Ein Bild, das Text, Schrift, Screenshot, weiß enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

**Konzeption und Implementierung eines eigenständigen HMI-Systems auf Basis eines Encoder-Displays und einer selbst entwickelten Elektronikplatine mit STM32-Mikrocontroller zur Überwachung und Steuerung eines Pass-Laser-Engravers**

**Bachelor-Thesis**

zur Erlangung des Grades

**Bachelor of Engineering (B. Eng)**

HOCHSCHULE DARMSTADT

University of Applied Sciences

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

von

**Orian Jordy Jomo Kamgo**

**1116805**

Studiengang: Elektrotechnik und Informationstechnik

Abgabedatum: 15.12.2025

Referent: **Prof. Dr. Carsten Zahout-Heil**

Korreferent: **Prof. Dr. Christian Jakob**

Industriebetreuer: **Dr.-Ing Sebastian Hinrichs**

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig erstellt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Soweit ich auf fremde Materialien, Texte oder Gedankengänge zurückgegriffen habe, enthalten meine Ausführungen vollständige und eindeutige Verweise auf die Urheber und Quellen. Alle weiteren Inhalte der vorgelegten Arbeit stammen von mir im urheberrechtlichen Sinn, soweit keine Verweise und Zitate erfolgen. Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn die vorstehende Erklärung sich als unrichtig erweist.

Ort, Datum Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

[1. Einleitung 1](#_Toc216090886)

[1.1 Motivation 1](#_Toc216090887)

[1.2 Zielsetzung 2](#_Toc216090888)

[1.4 Anforderungen und Rahmbedingungen 3](#_Toc216090889)

[1.3 Aufbau der Arbeit 5](#_Toc216090890)

[2. Stand der Technik 7](#_Toc216090891)

[3. Theoretische Grundlagen 15](#_Toc216090892)

[3.1 TFT-Display 15](#_Toc216090893)

[3.2 Mikrocontroller 17](#_Toc216090894)

[3.2.1 STM32-Mikrocontroller Familie 18](#_Toc216090895)

[3.3 HMI-System 20](#_Toc216090896)

[3.4 CAN-Bus 20](#_Toc216090897)

[3.4.1 Allgemeine Informationen 20](#_Toc216090898)

[3.4.2 Verschiedene Varianten der CAN-Busses 21](#_Toc216090899)

[4. Konzept 21](#_Toc216090900)

[3.1 Entwurf der Platine 21](#_Toc216090901)

[3.1.1 Anforderungen 21](#_Toc216090902)

[3.1.2 Leiterplattenentwurf 22](#_Toc216090903)

[3.2 Softwareimplementierung 27](#_Toc216090904)

[3.2.1 Design Software 27](#_Toc216090905)

[Literatur 28](#_Toc216090906)

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Qualität und Leistungsfähigkeit der Mensch-Maschine-Schnittstelle (human-machine interface – HMI) gewinnt an Relevanz bei der Gesamtbewertung einer Maschine [1, S. 137]. HMI-Systeme ermöglichen die Interaktion zwischen Menschen und Maschine, indem sie Benutzeroberflächen bereitstellen, über die Prozesse überwacht, Zustände visualisiert und Steuerbefehle übermittelt werden können [2, S. 4]. Insbesondere in der Automobilindustrie hat sich das HMI als ein integraler Bestandteil etabliert, da nahezu jedes Fahrzeug mit einem integrierten Display ausgestattet ist, das maßgeblich zur Sicherheit sowie zur Kommunikation zwischen Fahrer und Fahrzeug beiträgt. Fehlerhafte HMI-Systeme können schwerwiegende Konsequenzen haben. Sie können zu Fehlbedienungen und Produktionsausfällen führen und die Sicherheit von Menschen und Maschine beeinträchtigen.

Das bestehende System, in welches das neue HMI integriert werden soll, verwendet derzeit ein konventionelles Anzeige- und Steuerkonzept auf Basis von RGB-LEDs. Diese klassische Form des HMI weist eine starke funktionale Einschränkung auf, da sie lediglich einfache Status- oder Warnsignale darstellen kann. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wird die Entwicklung eines modernen HMI-Systems auf Basis eines TFT-Displays angestrebt. Ziel dieser Entwicklung ist die Optimierung der Informationsdarstellung und der Benutzerinteraktion. Ergänzend zu den erweiterten Anzeigemöglichkeiten soll das System zusätzliche Funktionen bieten, beispielsweise das Auswerfen eines Passes durch Betätigung des Push-Buttons auf dem Display.

Eine besondere Herausforderung besteht in der Integration der Elektronikkomponenten – bestehend aus Mikrocontroller, Spannungswandlern, und Kommunikationsschnittstellen – auf einer kompakten Leiterplatte mit einem maximalen Durchmesser von 40 mm. Eine präzise Abstimmung zwischen Hard- und Software ist erforderlich, um eine zuverlässige Funktionalität und störungsfreie Kommunikation zu gewährleisten. Das Ziel des Projekts besteht darin, durch den Einsatz zeitgemäßer Technologien ein effizientes, sicheres und benutzerfreundliches HMI-System zu entwickeln, das den aktuellen Anforderungen entspricht.

Die Integration des entwickelten HMI-Systems in der Maschine ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei dem Gegenstand handelt es sich um einen sogenannten Laser-Pass-Engraver. Eine ausführliche Beschreibung des Geräts erfolgt in Kapitel 2.1.

Encoder Display

Ein Bild, das Text, Haushaltsgerät, Im Haus, Design enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Abbildung 1: Laser-Pass-Engaver der Firma Surys GmbH und Encoder-Display der Firma ddm hopt+schuler GmBH&Co. KG

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung eines Human-Machine-Interface (HMI)-Systems, das eine zuverlässige Visualisierung der Systemzustände und Systeminformationen auf einem TFT-Display ermöglicht. Über den im Display integrierten Encoder und Push-Button sollen zusätzlich Steuerbefehle an die Maschine übermittelt werden können. Das System zielt darauf ab, eine einwandfreie und stabile Kommunikation zwischen der Maschine und dem Display zu gewährleisten.

Im Rahmen der Entwicklung wird eine effiziente elektronische Leiterplatte entworfen und realisiert, welche sämtliche notwendigen Komponenten integriert. Die Hardware ist konzipiert, um eine sichere, unterbrechungsfreie und störungsfreie Datenübertragung zwischen Display und Maschine zu gewährleisten. Parallel dazu erfolgt die Entwicklung einer optimierten Softwarearchitektur, die eine reibungslose Interaktion zwischen Hard- und Softwarekomponenten gewährleistet und eine effiziente Systemsteuerung ermöglicht.

