



Vincotech

dU/dt VALIDIERUNG AM MOTOR-DRIVE

[Deutsch]

EMPOWERING YOUR IDEAS

Copyright © 2025

dU/dt

Vermessung am Motor-Drive – wie man die Flankensteilheiten eines Wechselrichters schnell und praxisgerecht mit dem Oszilloskop überprüfen kann, ohne dabei jede einzelne Flanke manuell im Zeitbereich beurteilen zu müssen. Eine Methode, die sowohl während des Entwicklungsprozesses im Labor als auch direkt an der Endapplikation beim Endkunden im Feld angewendet werden kann. Ein Artikel von Marcus Preuß, März 2025

Warum dieses Thema wichtig ist

Eine zu hohe Flankensteilheit der Spannung einer Motorphase - im Folgenden dU/dt - kann Wicklungsschäden durch partielle Teilentladung in den Motorwicklungen verursachen. Ein in der Industrie weit verbreiteter Grenzwert ist 5 kV/μs. Zum Schutz von Motoren müssen Grenzwerte eingehalten und überprüft werden. Während dies während des Entwicklungsprozesses häufig mit Doppelpulstests im Labor durchgeführt wird, beschäftigt sich dieser Artikel mit der Überprüfung an der Endapplikation unter realen Betriebsbedingungen.

Wichtig zu verstehen ist, dass es innerhalb einer Phasenstromperiode sehr viele unterschiedliche Flanken gibt. Bei 50 Hz Phasenstrom und 2 kHz Taktfrequenz gibt es 80 unterschiedliche Flanken, darunter 40 positive und 40 negative. Bei 16 kHz sind es schon 640 Flanken je Lastzustand die beurteilt werden müssen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer schnellen Messmethode, da die manuelle Begutachtung jeder einzelnen Flanke im Zeitbereich zu zeitaufwändig ist

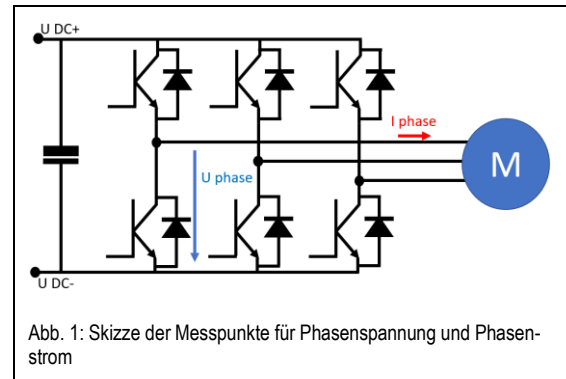
Von was die Flankensteilheit abhängig ist

Die Steilheit der Flanken sowie deren Verteilung innerhalb einer Phasenstromperiode ist primär abhängig von den Leistungshalbleitern und deren Gate Widerstände. Sekundäre Einflussfaktoren sind zusätzlich Motorbelastung, Umschwingvorgänge während der Totzeit (Soft-Switching), Phasenstromrichtung, Phasenstromamplitude, Leistungsfaktor, Art der PWM, Snappiness der Diode, Art und Länge des Kabels, Temperatur der Halbleiter sowie Layout von Platine und Power Modul.

Wie das dU/dt bestimmt wird

Mit einem Oszilloskop werden folgende beiden Größen erfasst:

- Phasenstrom
- getaktete Phasenspannung



Die getaktete Phasenspannung wird nun mit Hilfe eines Math-Channels des Oszilloskops differenziert und skaliert. Das Differential transformiert die Flankensteilheit der Flanke vom Zeitbereich in den Amplitudenbereich. Die Skalierung normiert das Ergebnis auf kV/μs.

Die Transformation in den Amplitudenbereich ist sehr vorteilhaft, da das Ergebnis auf der Y-Achse direkt abgelesen werden kann. Eine aufwändige Beurteilung jeder Flanke im Zeitbereich ist somit nicht mehr notwendig.

