiters, jedoch wird der Anlaufvorgang deutlich gegenüber der Relaislösung (Bild7b) verlangsamt (Nenn Drehzahl **mech**).

Weiterhin lässt sich aus den Simulationsergebnissen aus Abb.7a,b erkennen, dass im Blockbetrieb des Gleichstrommotors (mechanischer Anschlag, **mech=0**) die Motorbrücke wieder in der Strombegrenzung betrieben wird. Die dadurch entstehende Temperaturabschaltung hat das sogenannte thermische „Toggeln“ zur Folge, was die Motorbrücke und den Gleichstrommotor vor der Zerstörung schützt. Die Motorbrücke toggelt so lange, bis über ihren CMOS Eingang **in** abgeschaltet wird. Die Erkennung des Überlastfalles durch den Systemcontroller ist über den Statusausgang **status** der Motorbrücke möglich (Abb 7a).

D.) TrilithIC Motorbrücke in Kurzschlussbremsung

In sehr vielen Motorbrücken Anwendungen wird die Motorbrücke zur Kurzschlussbremsung verwendet. Dabei wird zum Anhalten des Gleichstrommotors nicht gleichzeitig der Highside- und der Lowside-Schalter abgeschaltet, sondern der Lowside-Schalter wird verzögert abgeschaltet **in3** (Abb.8). Bei Anwendung dieser Maßnahme muß die gesamte im System gespeicherte Energie (magnetische Energie der Motorinduktivität sowie kinetische Energie der mechanischen Last) in den beiden Lowside-Schaltern der Motorbrücke in Wärme umgesetzt werden (Abb.8). Da einer der beiden Schalter als Rückwärtsdiode betrieben wird (**idio (body_draind.1)**), ist dort die Verlustleistung am größten (**el_pow_k(body_draind.1)**).

