

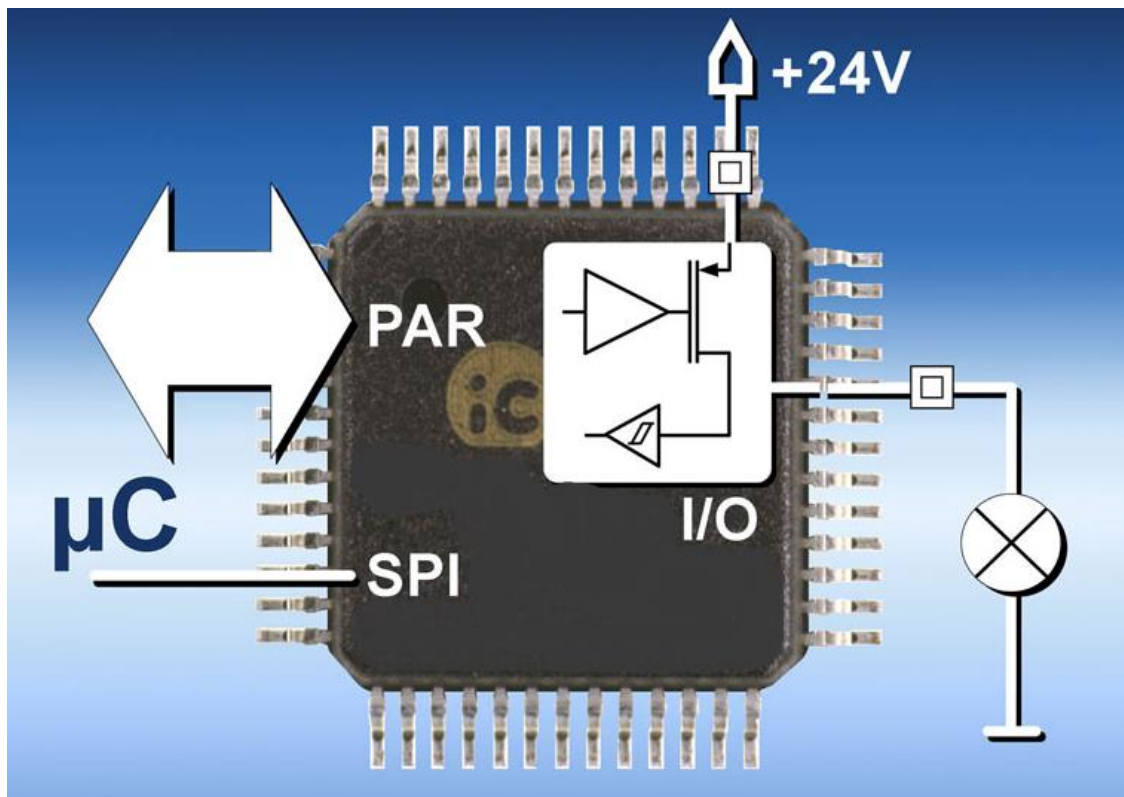
Anpassung von Mikrocontroller an industrielle Anwendungen

Um Mikrocontroller an eine raue und störungsreiche industrielle Anwendung anzupassen, ist ein besonderer Aufwand erforderlich. Verbindet man einen Mikrocontroller, dessen Versorgungsspannung bei +1,5V bis +3,3V liegt, mit der industriellen 24V-Welt, so bedarf es sorgfältiger Überlegungen und spezieller Lösungen, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb zu erreichen.

Das nachfolgende White Paper beschreibt die Herausforderungen bei der Entwicklung und zeigt verschiedene Lösungswege auf, um die funktionale Sicherheit und die Testbarkeit zu erhöhen.

Inhaltsverzeichnis

- 1) [Industrie – eine andere Welt?](#)
- 2) [Was sind die Herausforderungen beim Entwurf?](#)
- 3) [Signalpegel verschieben und Ausgänge sicher ansteuern](#)
- 4) [Diskrete oder ASSP-I/O?](#)
- 5) [Gestörte +24V Eingangssignale verarbeiten](#)
- 6) [Ansteuerung von Laserdioden/LEDs](#)
- 7) [Verlustleistung einsparen - aber wo?](#)
- 8) [Zusammenfassung](#)
- 9) [Literatur](#)



1) Industrie – eine andere Welt?

Seit der Erfindung des Mikrocontrollers in den 70er Jahren besteht der Trend zu mehr applikationsspezifischen Varianten mit höherer Komplexität und kleineren Chipstrukturen. Dies ermöglicht die Integration von höherer Funktionalität, größerem Speicher und geringerer Verlustleistung pro Funktion.

Immer wird dabei nach der optimalen Kombination von Kosten, Platz und Verlustleistung für ein bestimmtes Anwendungssegment mit ausreichend hohen Stückzahlen gesucht, um die Entwicklungskosten für einen speziellen Mikrocontroller zu rechtfertigen. Ein Ergebnis aus diesem Trend ist, dass die Versorgungsspannung bei Mikrocontroller kontinuierlich in den letzten zwei Dekaden kleiner wurde und in einigen Fällen heute bei +0,8V für den Kern und +1,5V für die I/O-Schnittstellen liegt.