Zur Erreichung dieser Zielsetzung werden verschiedene Mikrocontroller und serielle Schnittstellen analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für die Anwendung bewertet. Der Fokus der Untersuchung liegt auf den Mikrocontrollern der STM32-Serie sowie den Kommunikationsschnittstellen SPI, I2C, CAN-BUS und RS485. Auf Grundlage der durchgeführten Analyse wird ein technisches Gesamtkonzept für ein leistungsfähiges HMI-System entwickelt. Im Anschluss an die Installation erfolgt die Implementierung der Software sowie die Inbetriebnahme des Systems. Abschließend erfolgt eine Funktionsprüfung und Integrationsbewertung, um die Einhaltung der definierten Anforderungen und die Systemstabilität zu verifizieren.

Das Display soll eine eigenständige Hardware sein, welche unabhängig vom Machinencontroller arbeitet. Und mittels Bus System an die Maschine Hardware eingebunden werden kann. Dies soll auch eine einfache Integration in Folge Projekte ermöglichen.

## 1.4 Anforderungen und Rahmbedingungen

Im Rahmen der Entwicklung des HMI-Systems sind eine Vielzahl technischer und funktionaler Anforderungen sowie spezifische Randbedingungen zu berücksichtigen. Eine wesentliche Anforderung besteht in der zuverlässigen Aktualisierung der Maschinenzustände auf dem Display. Die Zustandsabfrage kann dabei sowohl über Polling-Mechanismen als auch über ereignisgesteuerte Trigger (Event-Driven Architecture) erfolgen.

Darüber hinaus ist eine Signalintegrität bereits während der Entwurfsphase sicherzustellen. Dies umfasst sowohl ein zielgerechtes Leiterplattendesign als auch eine robuste Firmwarearchitektur, um Störanfälligkeiten im Übertragungsweg zu minimieren.

Die Hardware bedarf zudem geeignete Maßnahmen, um gegen externe Störeinflüsse abgesichert zu sein. Hierzu zählen insbesondere ESD-Schutz (Electrostatic Discharge Protection) und EMI-Unterdrückung (Electromagnetic Interference). Nur so kann eine zuverlässige Funktionalität des HMI-Systems gewährleistet werden.

Weiterhin ist eine nachträgliche Aktualisierung der Firmware des Mikrocontrollers bei Bedarf vorzusehen. Zu diesem Zweck werden geeignete Programmier- und Debugschnittstellen vorgesehen. In der vorliegenden Arbeit werden insbesondere SWD (Serial Wire Debug) sowie USB als mögliche Ansätze untersucht. Dabei wird darauf geachtet, die Auswahl flexibel an die Anforderungen der Zielanwendung anzupassen.

Für den Datenaustausch zwischen HMI-System und Maschine ist eine serielle Kommunikationsschnittstelle erforderlich. Die Auswahl des geeigneten Kommunikationsbusses wird maßgeblich durch die Schnittstellen der bestehenden Maschinensteuerung bestimmt, welche die Protokolle SPI, I2C, CAN-Bus und RS-485 unterstützen. Die gewählte Schnittstelle muss eine ausreichende Datenrate, Robustheit sowie Störsicherheit gewährleisten, um eine zuverlässige Übertragung sicherzustellen.

Hinsichtlich der mechanischen Integration des Systems wurde festgelegt, dass die Leiterplatte über Montagebohrungen zur Verschraubung mit dem Display verfügt. Für die Realisierung ist es erforderlich, dass im Leiterplattenlayout Bohrungen mit einem Innendurchmesser von 3 mm und einem Außendurchmesser von 5 mm berücksichtigt werden.

Die Spannungsversorgung des HMI-Systems erfolgt über die Maschine, welche eine Versorgungsspannung von 5 V bereitstellt. Für den eingesetzten Mikrocontroller muss eine entsprechende Aufbereitung und Stabilisierung vorgenommen werden. Das HMI-System besteht aus einem TFT-Display mit Menüstruktur, wobei die Benutzereingabe über einen integrierten Drehencoder mit zusätzlicher Push-Button-Funktion erfolgt. Zur Realisierung der erforderlichen Datenverarbeitung und Interaktion wird ein STM32-Mikrocontroller eingesetzt, da diese Mikrocontrollerfamilie im Entwicklungsumfeld bereits etabliert ist und eine hohe Leistungsfähigkeit sowie langfristige Verfügbarkeit bietet.

Das Display dient der Visualisierung von Statusinformationen der Maschine, sowie Änderungen relevanter Maschinenparameter. Die Firmwareentwicklung erfolgt in der herstellereigenen, kostenfreien Entwicklungsumgebung STM32CubeIDE. Für die Erstellung der Leiterplatte wird Altium Designer eingesetzt. Der Entwicklungsumfang umfasst gemäß den vorliegenden Informationen die Konzeption, die Auswahl der Bauteile, die Schaltplanerstellung, die Ausarbeitung des PCB-Layouts, die Erstellung der Fertigungsunterlagen sowie die Übergabe an den Leiterplattenhersteller. Darüber hinaus umfasst der Projektumfang auch die Bauteilbeschaffung sowie die Korrespondenz mit Lieferanten.

Das finale Ziel des Projekts besteht in der Realisierung eines funktionsfähigen Prototyps einschließlich der vollständigen technischen Dokumentation zur Übergabe an die Serienentwicklung. Zur Verifikation der Funktionalität wird zudem eine geeignete Testumgebung in die bestehende Maschinensteuerung integriert, um eine reproduzierbare Prüfung des HMI-Systems zu gewährleisten.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Bachelorarbeit ist in sechs Hauptkapitel gegliedert, die den Entwicklungsprozess des HMI-Systems von der theoretischen Grundlage bis zur praktischen Umsetzung systematisch darstellen.

Im ersten Kapitel wird eine Einleitung gegeben, in der die Motivation für das Projekt dargelegt und die Zielsetzung definiert wird. Darüber hinaus erfolgt eine Darstellung des Aufbaus der Arbeit, um dem Leser eine Übersicht über den strukturellen Ablauf zu vermitteln.

Das zweite Kapitel beinhaltet die Analysephase, in der zunächst die für das Projekt relevanten Begrifflichkeiten und Technologien erläutert werden. Im weiteren Verlauf erfolgt die Beschreibung der IST-Situation des bestehenden Systems sowie eine Untersuchung des Standes der Technik hinsichtlich moderner HMI-Systeme. Diese Analyse bildet die Grundlage für die Definition der projektspezifischen Anforderungen.

Im dritten Kapitel erfolgt eine systematische Darstellung der aus Analyse und Zielsetzung abgeleiteten Anforderungen an das neue HMI-System. In diesem Prozess werden sowohl funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen berücksichtigt.