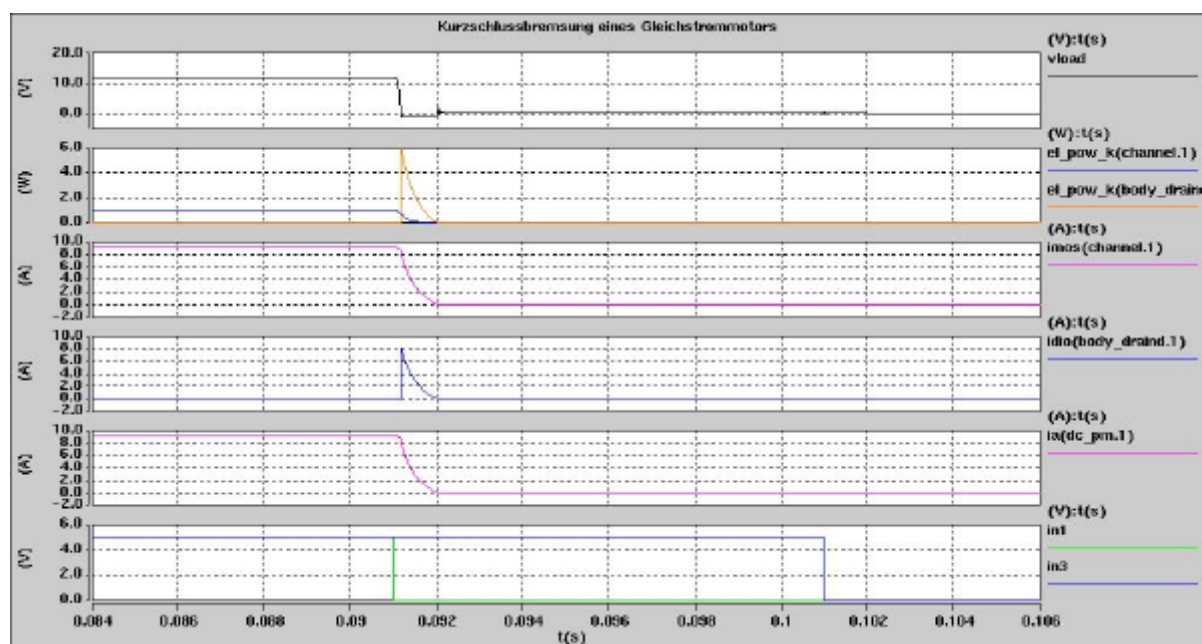


Abb. 8 Simulation der Kurzschlussbremsung

E) EMV-Analyse

Auch die Beurteilung der leitungsgebundenen EMV-Aspekte ist mit Verhaltensmodellen möglich. In folgenden Beispielen wird einerseits die Robustheit eines High-Side-Schalters gegenüber Störungen auf der Versorgungsleitung untersucht (1), andererseits die starke Abhängigkeit der Schaltflanken (=Störaussendung) von den Lastverhältnissen (2).

(1) Der beherrschende Effekt bei der Störeinstrahlung ist die Ladung der Miller-Kapazität, die jedem MOS Transistor anhaftet: So entsteht am Ausgangstransistor ein kapazitiver Spannungsteiler, der u.a. das Gatepotential verschiebt. Im Extremfall (Abb. 9) kommt es bei ausgeschaltetem MOS Transistor zu einer Anhebung bis in den Bereich der Schwelle und damit zum parasitären Einschalten des Bauelements.

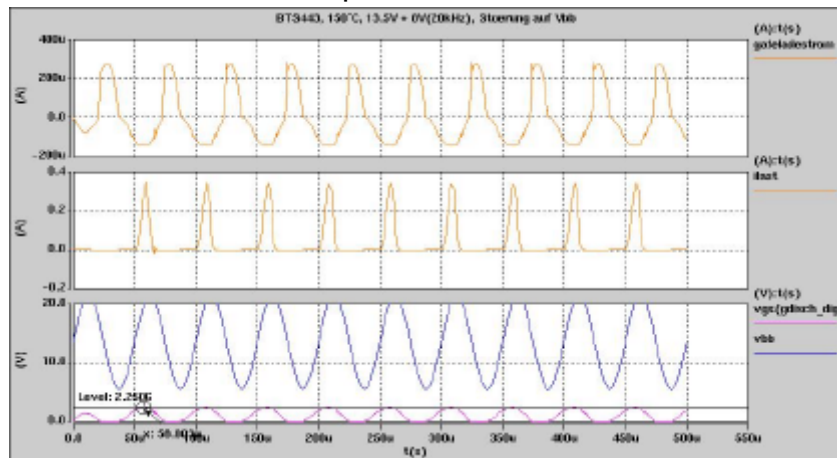


Abb. 9: Störung auf der Versorgungsleitung $V_{ss}=16V$, 20kHz, 1V/us

(2) Abb. 10 zeigt den starken Einfluß der Lastimpedanz auf die Schaltflanken: Während mit rein ohmscher Last (gestrichelt) eine Kontrolle der dV/dt Charakteristik über das MOS-Gate möglich ist (und damit eine Begrenzung der Störaussendung), entzieht sich beim Abschalten induktiver Lasten die Spannungsflanke einer effektiven Kontrolle (durchgezogen).

Ohne Freilaufdiode erreicht die Ausgangsspannung während des Abkommutiervorganges den Wert $V_{out} = V_{bat} - V_{clamp}$, wobei V_{clamp} durch die aktive Gateklemmung des Schalters gegeben ist (Überspannungsschutz). Mit Erreichen des stromlosen Zustandes springt die Ausgangsspannung mit hohem dV/dt auf Null zurück, wobei die Miller – Kapazität zusammen mit der Lastinduktivität einen Schwingkreis bildet.