In industriellen Anwendungen hingegen werden immer noch primär die +24V für Logikpegel und Spannungsversorgung verwendet. Dafür gibt es bei den vorherrschenden rauen und störungsreichen Betriebsbedingungen gute Gründe, denn eine hohe Störsicherheit ist nötig, um Einkopplungen durch hohe Stromspitzen, magnetische Felder, statische Entladungen usw. zu tolerieren. In den meisten Fällen sind die Ströme und Spannungen in der industriellen Welt um Faktoren höher als beim Mikrocontroller, so dass es sich um Signalgrößen im Bereich von mehreren Ampere und Volt handelt anstelle von Milliampere bzw. Millivolt.

Die Verbindung der beiden Welten stellt eine Herausforderung für den Hardware-Designer dar. Es müssen die Pegel angepasst und eventuell isoliert werden. Das bedeutet, dass eine Verschiebung der logischen Pegel von dem Mikrocontroller von minimal +1,5V bis auf +24V für die Ausgänge, oder in umgekehrter Richtung für die Eingänge, vorgenommen werden muss.

Die Verwendung eines Mikrocontrollers in Embedded-Anwendungen wie Maschinensteuerung, Robotik oder Automatisierungstechnik benötigt Anpassungen. Diese müssen so entwickelt werden, dass sie einen zuverlässigen und möglichst sicheren Betrieb gewährleisten. Es gilt auch einige Standards für die funktionale Sicherheit, wie IEC 61508 [\[1\]](#) und EN 60204-1, zu berücksichtigen.

2) Was sind die Herausforderungen beim Entwurf?

Es liegt in der Natur der industriellen Elektronikentwicklung, dass eine gewisse Entwicklungserfahrung erforderlich ist. Die nachfolgenden Zustände während des Betriebes gilt es im Entwurf zu berücksichtigen:

- Große Spannungsänderungen mit schnellen dU/dt -, oder dI/dt -Flanken, die ein Übersprechen an Ein- und Ausgängen verursachen
- Masseschleifen, die eine Potentialverschiebung in weit verteilten Untersystemen verursachen
- System- oder Softwarefehler, die eine Zerstörung/Fehlsteuerung der Aktuatoren bewirken können (z.B. an Leistungsausgangsstufen)

Daher sollten beim Entwurf der Schnittstellen zwischen Mikrocontroller und der +24V-Welt folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Pegelwandlung zwischen dem Mikrocontroller und den Ausgängen ist notwendig?
- Welche Pegelanpassungen sind für die Mikrocontrollereingänge erforderlich?
- Wie sind die kritischen Ausgänge gegen Hardware- oder Softwarefehler abzusichern?
- Welche Filterung ist für die digitalen und/oder analogen Eingänge sinnvoll?
- Ist eine Potenzialtrennung zwischen den industriellen I/O und dem Mikrocontroller notwendig?
- Welches Ein- und Abschaltverhalten sollte berücksichtigt werden?
- Welche Fehler sollten überwacht werden und wie?
- Wo kann eine hohe Verlustleistung lokale Überhitzungen verursachen (z.B. bei hohen Strömen oder Schaltfrequenzen)?

3) Signalpegel verschieben und Ausgänge sicher ansteuern

Zunächst wären die erforderlichen Logikpegel der Mikrocontroller I/O-Ports zu evaluieren und danach die Strom- und Spannungsanforderungen der Ausgänge. Hoher Strombedarf kann an Ausgängen entstehen, die niederohmige Lasten wie Heizungen oder Aktuatoren treiben. Ebenso sind Pegelverschiebungen und Vorstufentreiber für Leistungstransistoren oder FETs zu beachten. Bild 1 zeigt ein Beispiel, wie die Anpassung des +1,5V Mikrocontrollerausgangspegel über den Vorstufentreiber erfolgt und einen Hochstrom-FET an +24V ansteuert. Von den kleinen Mikrocontrollerlogikpegel werden damit Lasten >10A geschaltet. Ebenfalls gezeigt ist die Ansteuerung eines High-Side-Schalters, wie z.B. dem [iC-DP](#), der Lasten bis 200mA an maximal +36V schalten kann.

Da die Mikrocontroller-I/O-Ports nach dem Einschalten der Versorgungsspannung zunächst in den Eingangsmode geschaltet werden, sind besondere Vorkehrungen zu treffen. Offene Eingänge mit undefinierten Logikzuständen an dem Pegelwandler sind zu vermeiden und Pull-Down-Widerstände nach Masse vorzusehen, wenn diese nicht wie im Treiberbaustein [iC-MFL](#) bereits integriert wurden.