Das vierte Kapitel widmet sich der Konzeptentwicklung, in der ein technisches und softwareseitiges Konzept zur Realisierung des HMI-Systems erarbeitet wird. In diesem Kontext werden sowohl die Hardwarearchitektur als auch die Softwarestruktur beschrieben und begründet.

Im fünften Kapitel erfolgt die Validierung des entwickelten Systems. Im Rahmen der Veranstaltung werden die Resultate der technischen Implementierung präsentiert und anhand von Tests sowie grafischen Darstellungen analysiert. Des Weiteren erfolgt eine Überprüfung, ob die definierten Anforderungen erfüllt wurden.

Im sechsten Kapitel werden schließlich die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen und zukünftige Einsatzmöglichkeiten des HMI-Systems gegeben.

# 2. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik sowie wissenschaftliche und praxisrelevante Arbeiten im Umfeld von Pass-Laser-Engravern und Human-Machine-Interface-Systemen (HMI) vorgestellt. Das Ziel besteht darin, wesentliche technologische Entwicklungen, etablierte Lösungen und zentrale Trends zu identifizieren, die für die Gestaltung des HMI-Systems im Maschinenkontext von besonderer Relevanz sind. Die vorliegende Arbeit verfolgt einen methodischen und technologischen Lösungsansatz, der durch eine systematische Analyse bestehender Konzepte und technischer Ansätze fundiert und eingeordnet werden soll.

## 2.1 Pass-Laser-Engraver

Der im Unternehmen IN Groupe / SURYS eingesetzte PASS-Lasergravierer stellt ein spezialisiertes System zur sicheren Personalisierung von Identitäts- und Reisedokumenten, insbesondere von Pässen, dar. Das System dient der direkten Gravur von personenbezogenen Daten, maschinenlesbaren Informationen sowie sicherheitsrelevanten Grafiken in die Polycarbonat-Datenseite des Dokuments. Die Lasergravur generiert dauerhafte und fälschungssichere Merkmale, die eine hohe Beständigkeit gegenüber chemischen Einflüssen und Manipulationsversuchen aufweisen, sodass als Endprodukt ein vollständig personalisierter, einsatzbereiter elektronischer Reisepass mit integrierten Sicherheitsmerkmalen entsteht. In der Konsequenz wird ein durchgängiger, hochgradig automatisierter Personalisierungsprozess realisiert. Diese präzise Lasergravurtechnologie leistet einen wesentlichen Beitrag zur Erfüllung der hohen Sicherheits-, Qualitäts- und Effizienzanforderungen, die an moderne Pass- und Identitätsdokumente gestellt werden[3,4]. Eine Abbildung des Geräts ist in Abbildung … dargestellt.

## 2.2 Stand des HMI-Systems

Das vorliegende HMI-System des Pass Laser Engravers, welches auf drei RGB-LEDs basiert, repräsentiert eine elementare Form der Mensch-Maschine-Schnittstelle und findet in kompakten sowie kostenbewussten Maschinen häufig Anwendung. Solches System weist sowohl positive als auch negative Eigenschaften auf, die im Folgenden gegenübergestellt werden.

**Vorteile:**

* **Hohe Robustheit:** LEDs sind unempfindlich gegenüber Vibrationen, Staub und Temperaturschwankungen, was sie besonders für industrielle Umgebungen geeignet macht.
* **Einfache Ansteuerung:** Die Ansteuerung erfolgt über digitale Ausgänge, wodurch kaum Software- oder Hardwareaufwand entsteht.
* **Geringer Platzbedarf:** Das System benötigt nur sehr wenig Einbauraum auf der Frontplatte und der Leiterplatte.
* **Hohe Zuverlässigkeit:** Durch die einfache Struktur ist die Fehleranfälligkeit gering.

**Nachteile:**

* **Sehr eingeschränkte Informationsdarstellung:** Es können ausschließlich Zustände über Farben signalisiert werden; detaillierte Prozessinformationen sind nicht darstellbar.
* **Keine Interaktionsmöglichkeit:** Der Benutzer kann keine Parameter ändern oder gezielt Eingaben vornehmen.
* **Mehrdeutigkeit der Signale:** Farbcodes müssen erlernt werden und können bei schlechter Beleuchtung oder Farbsehschwäche missverstanden werden.
* **Keine Prozessvisualisierung:** Weder Messwerte noch Arbeitsfortschritte oder Fehlermeldungen können textlich oder grafisch angezeigt werden.
* **Begrenzte Erweiterbarkeit:** Zusätzliche Funktionen erfordern meist Hardwareänderungen.
* **Nicht mehr zeitgemäß:** Für moderne, komplexe Maschinen entspricht ein reines LED-HMI nicht mehr den Anforderungen an Bedienkomfort und Rückverfolgbarkeit.

Das LED-basierte HMI-System findet seinen Einsatz bei der Realisierung sehr einfacher Zustandsanzeigen und zeichnet sich durch einen geringen Kosten- und Hardwareaufwand aus. Für moderne Anwendungen, wie den Pass-Laser-Engraver, die hohen Anforderungen an Prozessüberwachung, Parametrierung und Benutzerinteraktion stellt, ist ein solches System jedoch funktional stark limitiert. Daher ist die Analyse verschiedener HMI-Lösungen (Human-Machine-Interface) von essentieller Bedeutung.

## 2.3 Übersicht bestehender HMI-Lösungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein HMI-System entwickelt. Um eine fundierte Einordnung dieses Systems zu gewährleisten, werden im Folgenden die wichtigsten in der Industrie eingesetzten HMI-Lösungsansätze vorgestellt. Diese unterscheiden sich in Bezug auf Komplexität, Leistungsfähigkeit, Kosten und Integrationsaufwand.