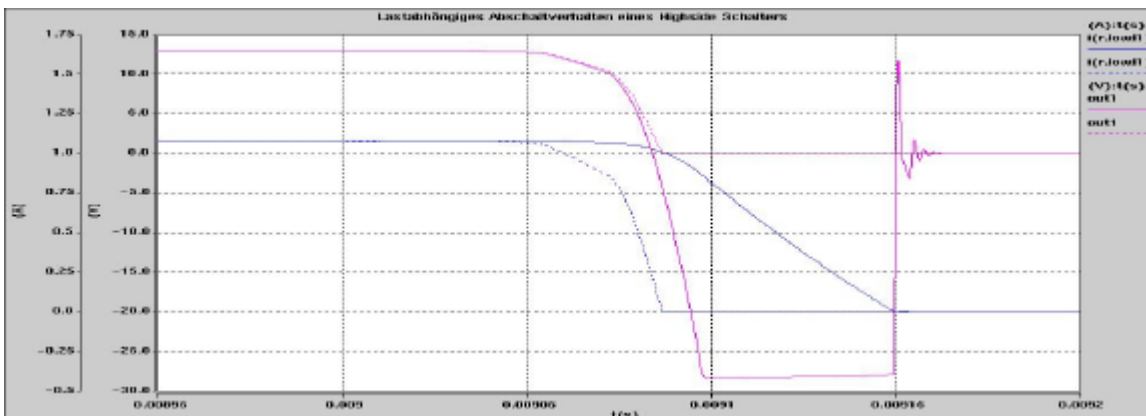


Abb. 10: Ausgangsspannung beim Abschalten ohmscher bzw. induktiver Lasten

4.) Einsatz in der Systemsimulation

Die Smart Power Schalter und Brücken sind Dank ihrer schnellen Entwicklung ein wesentlicher Treiber und Differenzierungsfaktor für die Automobilelektronik. Um mit der schnellen Entwicklung im Smart Power Bereich Schritt zu halten, bietet die Systemsimulation ein hoch effektives Werkzeug, schnell und optimal ein neues leistungselektronisches System zu entwerfen.

Ein System im Auto enthält neben Leistungshalbleitern auch diskrete Elemente, Controller und Lasten. In der Automobil-Anwendung sind verschiedenste Lasten vorhanden. Als Beispiele sind zu nennen: Ventile, Motoren, Lampen, Heizer etc.. Für diese Lasten, die meistens in großem Volumen hergestellt werden und in mehrerer Applikationen auftauchen, gibt es inzwischen eine Reihe von Modellen. Damit ist eine Systemsimulation gut durchführbar.

Ein System beinhaltet verschiedene Domänen wie elektrische Größen, Wärmehaushalte, mechanische Umsetzung etc.. Diese verschiedenen Domänen werden über Modelle bzw. Grundgleichungen wie Energieerhaltung miteinander gekoppelt. Dementsprechend gewinnt man auch verschiedene Größe wie Chip Temperatur, elektromagnetische Kraft etc., die nicht messbar sind.

Numerisch gesehen ist das System ein gewöhnliches Differentialgleichungssystem, das mit einem Netzwerk-Simulationsprogramm wie Saber aufgelöst wird. Die Smart Power Bauelemente wurden ebenfalls mit Hilfe von Simulation basiert auf Transistormodellen entwickelt. Durch die Abstraktion der Verhaltensmodelle werden die Beschreibung der Smart Power Bauelemente so weit vereinfacht, dass die Rechenzeit gegenüber einer Beschreibung der Schaltung auf Transistorebenen drastisch reduziert wird. Bei einem einfachen System bestehend aus Smart Power Schalter und der Lampe als Last wird die CPU-Zeit um einen Faktor von 100 reduziert. Bei einem komplexen System wird der Unterschied noch deutlich größer.

Der schnelle Durchlauf ermöglicht nicht nur die Analyse des Systems, sondern auch eine optimale Dimensionierung der Bauteile sowie statistische Vorhersagen. Im Zuge der weiteren Entwicklung auf dem Gebiet der Simulation ist zu erwarten, dass die Designs in Zukunft auch zentriert werden.