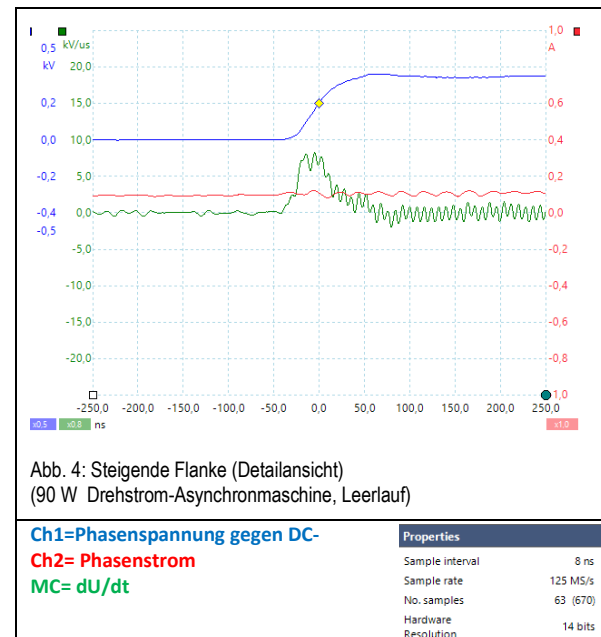
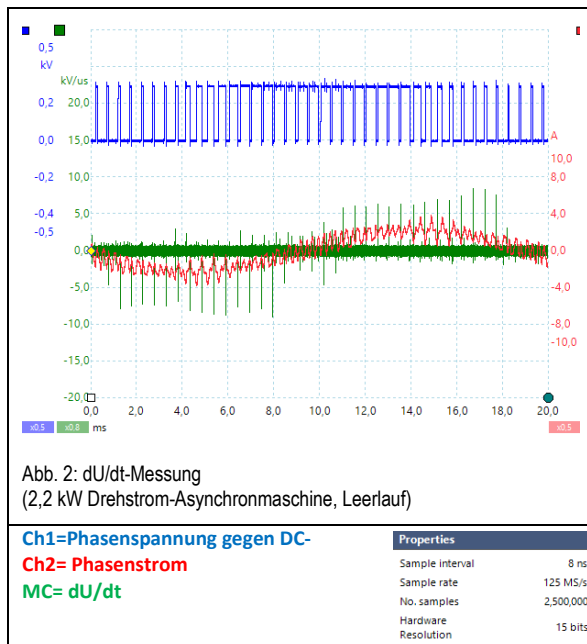
Formel für Math Channel:

$$\frac{kV}{\mu s} = \text{derivative (Phasenspannung)} \times 10^{-9}s$$

Es ist sinnvoll, die Messzeit derart zu wählen, dass genau eine komplette Periode des Phasenstromes auf dem Bildschirm des Oszilloskops dargestellt wird. Somit können alle Flanken eines bestimmten Betriebszustandes in einem „single shot“ erfasst und abgebildet werden.

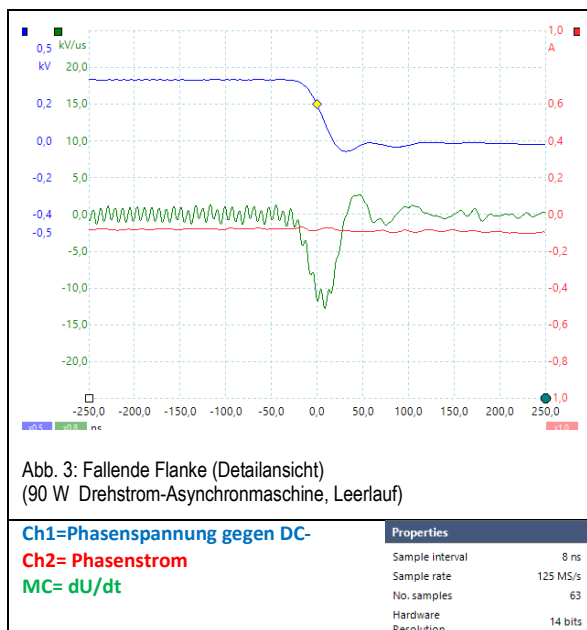
Beurteilung des Messergebnisses

Das dU/dt kann am Math Channel direkt abgelesen werden. Man sieht auf einen Blick, ob alle Flanken einer Periode innerhalb des gesteckten Limits sind oder ob Grenzwertüberschreitungen auftreten. (grüne Nadeln)



Würde man in obigem Beispiel einen Grenzwert von 5 kV/ μ s heranziehen, so sähe man sofort, dass dieser Grenzwert außer im Bereich des „Zero Crossings“ des Phasenstromes deutlich überschritten wäre.