### 2.3.1 Displaybasierte Embedded-HMI-Systeme (Mikrocontroller + TFT)

Displaybasierte Embedded-HMI-Systeme sind eine Kategorie von Benutzerschnittstellen, die sich durch eine kompakte Bauweise und Integration in ein Gerät auszeichnen. Ihre Funktionsweise basiert auf der Kombination eines Mikrocontrollers mit einem grafischen Display, wobei in der Regel ein TFT-LCD zum Einsatz kommt. Im Kapitel Theoretische Grundlage wird den Begriff TFT-LCD ausführlich erklärt. Die genannten Komponenten gestatten die Visualisierung von System- und Prozesszuständen, die Darstellung von Messwerten sowie die Eingabe von Steuerbefehlen über Touchscreen, Encoder oder Tasten.[5]

Ein Bild, das Elektronik, Schaltung enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Displaybasierte Embedded HMI-System[6]

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Vor und Nachteile des Systems[7] [8] [9]:

|  |  |
| --- | --- |
| Vorteile | Nachteile |
| **Kombination aus Mikrocontroller und TFT-Display** in einem kompakten Modul | **Eingeschränkte grafische Möglichkeiten** bei aufwändigen Animationen oder komplexen Visualisierungen |
| **Direkte Maschinenanbindung** über serielle Schnittstellen (z. B. SPI, I²C, UART, CAN, RS-485) | **Erhöhter Entwicklungsaufwand**, da sowohl Hardware als auch Software individuell erstellt werden müssen |
| **Echtzeitfähigkeit** durch direkten Hardwarezugriff ohne Betriebssystem | **Geringere Erweiterbarkeit**, da spätere Funktionsänderungen oft Hardware-Anpassungen erfordern |
| **Geringer Energieverbrauch** im Vergleich zu PC-basierten Lösungen |  |
| **Hohe Anpassbarkeit**, da sowohl Hardware als auch Firmware projektspezifisch ausgelegt werden können |  |

Die Nutzer schätzen diese Systeme insbesondere aufgrund der Tatsache, dass sie trotz kompakter Hardware eine "gerätelokale Smartphone-Erfahrung" bieten. Ein farbiges TFT-Display ermöglicht eine gut lesbare, grafische Darstellung von Zuständen, Symbolen und Prozesswerten. In Kombination mit Touch, Tasten oder Encoder entsteht eine direkte, intuitive Interaktion ohne Umweg über einen PC. Die grafische Benutzeroberfläche kann an die spezifischen Erfordernisse der Maschine angepasst werden, beispielsweise in Bezug auf das Layout, die Sprache oder die Symbole. Dadurch werden die für den Benutzer relevanten Informationen und Bedienpfade angezeigt, was zu einer Reduzierung von Fehlbedienungen und einer Verkürzung der Einarbeitungszeiten führt. Darüber hinaus bieten TFT-Displays hohe Auflösung, schnelle Reaktionszeit, gute Helligkeit und lange Verfügbarkeit in industriellen Anwendungen. Dies führt zu einer zuverlässigen, modernen und ergonomischen Wahrnehmung der Displays.[10], [11]

### 2.3.2 Industrielle Panel-HMIs (Touchpanels)

Industrielle Panel-HMIs sind als kompakte, vorkonfektionierte Bediengeräte konzipiert. Sie integrieren ein robustes Touchdisplay, eine Recheneinheit sowie standardisierte industrielle Kommunikationsschnittstellen. Sie fungieren als grafische Benutzerschnittstelle, die dazu dient, technische Prozesse in Maschinen und Anlagen zu steuern, zu visualisieren und zu überwachen. Aufgrund ihrer industriellen Auslegung sind sie für den dauerhaften Einsatz in anspruchsvollen Produktionsumgebungen konzipiert, in denen Erschütterungen, Temperaturwechsel, Feuchtigkeit oder elektromagnetische Störeinflüsse auftreten können.[12]

Ein Bild, das Text, Elektronik, Maschine, Im Haus enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Industrielle Panel HMI[13]

Die nachfolgende Tabelle stellt die Vor und Nachteile dar:[14], [15]

|  |  |
| --- | --- |
| Vorteile | Nachteile |
| **Hohe Zuverlässigkeit:** Durch robuste Bauweise und industrielle Schutzklassen für harte Einsatzumgebungen. | **Hohe Kosten:** Industrielle Panels sind deutlich teurer als embedded HMI-Lösungen mit Mikrocontroller. |
| **Schnelle Inbetriebnahme:** Da Hard- und Softwareplattform bereits integriert und standardisiert sind. | **Begrenzte Anpassbarkeit:** Hardware- und Softwarearchitektur sind oft herstellergebunden. |
| **Erweiterte Visualisierungsmöglichkeiten:** Grafische Darstellungen, Trends, Parameteransichten, Rezepturen und Fehlermeldungen. | **Erhöhter Platzbedarf:** Für Frontmontage oder Schaltschrankintegration wird vergleichsweise viel Raum benötigt. |
| **Standardisierte Integration:** Kompatibilität mit gängigen Automatisierungsprotokollen (z. B. Modbus, OPC UA, Profinet). | **Überforderung bei einfachen Systemen:** Für kleinere Maschinen kann die Leistung eines Industrie-Panels unverhältnismäßig hoch sein. |
| **Hoher Bedienkomfort:** Touchoberflächen ermöglichen effiziente Navigation und reduzieren Schulungsaufwand. |  |

Für Benutzer gelten industrielle Panel-HMIs als besonders attraktiv, da sie eine intuitive, benutzerfreundliche und visuell klare Interaktion ermöglichen. Visuelle Statusanzeigen, Menüstrukturen und Fehlermeldungen können demnach schneller interpretiert werden als traditionelle LED-Signale oder mechanische Tasten. Die Verwendung großer Displays hat sich in der Praxis als effektives Mittel zur Verbesserung der Situationswahrnehmung erwiesen. Empirische Studien belegen, dass sich dadurch die Fehlerquote bei der Bedienung reduziert und die Prozesssicherheit erhöht.[16]

### 2.3.4 Web-basierte und Remote-HMI-Systeme

Web-basierte und Remote-HMI-Systeme sind eine Art der Bedienlösungen, bei denen die Visualisierung über einen integrierten Webserver erfolgt. Die Nutzung kann mit Standard-Webbrowsern auf beliebigen Endgeräten erfolgen. Die technische Grundlage ist eine Client-Server-Architektur. Die Steuerung stellt die HMI-Seiten als Webanwendung zur Verfügung, bindet Prozessdaten ein und erlaubt den gleichzeitigen Zugriff mehrerer Nutzer. Dies ermöglicht eine Bedienung, Diagnose und Überwachung sowohl lokal als auch remote.[17], [18]

Ein Bild, das Screenshot, Tablet, Quadrat, Text enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Web-basierte HMI-System[19]

|  |  |
| --- | --- |
| Vorteile | Nachteile |
| Hohe Flexibilität und Skalierbarkeit, ideal für Industrie 4.0. | Abhängigkeit von Netzwerkverfügbarkeit und Latenzen, was in industriellen Umgebungen kritisch sein kann. |
| Einfache Integration in IT-Netzwerke, inklusive Cloud-Anbindung. | Abhängigkeit von Netzwerkverfügbarkeit und Latenzen, was in industriellen Umgebungen kritisch sein kann. |
| Geringere Hardwarekosten, da kein lokales Display benötigt wird. | Nicht ideal für sicherheitskritische Prozesse, die lokale, echtzeitfähige Bedienoberflächen benötigen. |
| Remote-Wartung und Diagnose reduzieren Servicezeiten und Stillstände. | Variierende Bedienqualität, abhängig vom Endgerät des Nutzers. |

Der Vergleich zeigt, dass Embedded-HMI-Systeme auf Mikrocontroller-Basis mit TFT-Display einen optimalen Kompromiss aus Funktionsumfang, Kosten, Anpassbarkeit und Integrationsfähigkeit darstellen. Die Eignung dieser Systeme für den vorgesehenen Einsatz in einem Pass-Laser-Engraver resultiert insbesondere aus deren kompakter Bauweise, hoher Informationsdichte und individueller Anpassungsmöglichkeit.