5.) Modellparametrierung und -validierung

Da die Verhaltensmodelle das – gemäß Datenblatt – typische Bauelemente-Verhalten wiedergeben sollen werden zur Parametrierung in der Regel Charakterisierungsmessungen verwendet, die auch zur Datenblatterstellung bzw. Typenprüfung verwendet werden. In ausgewählten Fällen werden worst-case Parameter Sätze zur Verfügung gestellt, die die Streuung der wichtigsten Kennwerte beinhaltet. Da die Modelle jedoch teilweise physikalisch begründet sind, sind Kennwerte oft miteinander korreliert, was eine realistische worst-case Betrachtung erschwert.

Diejenigen Modellteile, welche durch Verhaltensbeschreibung implementiert sind, müssen nicht ausdrücklich validiert werden, da ihre Parameter bereits durch Anpassung an Meßkurven gewonnen wurden.

Bei den andererseits physikalisch motivierten Teilen wie DMOS und thermisches Modell werden Prozeß-, Material- und Geometrieparameter verarbeitet, so daß die Modellgüte v.a. vom Modellansatz bestimmt sind. Hier werden Messungen wie Durchlaßwiderstand der Ausgangstransistoren, ihr Schaltverhalten, Grenzbelastungen zur Modellvalidierung herangezogen.

A) Thermisches Toggeln im Kurzschluß:

Eine exzellente Methode, das thermische Modell sowie das statische (temperaturabhängige) DMOS Modell zu validieren, ist der Kurzschlußfall mit Übertemperaturabschaltung (Abb. 11):

Beim vorliegenden Leistungsschalter ist das Konzept zum Kurzschlußschutz Abschaltung solange ein Temperatursensor Übertemperatur erkennt.

Wird auf einen Kurzschluß eingeschaltet, schaltet der DMOS zunächst in den Strombegrenzungsmodus, d.h. die Gatespannung wird zurückgeregelt. Die momentane Verlustleistung führt dann zu einer Erwärmung des Transistors, welcher der Temperatursensor folgt. Überschreitet dieser eine Schwelle von 170°C, schaltet das Bauelement selbsttätig ab. Bei Unterschreitung einer Sensortemperatur von 160°C wird wieder eingeschaltet und so fort. Um den beschriebenen Fall realistisch nachbilden zu können, müssen also folgende Effekte berücksichtigt sein:

- Statische Kennlinienfelder des DMOS (abh. von der Temperatur)
- Abregelverhalten der Gateansteuerung
- Dynamisches thermisches Modell des Leistungstransistor und des Temperatursensors.