Andere Bereiche, die für einen sicheren Betrieb wichtig sind, ist z.B. die Erkennung von kurzgeschlossenen Ausgängen die Überwachung der Spannungsversorgung oder des Masseanschlusses wie auch der Temperatur des Treiberchips. In Anwendungen mit Sicherheitsanforderungen, bei denen Menschen oder wertvolles Material zu Schaden kommen kann, ist eine [FMEA-Analyse](#) zur Erreichung von Sicherheitsstandards (wie z.B. IEC 61508[1] Voraussetzung. Diese Analyse kann auf der System-, Platinen- oder auch Bausteinebene erfolgen. Im Falle des Pegelwandlers und Vorstufentreibers [iC-MFL](#) wurde diese bereits bei der Entwicklung auf der Chipebene durchgeführt. Das Ergebnis dieser Analyse war u.a. die Einführung eines zweiten Masseanschlusses und deren Überwachung.

Falls beim [iC-MFL](#) eine Masseverbindung verloren geht (Fehler erster Ordnung), erkennt dies der Monitor und schaltet alle Ausgangsstufen aus. Das Gleiche ist der Fall, wenn Eingänge offen sind, Ausgänge kurzgeschlossen, die Temperatur- oder die Spannungsüberwachung anspricht, oder auch der Mikrocontroller einen Low-Pegel am Freigabeeingang EN anlegt.

Die Ausgänge des [iC-MFL](#) sind für eine maximale Spannung von +18V ausgelegt. Andere Treiber, wie z.B. der [iC-MFN](#), können Ausgangspegel von +24V bis +40V bedienen.

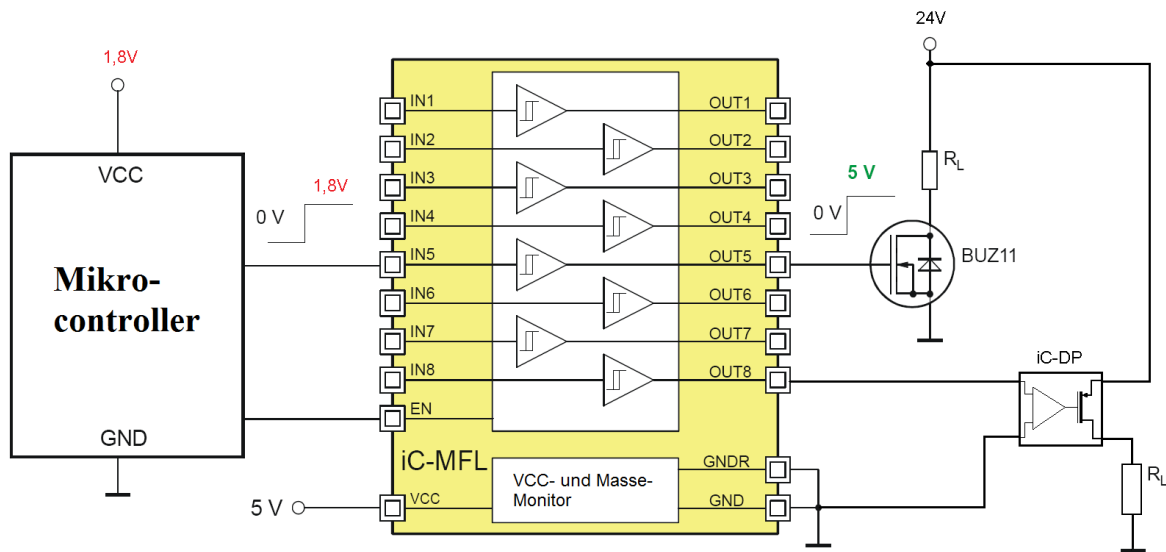


Bild 1: Pegelverschiebung und Ansteuerung von Leistungsausgängen

In vielen eingebetteten Mikrocontrollersystemen bedarf es einer flexiblen Anzahl von Ein- und Ausgängen, um unterschiedliche Maschinenkonfigurationen zu bedienen. Dies erfordert modulare I/O-Ports die programmierbar sind.

4) Diskrete oder ASSP-I/O?

Eine I/O-Modularität kann auf verschiedenen Arten erreicht werden. Eine Lösung ist auf der Platinen-, oder Modulebene, die Verwendung verschiedener I/O-Platinen/Module. Eine weitere wäre, die Modularität bereits auf der IC-Ebene zu realisieren. Hier können FPGAs, diskret aufgebaute Ein- und Ausgabestufen und auch speziell für programmierbare I/O-Konfigurationen entwickelte applikationsspezifische ICs (ASSPs) helfen.

Bei Embedded-Mikrocontrollern in Maschinen- oder Roboteranwendungen sind die Sensoren und Aktuatoren meist nur einige Meter entfernt. Wenn diese mit verdrehten und abgeschirmten Kabeln angeschlossen werden, sind Masseschleifen meist kein Problem. Daher ist in vielen Fällen auch keine galvanische Trennung (z.B. über Optokoppler) notwendig. Dies reduziert die Kosten für das I/O-System und erhöht die Flexibilität für den Systementwickler.