# 3. Theoretische Grundlagen

## 3.1 TFT-Display

Ein **TFT-Display** (Thin-Film-Transistor-Display) ist eine spezielle Form eines LCDs (Liquid Crystal Displays), bei dem jeder einzelne Bildpunkt – also jeder Pixel – durch einen eigenen Dünnschichttransistor angesteuert wird. Kombiniert mit einem Drehencoder, bietet der Im Vergleich zu älteren passiven LCD-Technologien ermöglicht das TFT-Prinzip eine wesentlich präzisere Steuerung der Bildpunkte, wodurch eine deutlich bessere Bildqualität, höhere Auflösungen und schnellere Reaktionszeiten erzielt werden.[20]

Ein Bild, das Kreis, Kompass enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Display Encoder 582

|  |  |
| --- | --- |
| **Technische Merkmale** | **TFT-Display** |
| Betriebsspannung | 3.3 V |
| Displaygröße | 1.28 Zoll |
| Auflösung | 240 x 240 Pixel |
| Pixelabstand | 0.135 x 0.135 mm |
| Schnittstelle | SPI-Schnittstelle (4-Leiter) |
| Treiber-IC | GC9A01 |
| Aktive Anzeigefläche | Ø 32.4 mm |
| Gewicht | 8.4 g |
| Betriebstemperatur | -20 °C bis +70 °C |

Technische Daten des angewandten Displays

Selbstverständlich weist diese Displaytechnologie sowohl Vorteile als auch Nachteile auf.

**Vorteile:**

* **Klare Darstellung und hohe Auflösung:** TFTs bieten exakte Anzeige von Text, Grafiken oder Messwerten – von QVGA bis Full HD und darüber hinaus. Die feine Pixelstruktur erlaubt auch bei kleinen Zollgrößen eine detailgetreue Darstellung.[20]
* **Geringe Reaktionszeit für dynamische Inhalte:** Moderne Panels bieten Reaktionszeiten von 8–25 ms, was für die meisten industriellen Anwendungen ausreichend ist.[20]
* **Hohe Helligkeit und gute Ablesbarkeit:** Dank leistungsfähiger Hintergrundbeleuchtung (oft 500–1000 cd/m²) sind moderne TFT-Displays auch bei schwierigen Lichtverhältnissen gut lesbar.[20]
* **Robuste Module für industrielle Bedingungen:** Viele TFT-Module sind für hohe Temperaturbereiche, Schockbelastungen und Langzeitverfügbarkeit konzipiert.[20]

**Nachteile:**

* **Energieverbrauch bei hoher Helligkeit:** Für gute Ablesbarkeit unter Sonnenlicht ist eine starke LED-Hinterleuchtung nötig, was den Stromverbrauch und die thermische Belastung erhöht.[20]
* **Eingeschränkter Schwarzwert und Kontrast:** Da TFTs auf LCD-Technologie basieren, ist echtes Schwarz schwer erreichbar – das Display ist nie vollständig „aus“, da die Hintergrundbeleuchtung immer aktiv ist.[20]

## 3.2 Mikrocontroller

Ein Mikrocontroller (MCU) wird in Abbildung … dargestellt. Es handelt sich dabei um ein komplexes System on Chip (SoC), das auf einem einzigen integrierten Schaltkreis (IC) einen Prozessorkern (Control Process Unit, CPU), Speicher (EEPROM, FLASH und RAM), analoge IPs und viele Ein-/Ausgänge (IOs) integriert.[21]. Mikrocontroller weisen eine Reihe von Vorteilen auf, die ihre Anwendung in verschiedenen Bereichen ermöglichen. Dazu zählen ihre kompakte Größe, die niedrigen Kosten, der geringe Stromverbrauch und die hohe Zuverlässigkeit.[22]. MCUs sind für den Einsatz in eingebetteten Anwendungen konzipiert. Im Gegensatz dazu werden sie mit weniger anspruchsvollen Technologien als Mikroprozessoren entwickelt und arbeiten mit niedrigeren Frequenzen.

Ein Bild, das Text, Screenshot, Farbigkeit, Rechteck enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Mikrocontroller Schematisch

Die Entwicklung eines solchen Sytems erfolgt typischerweise in mehreren fachlich getrennten Domänen. Zu den relevanten Aspekten zählen in diesem Zusammenhang das Analogdesign (u. a. A/D- und D/A-Wandler, Spannungsregelung und Überwachung), das Digitaldesign (Prozessor-Kern, Bus- und Kommunikationslogik), das I/O-Design (Anbindung des Chip-Kerns an die Gehäusepins inklusive Schutzbeschaltungen) sowie das SoC-Integrationsdesign, in dem die verschiedenen IP-Blöcke zu einem vollständigen System zusammengeführt werden.

Um den vielfältigen Anforderungen des Marktes gerecht zu werden, wurden verschiedene Mikrocontrollerfamilien entwickelt.

### 3.2.1 STM32-Mikrocontroller Familie

In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf die Mikrocontroller der STM32F-Serie gelegt, die für Mainstream- und Hochleistungsanwendungen konzipiert wurden.

Die Abbildung … veranschaulicht die diversen Mikrocontrollerfamilien von STMicroelectronics sowie deren jeweilige Merkmale. Ein Mikrocontroller stellt einen programmierbaren integrierten Schaltkreis dar und kann in einem breiten Spektrum von Anwendungen eingesetzt werden. Er findet beispielsweise Anwendung in Haushaltsgeräten wie Waschmaschinen, in Mobiltelefonen, in der Medizintechnik, im Automobilbereich, in der Industrieautomation sowie in der Robotik.

