EMV-Weisheiten bei der Geräteentwicklung

von Prof. Dr. Rainer Thüringer ∗ FH Gießen-Friedberg

1. **Überall ist HF** (durch Oszillatoren, Impulse und Resonanzen auf Leitungen):
   Niedrigste Frequenz = Taktfreq., Höchste Freq. durch Oberwellenspektrum der Impulsflanken: $f = 1/\pi \cdot t_r$
   t_r =1 ns ⇒ 330 MHz obere Grenzfrequenz; **Bandbreite praktisch von Taktfrequenz bis 1/ t_r** (= 1GHz)

2. **Ströme nehmen den Weg der geringsten Impedanz:**
   < 1 MHz: Ohmscher Weg (Kupfer-Flächen layouten; DC-Stromversorgung)
   1 ... 100 MHz: Induktiver Weg (auf geringe Schleifen achten bzw. Masseflächen nutzen)
   > 100 MHz: Kapazitiver Weg (Luftstrecken zw. Leitungen, Flächen und Gehäuse/Raum)

3. a) **Jede "einzelne" Leitung hat typ. 10nH/cm Induktivität** (Rückleiter diffus oder weit weg)
   jedes parallelverlaufende zusammengehörige Leitungspaar ≤ 5 nH je cm Doppelleitung.
   jedes Potentiallagenpaar ≤ 0,1nH/cm (Kupferflächen als Kondensator = geringer Abstand!)

   b) **Überall lauern parasitäre Kapazitäten von 1 .. 100pF** zwischen Leitern bzw. Metallflächen
   Faustregel: Leitungen frei im Raum: 5...10pF/m, Leitungen in metall.Gehäusen: 10..20pF/m (je Ader)
   Signal-Leiterbahnen auf Leiterplatten mit Massefläche (Multilayer) typ. 0,5...1pF/cm (pro Zentimeter!)
   Kapazität LP mit Massefläche gegen metall. Gehäuse typ. 10pF; Gehäuse gegen Raum typ. 10-20pF

   c) **Kalkuliere für Impedanzauswirkungen** von Induktivitäten und Kapazitäten bei Burst/ESD:
   $X_L \approx L / t_r$ $X_C \approx t_r / C$ $R \approx 0$ mit t_r = Anstiegszeit des Störimpulses (Burst: 5ns; ESD: 0,8ns)

4. **Unerklärliche Effekte sind meist Resonanzerscheinungen** von Induktivitäten u.Kapazitäten
   Gegenmaßnahme: Einfügen von Widerständen zwischen L und C (ohmsche Dämpfung) bzw.
   Verwendung verlustbehafteter Ferrite und Kondensatoren (X7R; mit hohem Tangensdelta).

5. **Vermeide Induktionsschleifen** (auch nicht galvanisch-sichtbare kapazitive HF-Schleifen)
   Gefahr der Ein-/Auskopplung durch magnetische Felder ⇒ **Hin- und Rückleiter parallel führen**;
   Bei Signalleitungen über einer Massefläche (i.d.R. Multilayer) verläuft der Signalrückweg in der Massefläche immer direkt unter dem Signalhinweg (Proximityeffekt = ideal kleine Schleife).

6. **Möglichst keinen (impedanzbehafteten) Schirm als Rückleiter benutzen**
   (Gefahr galvanisch-induktiver Einkopplung). Besser 2-Drahtleitung + Schirm.

7. **Leitungen werden** für digitale Nutzsignale **kritisch für Reflexionen ab $l_{krit.}$/cm = 4 t_r/ns.**
   Dann **Leitungen wie Wellenleitungen behandeln** (konstante Impedanz durch Parallelführung oder über Masse führen, Verzweigungen und Anpassungen/Abschlüsse beachten.

8. **Biete leitungsgeführten Störungen von außen möglichst einen niederimpedanten Weg um die Elektronik herum (Bypasstechnik)** z.B. über das Gehäuse oder eine ähnlich große metallische Fläche (HF-Ground zum Raum). Falls nicht möglich (Kunstoffgehäuse, 2-lag.LP), dann Kabel induktiv sperren durch Drosseln in der Zuleitung. Ggf. beides anwenden: Erst Bypassführung (jede Leitung über HF-Kondensator an Gehäuse oder ersatzweise an eine Kupferfolienfläche); Danach in der Leitung die HF-Drossel (typ. 10...100µH). Stromkompensierte Drossel nehmen, falls starke Nutzströme auf den Leitungen.

9. **Leitungen sind Antennen für HF.** Kurze Leitungen sind gute Antennen für hohe Frequenzen, lange Leitungen für niedrige Fequenzen ($\lambda/4$ und $\lambda/2$-Resonanzbedingung von Leitungslänge und Wellenlänge: $\lambda/2$(100MHz) = 1,5m in Luft; $\lambda/2$(500MHz)= 15cm auf LP mit $\varepsilon_r = 4$).
   Einzelne Leitungen (Rückleiter weit entfernt) strahlen als sog. Common-Mode-Strahler (CM) viel stärker als Doppelleitungen (Rückleiter dicht daneben) im sog. Differential Mode (DM).
   Kleine Schleifen sind quasi DM-Strahler, große Schleifen zunehmend CM-Strahler.
   Praxis: Kurze Leiterbahnen auf LP (5..15cm) ohne Masselage strahlen im > 500MHz-Bereich, kurze Kabel in Luft (z.B.30cm Flachband im PC) ebenfalls ab 500MHz, lange Kabel ausserhalb des Gerätes (typ.1,5m) im > 50/100 MHz-Bereich ($\lambda/4$ bzw. $\lambda/2$). Niedrigere Frequenzen < 30/50 MHz werden seltener abgestrahlt (typ. aber bei Feldbusleitungen).
   Gegenmaßnahmen: Rückleitung (i.d.R. Masse) dicht neben der HF-führenden Leitung (DM!!)
   Speisenden Oszillator (z.B. am Quarz) über C kurzschließen; HF-Leitung durch Ferrite dämpfen.