Abb. 3 und Abb. 4 zeigen die Detailaufnahmen einer (a) fallenden- sowie (b) einer steigenden Flanke. Man sieht deutlich, wie die dU/dt Berechnung die reale Flanke abbildet.



Flanken / IGBT-Zuordnung

Falls die gemessene Flankensteilheit zu groß ist, muss optimiert werden. Im einfachsten Fall können die Gate-Widerstände angepasst werden. Für die Optimierung muss jeder zu steilen Flanke der verantwortliche IGBT sowie dessen Schallrichtung zugeordnet werden. Klartext: Es muss bekannt sein, ob der HS- oder der LS-IGBT verantwortlich ist und ob dieser gerade ein- oder ausschaltet. Für die Zuordnung bedarf es einer Fallunterscheidung für **(a)** die Richtung des Phasenstromes sowie **(b)** die Richtung des dU/dt.

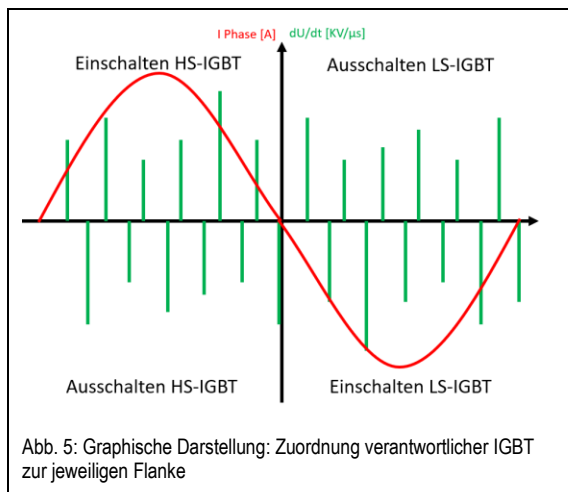
Folgende Tabelle listet die richtige Zuordnung:

Tabelle 1: Zuordnungstabelle verantwortlicher IGBT zur Flanke

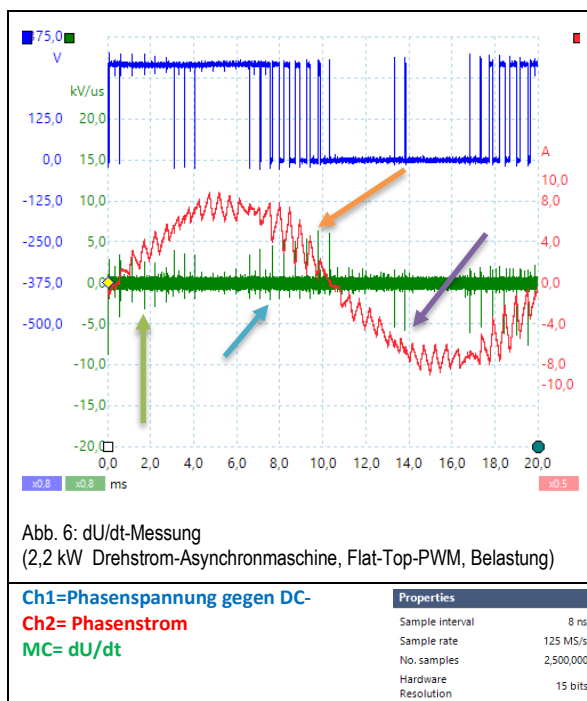
Strom-richtung	dU/dt	Verantwortlicher IGBT	Ersatzschaltbild
positiv →	positiv ↑	HS-IGBT (Einschalten)	
positiv →	negativ ↓	HS-IGBT (Ausschalten)	
negativ ←	positiv ↑	LS-IGBT (Ausschalten)	
negativ ←	negativ ↓	LS-IGBT (Einschalten)	

HS = High Side; LS = Low Side

Abb. 5 verdeutlicht den Inhalt obiger Tabelle in graphischer Form.