Ein Bild, das Text, Screenshot, Webseite, Schrift enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

ST-Mikrocontrollers Familie[23]

Diese Familie des Herstellers STMicroelectronics beinhaltet eine Vielzahl von 32-Bit-Mikrocontrollern, welche auf unterschiedlichen ARM-Cortex-M-Kernen basieren (darunter M0, M3 und M4). Sie zeichnet sich durch eine hohe Rechenleistung, große Flash- und RAM-Kapazitäten, umfangreiche Peripherie (z. B. ADC, DAC, SPI, I2C, UART, USB, CAN) sowie einen weiten Taktfrequenzbereich aus. Aufgrund spezifischer Eigenschaften und Merkmale ist sie insbesondere für HMI-Anwendungen geeignet.

## 3.3 HMI-System

Human-Machine-Interfaces (HMIs) sind zentrale technologische Komponenten, die als Schnittstelle zwischen Menschen und Maschine fungieren. Ihr primärer Zweck besteht darin, den Benutzern den Zugriff auf technische Systeme, Produktionsanlagen oder Prozessleittechnik zu ermöglichen, um Zustände zu überwachen und gezielt auf Prozesse einzuwirken.[24].

## 3.4 CAN-Bus

In diesem Abschnitt wird der Controller Area Network (CAN-Bus) als zentrale Kommunikationsschnittstelle des Gesamtsystems vorgestellt. Da über diesen Bus der Datenaustausch zwischen dem Maschinencontroller und dem HMI-System erfolgt, bildet er einen elementaren Bestandteil der Systemarchitektur. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle eine ausführlichere Erläuterung des CAN-Busses als der übrigen Schnittstellen.

### 3.4.1 Allgemeine Informationen

Der CAN-Bus (Controller Area Network) wurde ab 1983 von der Robert Bosch GmbH entwickelt, um komplexe Verkabelungssysteme im Fahrzeug deutlich zu vereinfachen und eine effiziente Kommunikation zwischen verschiedenen Steuergeräten zu ermöglichen. Die Erstpräsentation des Systems erfolgte 1986 auf dem SAE-Kongress, während der internationale Durchbruch im Jahr 1991 mit der Veröffentlichung der CAN-Spezifikation Version 2.0 erzielt wurde. Die Normung des Protokolls wurde schließlich durch die ISO vorgenommen und ist gegenwärtig in den Normen ISO 11898-1 bis ISO 11898-5 festgelegt[25]. Aufgrund der hohen Störsicherheit, der geringen Kosten und der Echtzeitfähigkeit wird CAN nicht nur in der Automobilindustrie, sondern auch in vielen anderen Branchen (z. B. in Nutzfahrzeugen, mobilen Arbeitsmaschinen, Eisenbahnen, in der Medizintechnik, in der Industrieautomation, in Aufzügen, und als Maschinenbussystem) eingesetzt.[26].

Das Controller Area Network (CAN) verbindet mehrere gleichberechtigte Komponenten (Knoten, Node) über einen 2-Draht Bus plus zusätzlicher Masseleitung miteinander.[26]

Ein Bild, das Text, Schrift, Reihe, Screenshot enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

*Controller Area Network (CAN)*

### 3.4.2 Verschiedene Varianten der CAN-Busses

# 4. Konzept

## 3.1 Entwurf der Platine

### 3.1.1 Anforderungen

Bevor die Leiterplatte entworfen wurde, die den zentralen Bestandteil des HMI-Systems bildet, wurden die grundlegenden elektrischen und mechanischen Anforderungen definiert. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

* ESD- und EMI-Schutzmaßnahmen: Elektronische Komponenten müssen durch geeignete Schutzschaltungen gegenüber elektrostatischer Entladung (ESD) und elektromagnetischen Störungen (EMI) abgesichert werden. Dadurch sollen die Betriebssicherheit und die Lebensdauer des Systems erhöht werden.
* Signalintegrität: Die Leiterplatte ist so auszulegen, dass eine störungsfreie Übertragung der digitalen und analogen Signale gewährleistet ist.
* Mechanische Befestigung: Für die Montage auf der Rückseite des Displays sind mechanische Befestigungsbohrungen zu integrieren.
* Status-LEDs: Zur Anzeige systemrelevanter Zustände ist der Einsatz zweier LEDs vorgesehen:

eine grüne LED zur Darstellung der anliegenden Betriebsspannung und

eine rote LED, die während eines Firmware-Updates blinkt und somit den Aktualisierungsvorgang signalisiert.

* Firmware-Update-Schnittstellen: Für das Aktualisieren der Firmware sollen zwei Möglichkeiten implementiert werden:

ein USB-Anschluss zum Hochladen neuer Firmware und ein zusätzlicher programmierbarer Steckverbinder, über den mithilfe eines ST-Link-V3-Sets ein Firmware-Update durchgeführt werden kann. Diese Redundanz erhöht die Flexibilität bei Service- und Wartungsprozessen.

* Kommunikationsschnittstellen: Für die Kommunikation mit der Maschinensteuerung ist eine CAN-Bus-Schnittstelle vorgesehen, da diese besonders robust ist und Fehlertoleranz bietet. Zusätzlich wird eine SPI-Schnittstelle integriert, die einen schnellen Datenaustausch zwischen Mikrocontroller und TFT-Display ermöglicht.
* Hardware-Reset: Zur Wiederherstellung des Systemzustands ist ein dedizierter Hardware-Reset-Taster auf der Leiterplatte zu platzieren.

### 3.1.2 Leiterplattenentwurf

Im Rahmen der Arbeit wurde Altium Designer zur Entwicklung der Leiterplatte eingesetzt. Die wesentlichen Bauteile, ihre Funktionen sowie ihre Platzierung werden nachfolgend erläutert.

Die Energieversorgung der Platine wird durch den CAN-Bus-Stecker sichergestellt, welcher mit der Maschinensteuerung verbunden ist. Über den ersten Pin werden +5 V bereitgestellt und an die Leiterplatte weitergeleitet. Da der verwendete Mikrocontroller jedoch mit einer Betriebsspannung von 3,3 V arbeitet, muss diese Spannung über einen geeigneten Spannungswandler reduziert werden. Die Abbildung… zeigt die Schaltung der Spannungswandler. Diese Verschaltung des Wandlers wurden gemäß den Vorgaben des jeweiligen Datenblatts ausgelegt. Am Ausgang des Spannungswandlers wurde eine grüne Leuchtdiode installiert, die den Zustand der Versorgungsspannung visuell anzeigt.