Die digitalen +24V Logikpegel werden auch verwendet um Schalter oder digitale Sensoren abzufragen, oder serielle Daten langsam über längere Kable zu übertragen. Die +24V Ausgänge dienen der Ansteuerung von Aktuatoren, wie z.B. Relais, Ventile, Motoren sowie von Anzeigelampen/LEDs. Für eine schnelle serielle Übertragung (z.B. bei SSI/BiSS-Encodern [2]) kommen in der gestörten industriellen Umgebung oft differenzielle RS422 Leitungstreiber und Empfänger zum Einsatz, die mehr als 100m Kabel zulassen [3].

Um einen sicheren Betrieb und eine gute Fehlerüberwachung zu erzielen, sind folgende Punkte beim Entwurf der Eingänge zu berücksichtigen:

- Der I/O-Port kann nicht angeschlossen sein (offene Leitung)
- Signalverbindungen können kurzgeschlossen oder unterbrochen sein
- Um Störungen wie Übersprechen, Rauschen, Spannungsspitzen oder auch Kontaktprellen, zu unterdrücken, sollten Filter bereitgestellt werden.
- Erkennung von Eingangsflanken, die einen Interrupt für den Mikrocontroller auslösen

Für die Ausgänge sind folgende Punkte wichtig:

- Erkennen von kurzgeschlossenen Ausgängen und Begrenzen des Kurzschlussstromes, sowie einer Übertemperatur bei Kurzschlüssen
- Begrenzung von Glühlampen-Einschaltströmen und Unterdrückung von Spannungsspitzen beim Ausschalten von Spulen
- Gepulste Ausgänge für leichter erkennbare Lampen-Blinkfunktionen bzw. zur Reduzierung der Verlustleistung?

Das Schalten von Lasten mit aktiven High-Pegelausgängen ist meist die bevorzugte Methode für den Betrieb. Eine unterbrochene oder gegen Masse kurzgeschlossene Leitung beeinträchtigt in diesem Fall nicht die +24V Versorgung. Das Überwachen von kritischen Fehlern, wie z.B. zu geringe Versorgungsspannung, fehlende Masseverbindung, oder auch Übertemperatur im Ausgangstreiber ist dabei sehr wichtig^[4]. Ein Zurücklesen der Logikpegel oder Messung des Analogpegel am I/O-Anschluss sind für Diagnosezwecke und die „Funktional Sicherheit“ sehr hilfreich. Im letzteren Fall können die Eingänge auch als +24V Analogeingänge verwendet werden.

Die meisten digitalen Funktionen eines modularen I/O-Ports können in einem FPGA implementiert werden. Analogen Funktionen, sowie die +24V Spannungsfestigkeit der I/O-Anschlüsse, erfordert eine zusätzliche diskrete Beschaltung. Das Beispiel eines speziellen programmierbaren und modularen +24V I/O-Ports zeigt Bild 2. Es basiert auf einem ASSP und wird direkt an den Mikrocontroller über den parallelen Bus, oder mittels einer meist vorhandenen SPI-Schnittstelle, angeschlossen bzw. konfiguriert.

In Anwendungen die eine Potentialtrennung benötigen, kann der [iC-JX](#) über eine isolierte SPI-Schnittstelle (z.B. durch Optokoppler-Einsatz) angeschlossen werden. Dies hat klare Vorteile, da weniger Leitungen mit Potentialtrennung benötigt werden. Dann kann die Versorgungsspannung für den [iC-JX](#) auch direkt aus den industriellen +24V Versorgung durch einen Spannungsreglers erzeugt werden.

Der [iC-JX](#) ermöglicht auch das Zurücklesen der Daten an den I/O-Anschlüssen. Zusätzlich ist ein 16 kanaliger A/D-Wandler mit 10 Bit Auflösung integriert. Dieser erlaubt, dass alle 16 I/O-Ports auch als +24V Analogeingänge verwendet werden können. Entweder zu Diagnosezwecke, oder aber als normaler Analogeingang.

Diese Implementierung unterstützt die funktionale Sicherheit der Steuerung und verbesserte die Online-Diagnose durch die Identifikation von Fehlern. Das reduziert wiederum bei einer Ferndiagnose die Servicekosten.

Zur dezentralen Spannungsversorgung eignet sich der [iC-WD](#) oder [iC-DC](#) Spannungsregler. Diese generieren über einen integrierten DC/DC-Konverter mit nachgeschalteten Längsreglern, zwei Ausgangsspannungen und minimiert die Restwelligkeit. Dies ist speziell für die analoge Spannungsversorgung wichtig und Kombination verringert gleichzeitig die Verlustleistung.