Nachfolgend ein praktisches Beispiel. Anhand Abb. 6 wird die Zuordnung der IGBTs eines Flat-Top-PWM getakteten Wechselrichters erklärt.



Oranger Pfeil: dU/dt = positiv & Phasenstrom = positiv => Einschalten HS-IGBT

Violetter Pfeil: dU/dt = negativ & Phasenstrom = negativ => Einschalten LS-IGBT

Türkiser Pfeil: dU/dt = negativ & Phasenstrom = positiv => Ausschalten HS-IGBT

Grüner Pfeil: Keine Flanke, d.h. es handelt sich um eine steilflankige kapazitive Einkopplung aus der benachbarten Phase.

Hinweis: Bei schnellen Flanken und hoher kapazitiver Kopplung zwischen den Motorphasen gibt es Übersprechphänomene. Diese werden durch steile Impulse auf der Phasenspannung sichtbar und folgerichtig von der vorgestellten Methode ebenfalls ausgewertet. Dies ist aber nicht tragisch, da die Übersprechphänomene physikalisch bedingt nicht steiler sein können als die Flanken selbst. Im Zweifel gibt das Einzoomen in die Messung Auskunft darüber, ob es sich um eine Flanke oder ein ausgewertetes Übersprechphänomen handelt

Zusatzinfo:

Hinweise zu den Ersatzschaltbildern in Tabelle 1:

Zeichnet man ein Ersatzschaltbild für die Halbbrücke einer Phase, so lässt sich das Kommutierungsverhalten einfacher erklären, da jedes Ersatzschaltbild nur einen aktiven IGBT enthält. Die Halbbrücke einer Phase arbeitet bei positivem Phasenstrom als BUCK-, bei negativem Phasenstrom als BOOST-Stufe. Daher kann die Halbbrücke einer Phase in 2 Ersatzschaltbilder zerlegt werden, nämlich in **(a) Buck Stufe** und **(b) Boost Stufe**. Die Diode simuliert dabei die antiparallele Diode des gegenüberliegenden IGBTs, welche während der Totzeit immer leitend ist. (Voraussetzung: Nicht-Lückender-Betrieb, welcher im Wechselrichterbetrieb fast immer vorliegt).

Wie die Qualität der Messung verbessert werden kann

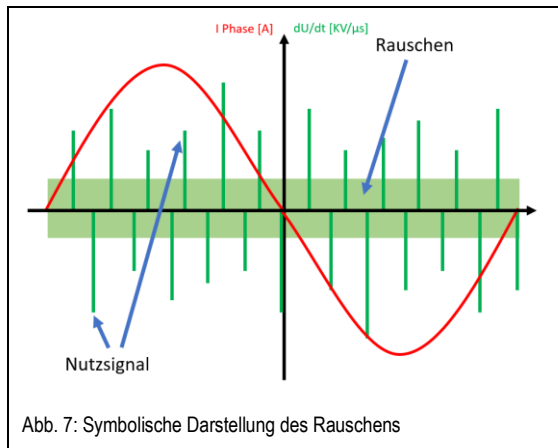
Um ein gutes Ergebnis zu erhalten sind einige Hürden zu überwinden, denn die Qualität und die Genauigkeit des berechneten dU/dt hängt sehr stark vom Rauschen des Math Channels ab. Es entsteht beim Berechnen und ist kein Signalrauschen!

Merke:

Die Genauigkeit des berechneten dU/dt hängt stark vom Rauschen ab.

$$\text{berechnetes } dU/dt = \frac{dU + \text{Rauschen}}{dt}$$

Für ein ordentliches Ergebnis muss das Rauschen deutlich kleiner sein als das dU/dt der Schaltflanken (Signal-Rausch-Verhältnis). Daher ist es wichtig zu verstehen, wo das Rauschen herkommt und wie es klein gehalten werden kann.