Die Abbildung… zeigt den Stromversorgungsbereich des Mikrocontroller. Stromversorgungseingangspins zum Mikrocontroller werden als VDD (sowie VBAT) bezeichnet, womit die digitale Spannungsschiene gemeint ist. Für jeden VDD-Pins wird ein 100-nF-Entkopplungskondensator parallel geschaltet, der in der Nähe der entsprechenden VDD- und VSS- (oder GND-) Pins platziert wird, um Lastsprünge abzufangen und eine stabile Versorgungsspannung sicherzustellen. Der VBAT-Pin, der zur Versorgung der integrierten Echtzeituhr (RTC) vorgesehen ist, wird nicht dauerhaft mit der Versorgungsspannung verbunden, sondern über einen Jumper geführt. Dadurch bleibt die Möglichkeit erhalten, die RTC-Funktion bei Bedarf flexibel zu- oder abzuschalten, da sie im aktuellen Einsatzfall nicht unmittelbar erforderlich ist. Darüber hinaus verfügt der Mikrocontroller über analoge Peripheriegeräte, wie zum Beispiel einen Analog-Digital-Wandler, der ebenfalls Strom benötigt. Diese Versorgungseingang (VDDA und VREF +) werden ebenfalls über ein 100nF-Entkopplungskondensator mit 3.3 V angeschlossen. Der Mikrocontroller verfügt über interne Regler, die extern mit weiteren Entkopplungskondensatoren umgangen werden müssen. Diese Pins werden als VCAP bezeichnet. Der Wert von 2.2 µF pro Pin wurde aus dem entsprechenden Datenblatt entnommen.

Im Hinblick auf STM32-Mikrocontroller existieren prinzipiell zwei Methoden, um den Programcode auf den Mikrocontroller zu übertragen. Die beide Methode werden in der Platine eingefügt, um

Die erste Möglichkeit erfolgt über den integrierten Bootloader, der bei STM32-Bausteinen das Laden von Firmware über USB-Schnittstelle ohne den Einsatz eines Debuggers ermöglicht. Die Aktivierung des Bootloaders erfordert die Vorverlagerung des BOOT0-Pins auf die Hoch-Stellung, und dies hat vor dem Einschalten des Systems zu erfolgen. Für das anschließende Ausführen des Anwenderprogramms ist der Pin wieder auf Low zu setzen, bevor der Mikrocontroller erneut gestartet wird. Um eine flexible Durchführung dieser Umschaltung im Entwicklungsprozess zu gewährleisten, wurde der BOOT0-Pin über einen Jumper geführt. Infolgedessen kann der Betriebsmodus des Mikrocontrollers zwischen Bootloader-Modus und normalem Applikationsmodus umgeschaltet werden.

Die Geräte verfügen über ein integriertes USB-OTG-Full-Speed-Device/Host/OTG-Peripheriegerät mit einer Geschwindigkeit von 20 MB/s. Das USB-OTG-FS-Peripheriegerät entspricht der USB-2.0-Spezifikation.

Die USB-Stromversorgung (VBUS) wird durch eine Kombination aus zwei Keramikkondensatoren (C3 und C4) und einer Ferritperle (FB1) gefiltert. Die Filterkette dient der Elimination von hochfrequentem Rauschen und Spannungsspitzen aus der USB-Stromleitung, da der VBUS-Pin eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Störungen aufweist. Dadurch ist der Mikrocontroller in der Lage, sowohl das Anschließen als auch das Abziehen von USB-Geräten zuverlässig zu erkennen. Darüber hinaus ist er auch in der Lage, Spannungsschwankungen zu detektieren. Die USB-Datenleitungen D+ und D− werden als sogenanntes differentielles Leitungspaar (Differential Pair) geführt. Zunächst wird eine ESD-Schutzschaltung passiert, die typischerweise als TVS-Diode (Transient Voltage Suppression) ausgeführt ist und zum Schutz vor elektrostatischen Entladungen dient. Im Anschluss durchqueren die Datenleitungen einen Common Mode Choke, dessen Funktion darin besteht, elektromagnetische Störungen (EMI) zu unterdrücken und somit die Signalintegrität zu verbessern. Der Spannungspegel wird durch serielle Widerstände auf etwa 3,3 V begrenzt, was der Eingangsspannung des Mikrocontrollers entspricht. Das Metallgehäuse der USB-Buchse wird über einen 100-nF-Kondensator mit dem Massepotential verbunden, um Störströme zu filtern und eine stabile Referenz zu gewährleisten.

Die zweite Methode erfolgt über ein STLINK-V3SET und JTAG-DebugSchnittstelle der Mikrocontroller, bei dem es sich um eine fünfdrahtschnittstelle handelt. Die Tabelle xx veranschaulicht die verschiedenen Pins und ihre Funktion.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **JTAG pin Name** | **Type** | **Description** |
| JTMS | I | JTAG Test Mode Selection |
| JTCK | I | JTAG Test Clock |
| JTDO | I | JTAG-Test Data Input |
| JTDI | O | JTAG-Test Data Output |
| NJTRST | I | JTAG-Test nReset |

JTAG debug port pins( RM0090 von STMicroelectronics).

Das STLINK-V3SET ist eine eigenständige, modulare Debugging- und Programmier-Sonde, die für die Verwendung mit STM32-Mikrocontrollern konzipiert wurde. Die Unterstützung von SWIM- und JTAG/SWD-Schnittstellen für die Kommunikation mit jedem STM32-Mikrocontroller auf einer Anwendungsplatine.

Ein Bild, das Elektronik, Elektronisches Bauteil, Elektrisches Bauelement, passives Bauelement enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Das JTAG-Protokoll ist ein Debug-/Programmprotokoll, das für STM32-Mikrocontroller verwendet wird. Die

Signale sind 3,3-V-kompatibel und können bis zu 21 MHz leisten. Für einen korrekten Betrieb benötigt der STLINK-V3SET einen JTAG-Rücklauf-Takt. Standardmäßig wird dieser Rücklauf-Takt über den geschlossenen Jumper JP1 auf dem STLINK bereitgestellt, kann aber auch extern bereitgestellt werden. Diese Konfiguration ist erforderlich, um hohe JTAG-Frequenzen zu erreichen; in diesem Fall muss JP1 auf dem STLINK

geöffnet werden. Die Signale werden über einen Stecker an der Platine direkt an den entsprechenden Pins am Mikrocontroller angeschlossen.

Obwohl die Mehrheit der Mikrocontroller über einen internen Oszillator verfügt, der für eine Vielzahl von Designs ausreichend ist, wird im Projekt einen externen Quarz (oder Oszillator) an den Mikrocontroller anzuschließen.

Insbesondere im Hinblick auf STM32-Geräte existieren zwei Arten von Oszillatoren: die sogenannte External High-Speed (HSE) für allgemeine Timing-Zwecke und die External Low-Speed (LSE) für die Echtzeituhr. Bezüglich der Anforderung wurde sich für ein HSE entschieden.