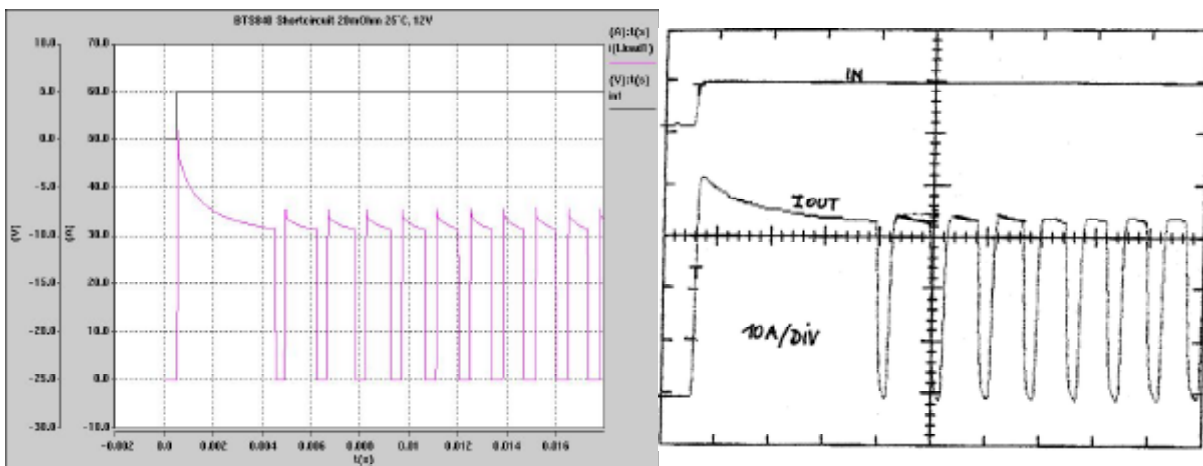


Abb.11: Einschalten auf Kurzschluss @25°C Vbat=24V (20mOhm) Messung: 10A/div, 2msec/div

B) Einschaltflanken in Abhängigkeit von Last und Temperatur

Die Geschwindigkeit der Schaltvorgänge, die v.a. für die Betrachtung des EMV Verhaltens oder für die Berechnung von Überspannungen interessant ist, wird zum einen von den MOS Kapazitäten (unabhängig von der Temperatur) , zum anderen von den Lade- und Entladeströmen im Gatekreis bestimmt.

Letztere hängen aufgrund der Leitfähigkeitscharakteristik des Halbleitermaterials zusätzlich stark von der Temperatur ab.

Da die Lastverhältnisse den Spannungs/stromverlauf bestimmen, haben diese ebenfalls Einfluss auf die Transienten.

Hinzu kommen im Fall der Highsideschalter die variablen Eigenschaften der integrierten Ladungspumpe.

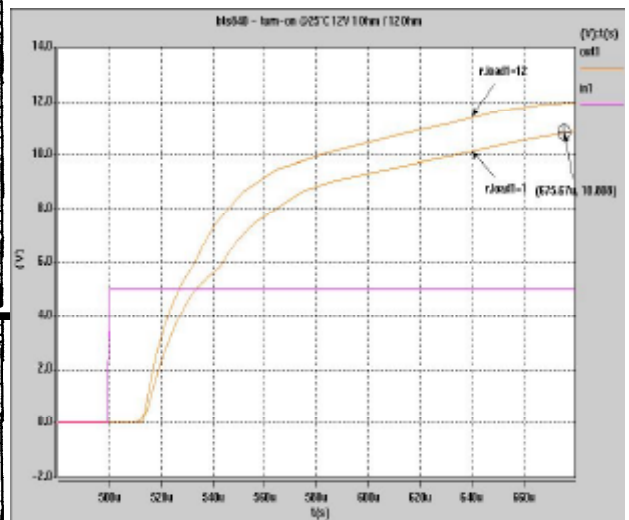
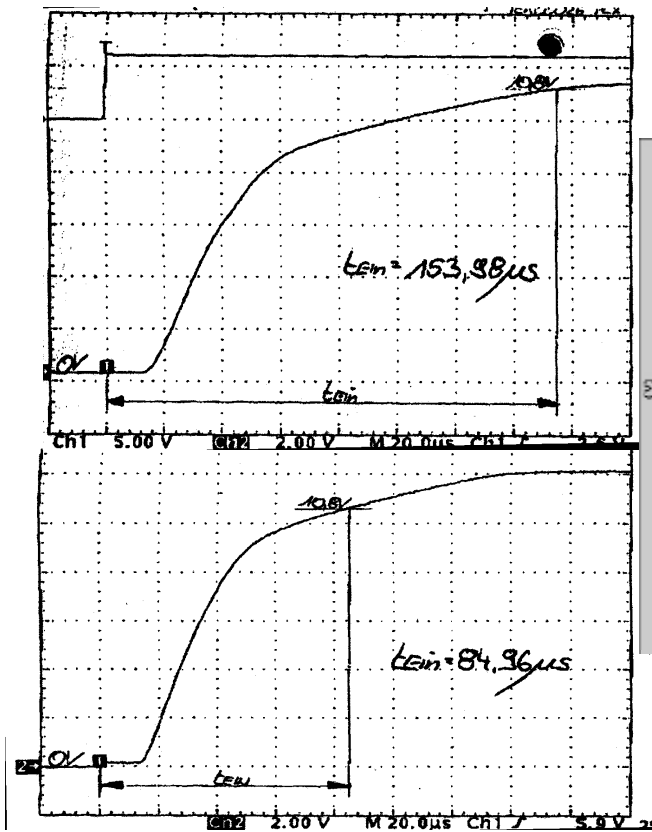