Merke:

Das Rauschen kann reduziert werden durch
(a) höhere vertikale AD-Auflösung, **(b)** kleinsten möglicher Messbereich und **(c)** geringere Sampling-Rate

Folgender Vergleich illustriert wie eine höhere AD-Auflösung und eine längere Abtastzeit das Rauschen reduziert. Verglichen werden folgende Messeinstellungen:

- a) 15-Bit AD-Auflösung / 8 ns Abtastzeit (Abb. 8)
- b) 8-Bit AD-Auflösung / 2 ns Abtastzeit (Abb. 9)

Abb. 8 zeigt mit einer **hohen** AD-Auflösung (15-Bit) und einer **langen** Abtastzeit (8 ns) ein **geringes** Rauschen

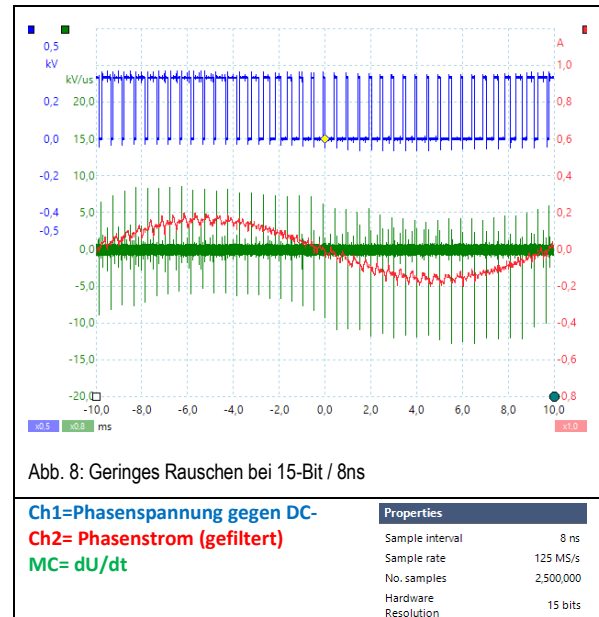
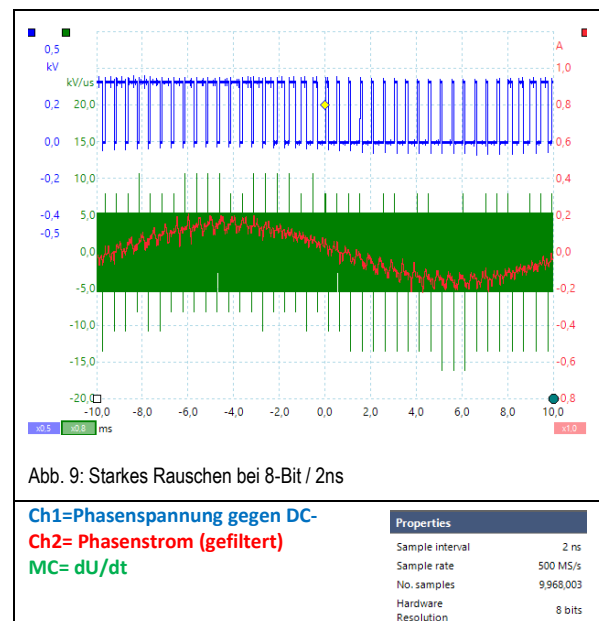


Abb. 9 zeigt mit einer **geringen** AD-Auflösung (8-Bit) und einer **kurzen** Abtastzeit (2 ns) ein **starkes** Rauschen.



Deutlich erkennbar ist der Unterschied des Rauschens. In Abb. 9 ist das Rauschen sogar höher als ein häufig verwendeter Grenzwert ($> 5 \text{ kV}/\mu\text{s}$) und wäre somit für diese Grenzwertvermessung unbrauchbar.

Zusatzinfo:

Wo kommt das Rauschen im Math Channel her? Die Ursache ist im Wesentlichen das Quantisierungsrauschen des AD-Wandlers des Oszilloskops. Es verursacht einen hochfrequenten Amplitudenfehler. Aus ihm entsteht beim Differenzieren im Math-Channel ein dU/dt Fehler. Das Rauschen im Math-Channel ist die Aneinanderreihung aller dU/dt -Fehler und wird umso größer, je größer der Quantisierungsfehler (AD-Auflösung & Messbereich) und desto kleiner die Abtastzeit ist. (Sampling-Rate)

Die Auswahl einer sinnvollen Abtastzeit

Mit zunehmender Sampling-Rate nimmt das Rauschen zu und die Qualität des Ergebnisses ab. Eine sinnvolle Wahl der Abtastzeit wird deshalb notwendig. Die Abtastzeit muss (a) lang genug gewählt werden, dass das Rauschen ausreichend klein bleibt und (b) kurz genug sein, dass die Flanken noch ausreichend fein abgetastet werden.