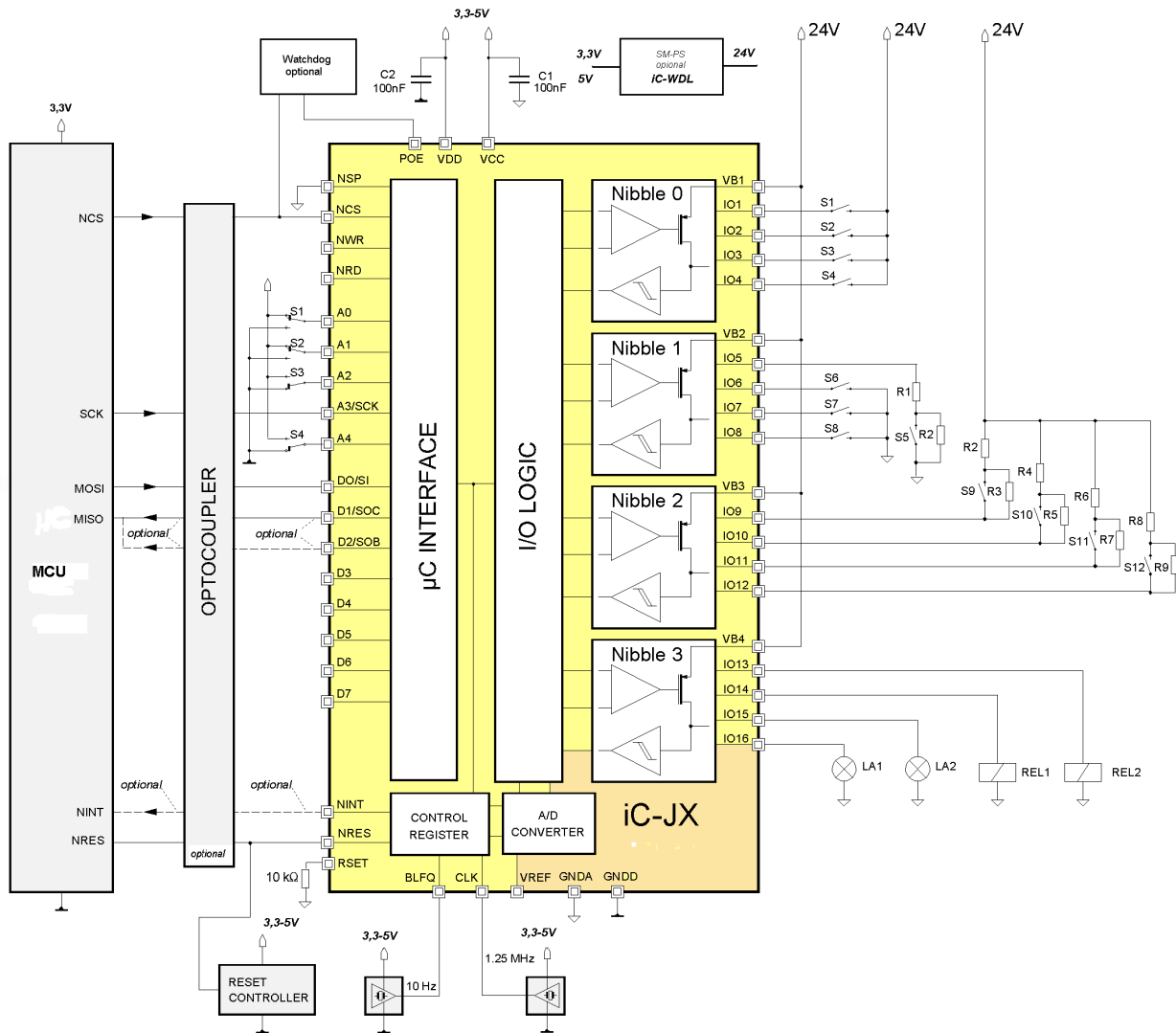


Bild 2: Kompakte universelle I/O mit optischer Potenzialtrennung

Zur zusätzlichen Sicherheitsüberwachung des gesamten Mikrocontrollersystems dient optional ein externer Watchdog. Falls nicht rechtzeitig ein Neustart der Watchdog-Schaltung durch den Mikrocontroller erfolgt, generiert dieser ein Rücksetzsignal und sperrt damit auch die 16 I/O-Ports.

5) Gestörte +24V Eingangssignale verarbeiten

Im Falle von stark gestörten Eingangssignalen sind digitale oder analoge Filter notwendig, um fehlerhafte Abfragen der Eingänge zu vermeiden. Für digitale Signale verfügen die [iC-JX](#)-Eingänge über eine Hysterese. Auch kann optional ein digitaler Filter zugeschaltet werden.

Analoge Eingangssignale sollten mit diskreten Filter versehen werden, oder bei der Abfrage fester Schwellen auch Komparatoren mit eingebauter Filter- und Haltefunktion(Hold). Bild 3 zeigt den Effekt einer Hold-Funktion für gestörte analoge Signale bei dem [iC-HC](#).