Das oben dargestellte Bild veranschaulicht die bewährte Methode zur Verbindung eines externen Quarzes mit dem Mikrocontroller. Ein externer Quarz-Oszillator generiert ein präzises, periodisches Taktsignal in Form einer Rechteckschwingung mit Frequenz von 24 MHz. Es ist erforderlich, Belastungskondensatoren (CL) (in diesem Beispiel C6 und C7) hinzuzufügen, deren Kapazität von der im Datenblatt des Quarzes angegebenen Lastkapazität abhängt. Nach Ermittlung der Lastkapazität des Quarzes ist zunächst eine Subtraktion von 3 bis 5 pF Streukapazität erforderlich. Daraufhin ist eine Multiplikation mit zwei notwendig, um den erforderlichen Kapazitätswert zu ermitteln.

CL = 10 pF, CS = 5 pF.

Die Aufgabe dieses Widerstands besteht darin, den Ansteuerungspegel des Quarzes zu begrenzen. Zusammen mit CL2 bildet er einen Tiefpassfilter, der den Oszillator zwingt, bei der Grundfrequenz und nicht bei den Obertönen zu starten (verhindert, dass der Oszillator bei den ungeraden Harmonischen der Grundfrequenz schwingt). Wenn die Verlustleistung im ausgewählten Quarz geringer ist als der vom Quarzhersteller angegebene Ansteuerungspegel, wird der Einsatz von RExt nicht empfohlen, und sein Wert beträgt dann 0 Ω.

## 3.2 Softwareimplementierung

### 3.2.1 Design Software

Das Design der Softwarearchitektur des Testsystems lässt sich wie in Abbildung … in zwei Pakete, beziehungsweise Projekte unterteilen. Diese sind Mikro-HMI und MachineController.

# Literatur

[1] S. Lorenz, „Neue Dimensionen von Mensch-Maschine-Interfaces“, 2020.

[2] M. Peissner und H. Cornellia, *Potenziale der Mensch-technik interaktion für die effiziente und vernetzte Produktion von Morgen*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iao.fraunhofer.de/content/dam/iao/images/iao-news/studie\_future\_hmi.pdf

[3] SURYS, „SURYS - Hologram Industries“, https://surys.com. Zugegriffen: 8. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://surys.com/app-identity-passports/

[4] „Issuance Equipment“, IN Groupe. Zugegriffen: 8. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://ingroupe.com/product/issuance-equipment/

[5] H. Jabeen, „HMI Technologies: The Ultimate Guide to Human-Machine Interface Innovations“, Wevolver. Zugegriffen: 13. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wevolver.com/article/human-machine-interface

[6] „STM32 Embedded Display - Capacitive Touch Panel - Optical bonding - 5-inch TFT LCD screen - RVT50HQSNWC00-B“, Riverdi. Zugegriffen: 8. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://riverdi.com/product/5-inch-lcd-display-capacitive-touch-panel-optical-bonding-uxtouch-stm32u5-rvt50hqsnwc00-b

[7] „Panel PC vs HMI: Difference Explained for Industrial Use“. Zugegriffen: 9. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.valanoipc.com/panel-pc-vs-hmi-difference-explained-for-industrial-use/

[8] „EAO\_WP\_HMI-Systems\_EN.pdf“. Zugegriffen: 9. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mouser.com/pdfDocs/EAO\_WP\_HMI-Systems\_EN.pdf

[9] M. V. S. Import, „Wozu dienen HMI-Systeme und welche Varianten gibt es?“, KEM. Zugegriffen: 13. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://kem.industrie.de/steuerungstechnik/wozu-dienen-hmi-systeme-und-welche-varianten-gibt-es/

[10] „Was ist ein TFT-Display und wie setzt man es ein?“ Zugegriffen: 13. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://lcd-mikroelektronik.de/ratgeber/was-ist-ein-tft-display/

[11] C. Salomon, „Vorteile beim Einsatz intelligenter Displaymodule als HMI“. Zugegriffen: 13. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.all-electronics.de/elektronik-entwicklung/vorteile-beim-einsatz-intelligenter-displaymodule-als-hmi/773599

[12] „Maschinennahes Bedienen und Beobachten“. Zugegriffen: 13. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/simatic-hmi/panels.html

[13] „Introduction of new touch panel“, METER MIX. Zugegriffen: 8. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.meter-mix.com/news/new-touch-panel-for-all-metering-and-mixing-machines/

[14] Sunboorugged, „What is the Difference Between HMI and Industrial PC?“, Sunboorugged. Zugegriffen: 13. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sunboorugged.com/hmi-vs-industrial-pc/

[15] „The Five Most Common HMI Hardware Variations“, Maple Systems. Zugegriffen: 13. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://maplesystems.com/hmi-design-guide/common-hmi-hardware-variations/

[16] J. Bowden und C. Rusnock, „Evaluation of Human Machine Interface Design Factors on Situation Awareness and Task Performance“, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 59, S. 1361–1365, Sep. 2015, doi: 10.1177/1541931215591226.

[17] „HMI/SCADA“, Weidmüller. Zugegriffen: 13. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.weidmueller-gti-software.com/de/software/hmi\_scada/index.jsp

[18] „Movicon WebHMI | Emerson DE“. Zugegriffen: 13. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.emerson.com/de-de/automation/control-and-safety-systems/movicon/movicon-webhmi

[19] „HMI Droid“. Zugegriffen: 8. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.idea-teknik.com/hmi\_droid.html

[20] „Was ist ein TFT-Display und wie setzt man es ein?“ Zugegriffen: 1. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://lcd-mikroelektronik.de/ratgeber/was-ist-ein-tft-display/

[21] „Microcontroller“, *Wikipedia*. 14. November 2025. Zugegriffen: 24. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Microcontroller&oldid=1322168609

[22] „Research on the Application and Development Technology of Microcontrollers in Electronic Technology“, *acss*, Bd. 8, Nr. 6, 2024, doi: 10.23977/acss.2024.080611.

[23] „STM32 Microcontrollers (MCUs) - STMicroelectronics“. Zugegriffen: 24. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html

[24] P. Papcun, E. Kajáti, und J. Koziorek, „Human Machine Interface in Concept of Industry 4.0“, in *2018 World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines (DISA)*, Aug. 2018, S. 289–296. doi: 10.1109/DISA.2018.8490603.

[25] „CAN bus“, *Wikipedia*. 23. November 2025. Zugegriffen: 28. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=CAN\_bus&oldid=1323822429

[26] „CAN Bus Grundlagen - ME-Systeme | CAN Bus Grundlagen - ME-Systeme“. Zugegriffen: 30. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.me-systeme.de/de/grundlagen/canbus?utm\_source=chatgpt.com