Ein guter Kompromiss ist es, die Abtastzeit so zu wählen, dass etwa 3 Messabschnitte innerhalb einer Flanke entstehen (4 Samples). Beispielsweise sollte bei 32ns Flankenzeit (80 % / 20 %) die Sampling-Rate ca. 8 ns sein.

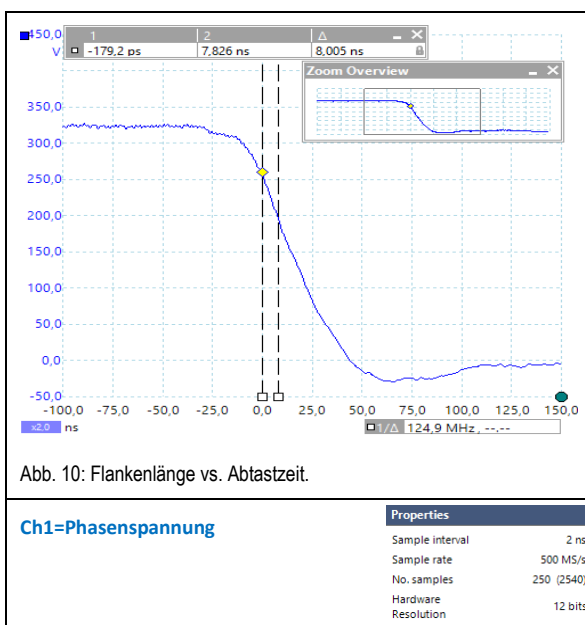


Abb. 10 illustriert dies. Die Zeit zwischen den cursoren entspricht 8 ns und ist somit gleich der

sinnvollen Abtastzeit. Es werden ca. 3 unterschiedliche Abschnitte innerhalb der Flanke gemessen. Die Flanke wird ausreichend gut abgetastet. Dies ist ein guter Kompromiss zwischen Abtastzeit und Rauschen und liefert ein gutes Signal Rauschverhältnis

Genauigkeit, Grenzen und Besonderheiten dieser Methode

Freilich hat diese Methode ihre Grenzen. Die berechnete Flankensteilheit ist immer der Durchschnittswert zwischen 2 Messpunkten. Befindet sich dazwischen ein steileres Stück, so wird dieses nicht entdeckt. Praktische Versuche haben gezeigt, dass das Ergebnis für eine praktische, nicht wissenschaftliche Beurteilung gute Ergebnisse liefert, sofern die Abtastung im Verhältnis zur Dauer einer Flanke ausreichend schnell ist. Für wissenschaftliche Ansprüche, in denen selbst kleinste Teilabschnitte einer Flanke bewertet werden müssen, ist diese Methode weniger gut geeignet. In diesem Fall muss jede einzelne Flanke mit möglichst hoher Abtastrate abgetastet und aufwendig im Zeitbereich bewertet werden.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass man die Flankensteilheit am Motor-Drive durch die Bildung des Differenzials der Phasenspannung recht einfach, schnell und praxisgerecht beurteilen kann. Wichtig dabei ist die Auswahl einer sinnvollen Abtastrate, eine gute vertikale Auflösung sowie die Wahl des kleinsten möglichen Messbereiches.

Autor



Marcus Preuß ist Field Applications Engineer bei Vincotech in Unterhaching bei München. Er berät Vincotechs Großkunden bei der Auswahl von Leistungsmodulen und unterstützt diese während dem Entwicklungsprozess mit dem nötigen Applikationssupport. Das umfangreiche Portfolio von Vincotech erstreckt sich über viele Topologien vorwiegend für die Märkte Industrial Drives, Solar Inverter und Battery Charging. Marcus hat viele Jahre Erfahrung in der Leistungselektronik, im analog- und mixed-signal circuit design inclusive field support und trouble shooting.



Vincotech GmbH

Biberger Strasse 93 | 82008 Unterhaching | Germany
T +49 89 878 067-0 | F +49 89 878 067-300

www.vincotech.com

Copyright © 2025