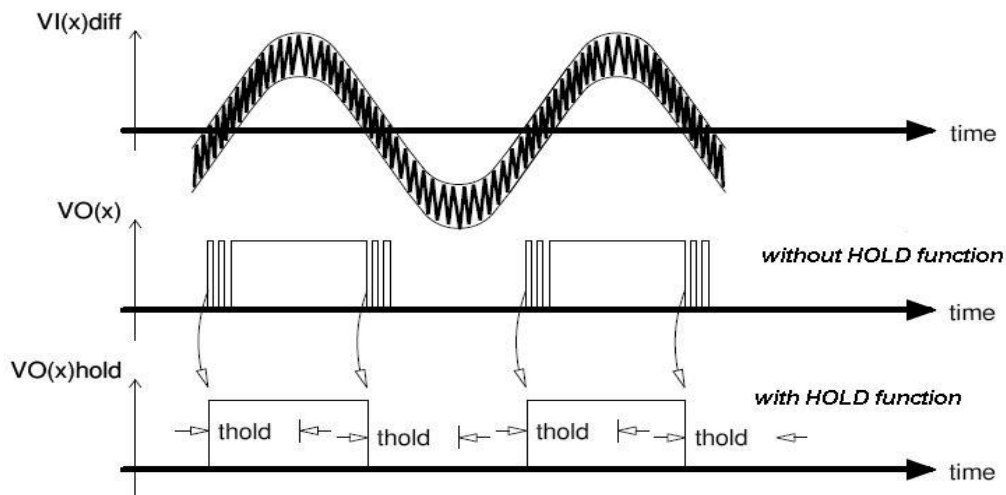


Bild 3: Integrierte Lösung zum Filtern von gestörten Eingangssignalen

Die Haltefunktion wird typischerweise für schnelle Messungen der Eingangspegel verwendet und enthält auch die Pegelwandlung, vom maximal +36V am Eingang auf den +3,3V- oder +5V-Logikpegel für den Mikrocontroller. Um die Verlustleistung im inaktiven Zustand zu reduzieren, kann der [iC-HC](#) Komparator über einen Freigabeeingang in einen „Zero Power“-Zustand versetzt werden.

6) Ansteuerung von Laser Dioden/LEDs

Das Treiben von Laserdioden durch den Mikrocontroller erfordert Konstantstromquellen und Spike-freies Schalten, um die Zerstörung von teuren Laserdioden zu vermeiden[5]. In Abhängigkeit von Strombedarf und Schaltfrequenzen erlauben [unterschiedliche Lasertreiber](#) eine Stromsteuerung (ACC = Automatic Current Control), oder eine Leistungssteuerung (APC = Automatic Power Control). Bild 4 zeigt die integrierte ACC-Lösung zur Ansteuerung von drei Laserdioden(oder auch LEDs) mit dem [iC-HG](#).