Abb. 12: Einschaltverhalten des PROFET BTS840 bei 12V/1A (oben) und 12V/12A (unt., 20 μs /div, 2V/div) Simulation rechts im Bild.

6.) Schlussfolgerung:

Die verschiedenen Aspekte eines integrierten Leistungsbauelements wie elektrodynamische Eigenschaften der Leistungsteile, Verhalten eines komplexen analogen und digitalen ICs und die thermische Charakteristik eines gehäuteten Bauelements werden in Verhaltensmodellen vernetzt. Unsere Verhaltensmodelle für Smart Power Schalter und Brücken haben sehr ermutigenden Ergebnisse gezeigt.

Beispielsweise zeigt das simulierte Einschaltverhalten eines Motors einen hohen Anlaufstrom und auch eine Temperaturüberhöhung im Chip. Mit angenommenen worst-case Parametern wie z.B. 85 °C Umgebungstemperatur kann die richtige Motorbrücke einschließlich der thermischen Verbindung dimensioniert werden. Selbst extrem kritische und schnelle Vorgänge wie Kurzschluß können quantitativ analysiert werden.

Auch schwierige Analyse wie elektromagnetische Einstrahlung und Abstrahlung (EMV) wird ermöglicht, die sonst einen hohen Messaufwand und Redesigns in der Praxis erfordern. Die Interaktionen unter den verschiedenen Schaltern wie bei Brücke oder Mehrkanalschalter werden wiedergegeben.

Das sehr positive Feedback und die große Resonanz von der Anwenderseite bestätigt die hohe Qualität unserer Verhaltensmodelle.

Die Modelle sind abrufbar unter <http://www.infineon.com/simulate>. Als nächste Stufe werden noch komplexere Produkte / Systeme wie 3 Phasen-Motortreiber modelliert und für die Systementwicklung zur Verfügung gestellt.

Die gewonnene Effektivität in Entwurfssicherheit und Geschwindigkeit wird auch die Weiterentwicklung der Verhaltensmodelle vorantreiben. So sind die statistischen Modelle der Leistungsbauelemente zu entwickeln, die mit modernen Tools zusammen hohe Fertigbarkeit garantiert.

Die verschiedenen Stressanalysen wie Übertemperatur oder Temperaturschock können für die Berechnung der Lebensdauer verwendet werden. Dazu sind Lebensdauermodelle notwendig, die zusammen mit dem Belastungsprofil eine Wahrscheinlichkeit über die Lebensdauer der Leistungshalbleiter voraussagt.

Eine Systemsimulation mit einem Verhaltensmodell ist auch hilfreich für die Definition eines neuen Smart Power Bauelements. Die Parameter können für die spezifische Applikation angepasst werden, ebenso können Funktionsblöcke zusammen erstellt werden bzw. neu entwickelt werden. Die Vision ist erlaubt, dass in Zukunft das Modell von Anwendern kommt und von Halbleiterherstellern in Silizium realisiert wird.

Literatur:

[noe]:

Noebauer, G., "Creating Compact Models Using Standard Spreadsheet Software", *Proc. of 17th IEEE Semiconductor Thermal Measurement & Management Symp.*, 2001

[mmpn]:

http://www.infineon.com/cmc_upload/migrated_files/document_files/Application_Notes/mmpn_eng.pdf