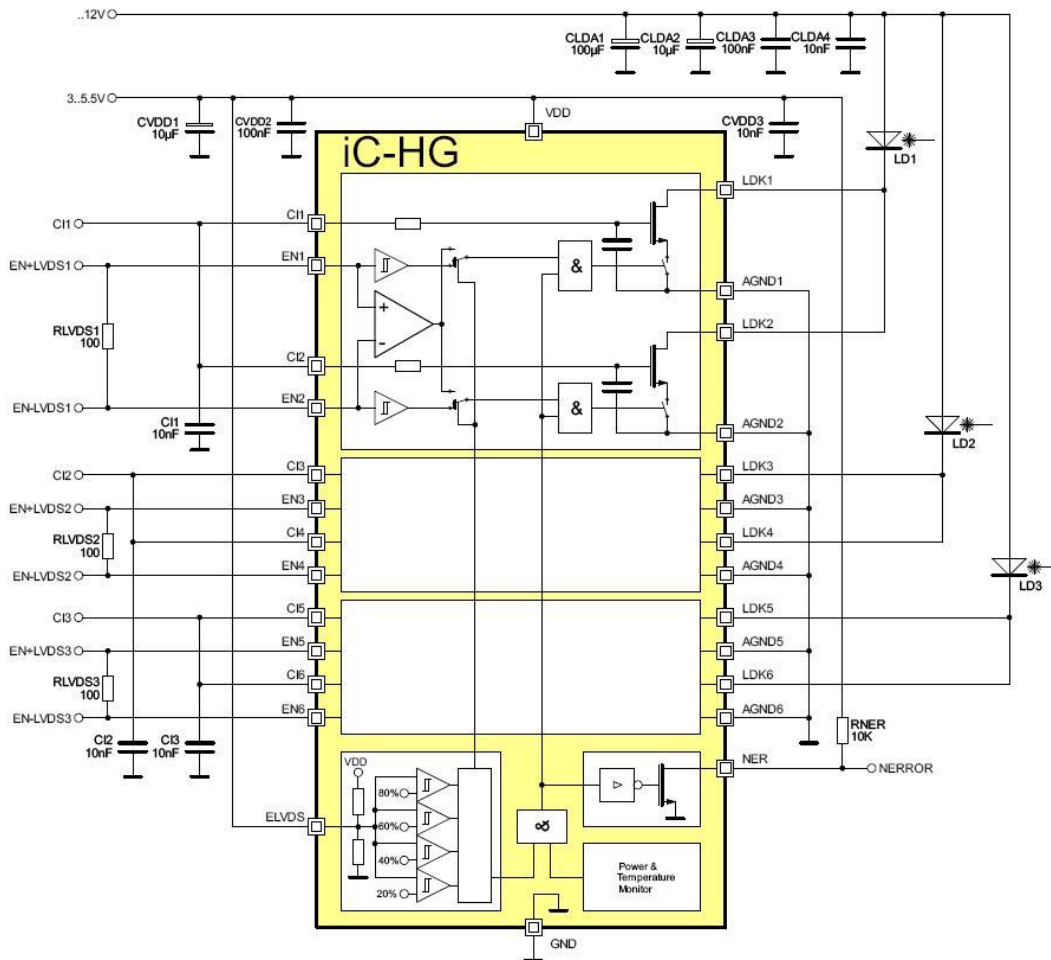


Bild 4: Ansteuern von RGB Laser Dioden/LEDs bis zu 1A

Die obige Schaltung ist eine RGB-Lichtquelle für unterschiedliche industrielle Anwendungen, wie z.B. Projektoren, 3D-Kameras oder Lasermodule. Für den Entwurf und Test von schnellen Lasertreiber-Schaltungen ist ein spezielles [White Paper](#) vorhanden.

7) Verlustleistung einsparen – aber wo?

Wegen des großen Spannungshubes von industriellen Signalen ist die entstehende Verlustleistung ein zu beachtender Faktor. Für Ausgangsstufen gilt dies im Besonderen, je höher die Schaltfrequenzen sind. Ein typisches Beispiel ist ein [24V Leitungstreiber](#) für die serielle Kommunikation zu Subsystemen[2].

Eine Möglichkeit dieses Problem zu vermeiden ist es, bei nicht mit der Leitungsimpedanz abgeschlossenen Leitungen die Energie des reflektierten Signals in einer Kapazität zu speichern und für den Leitungstreiber zu nutzen[6]. Dies kann bis zu 50%, oder 3 Watt, Leistung bei Schaltfrequenzen von >250kHz einsparen. Damit erhöht sich die Zuverlässigkeit und reduziert eventuelle Kühlanforderungen. Der [iC-HX](#) ist ein 24V Leitungstreiber der diese Option, einfach durch Anschluss eines Kondensators, erlaubt. Tests haben ergeben, dass die Gehäusetemperatur des [iC-HX](#) so von 100°C auf ca. 70°C, bei einer Übertragungstaktrate von 200 kHz, reduziert wird.

Dies ist nur ein Beispiel der Verlustleistungsreduzierung bei Leitungstreibern. Auch gilt es alle anderen Systemteile mit hohen Taktfrequenzen und hohen Strömen (z.B. Leistungsausgänge) zu evaluieren, um Maßnahmen zur Leistungsreduzierung zu identifizieren (z.B. die Verwendung von FETs mit geringem $R_{\text{DS(on)}}$).

Bei der Ansteuerung von Relais und Ventilen unterscheidet sich die Ein-, Betriebs- und Abschaltcharakteristik sehr stark. Daher sollte auch dem Entwurf der Relais- und Ventilansteuerung besondere Beachtung geschenkt werden. So ist der benötigte Aktivierungsstrom ca. doppelt so groß wie der Betriebsstrom der, je nach Relais- oder Ventiltyp, nach 10-100ms noch benötigt wird. Nach der Aktivierungszeit kann der Strom typisch um ca. 30-50% gesenkt werden. Diese mögliche Leistungsreduzierung lässt sich beim Entwurf einer diskreten RC-Schaltung, oder auch bei einer Pulsweitensteuerungen(PWM) durch Änderung des Tastverhältnisses und/oder der Frequenz, berücksichtigen. Die PWM-Einheit kann entweder mit einem FPGA, einem Mikrocontroller PWM-Ausgang, oder aber mit einem speziellen ASSP-Baustein realisiert werden. Falls eine Funktionsüberwachung des Relais/Ventil sinnvoll ist, ist eine spezielle ASSP-Lösung meist sinnvoller. Bild 5 zeigt eine typische Treiberschaltung bis +36V mit dem [iC-GE](#) um die Verlustleistung zu reduzieren. Er ist direkt mit TTL-Signalen(auch aus +1,5V oder +3,3V Systemen) ansteuerbar. Das Relais/Ventil wird dabei gleichzeitig überwacht.

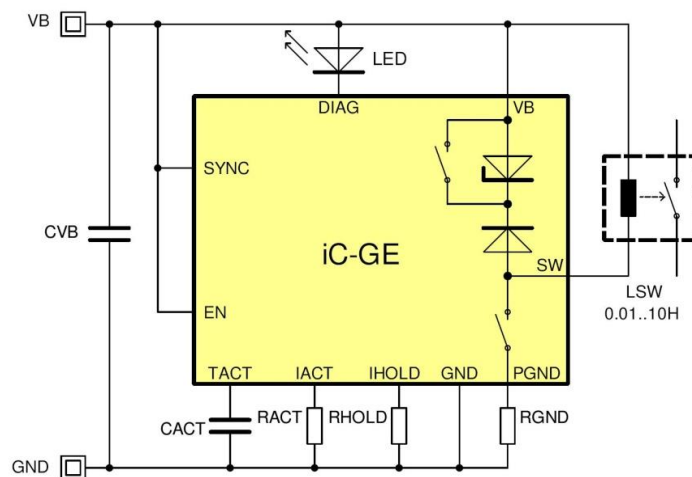


Bild 5: Integrierte Treiberlösung um Verlustleistung bei Relais und Ventilen zu reduzieren

Der Baustein benötigt extern nur zwei Widerstände(RHOLD, RACT), um den erforderlichen Aktivierungs-, bzw. Betriebsstrom einzustellen.

Diese integrierte Lösung regelt direkt den Strom, sodass auch Relais/Ventile mit unterschiedlichen Betriebsspannungen einsetzen zu können[7]. Um dies mit klassischen PWM-Lösungen zu erreichen, muss sowohl das Tastverhältnis, wie auch die Schaltfrequenz auf die unterschiedlichen Spannungen eingestellt werden.

Spezielle ASSP-Lösungen können auch einfach die notwendige Begrenzerdiode für die Relais-/Ventilspule, und die Fehlerüberwachung mit Serviceanzeige, integrieren. Es werden der Spulenstrom, die Betriebsspannung und die Chip-Temperatur überwacht. Im Fehlerfall wird ein blinkendes Signal für die Ansteuerung einer LED ausgegeben. Es kann auch als Interrupt für den Mikrocontroller dienen. Wie an den Beispielen oben zu sehen ist, sollte während der Entwicklungsphase bereits die Reduzierung der Verlustleistung gezielt eingeplant werden.

8) Zusammenfassung

Wie in diesem White Paper gezeigt wurde, gibt es beim Anschluss von Mikrocontrollern an industrielle Anwendungen viele besondere Entwurfskriterien zu beachten. Der Embedded-Mikrocontrollereinsatz in der Automation, SP-Steuerungen, Antrieben, Robotern und Maschinensteuerungen stellt besondere Anforderungen an die Schaltungsentwicklung. Diese können mit diskreten Bauteilen und Standard-ICs, oder mit speziellen ASSP-Lösungen, bedient werden. Letztere reduzieren den Entwicklungsaufwand und erhöhen auch die Packungsdichte, Funktionalität und Zuverlässigkeit Platine, bzw. der kompletten Mikrocontrolleranwendung.

9) Literatur

- [1] Mehr Sicherheit durch "Functional safety", Thomas Franken, [Automotive 1-2, 2009, Seite 41-43](#)
- [2] BiSS-Webseite: <http://www.biss-interface.com/>
- [3] E/A-Fehlerüberwachung in industriellen Maschinensteuerungen, Dr. David Lin, [E-Info, 06/2005](#)
- [4] Sensorsignale einfach konditionieren und sicher übertragen, Marko Hepp, [Elektronik Industrie-10/2004](#)
- [5] Laserdioden verstehen und sicher ansteuern, Uwe Malzahn, [Photonik 05/2003](#)
- [6] Energieeinsparung bei Signalübertragung über Leitungen, Dr. David Lin, [Green Engineering - 2009](#)
- [7] Relais an höhere Spannungen anpassen, Uwe Malzahn, [Elektronik Informationen - 08/2004](#)

Über iC-HAUS

iC-Haus GmbH ist ein führender, unabhängiger deutscher Hersteller von Standard-ICs (ASSP) und kundenspezifischen ASiC-Halbleiterlösungen. iC-Haus entwickelt, produziert und vertreibt seit über 25 Jahren anwendungsspezifische ICs für die Industrie-, Automobil- und Medizintechnik und ist weltweit vertreten. Die iC-Haus-Zellbibliotheken in CMOS-, Bipolar- und BCD-Technologie sind u. a. für die Realisierung von Sensor-, Laser/Opto- und Aktuator-ASiCs ausgelegt.

Die Assemblierung der ICs erfolgt in Standard-Plastikgehäusen oder nutzt die iC-Haus Chip-on-Board-Technik auch für komplette Mikrosysteme, Multi-Chip-Module oder mit Sensoren als optoBGA.

Weitere Informationen sind unter <http://www.ichaus.de> zu finden.