

1 Einleitung

Die Anzahl und Komplexität elektronischer Geräte steigen weltweit. Treiber dieser Entwicklung sind beispielsweise höhere Automatisierungsgrade und die Digitalisierung. Industrielle Maschinen, Automobile, Smarte Geräte oder Haushaltswaren beinhalten daher immer mehr elektrische Kontaktschnittstellen. Beispiele für elektrische Kontakte zeigt Bild 1.1 unten rechts. Diese meist aus Blech bestehenden elektrischen Kontakte sollen Daten und Signale zuverlässig übertragen und werden deshalb zum Schutz vor Korrosion und zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit mit Edelmetallen beschichtet. Die Relevanz und der Bedarf von Forschungsarbeiten an nachhaltigen, flexiblen sowie wirtschaftlichen Edelmetallbeschichtungstechnologien lässt sich durch Marktprognosen unterstreichen. Im Jahr 2024 umfasste der Weltmarkt für elektrische Steckverbinder 91,8 Mrd. € und wächst Prognosen zufolge bis zum Jahr 2034 auf 194,5 Mrd. € an, siehe Bild 1.1 oben links. In Deutschland setzt sich der Steckverbindermarkt zu großen Teilen aus KFZ- und Industrieelektronik zusammen. Beide Branchen weisen seit 2017 ein großes Marktwachstum auf (Bild 1.1 unten links). Als Beispiel kann ein BMW der 7er Reihe mit ca. 2.950 elektrischen Steckverbindern angeführt werden [KNOB16, S. 349]. Zeitgleich sind genau diese elektrischen Kontakte eine Ursache häufiger Systemausfälle aufgrund von mechanisch-thermischem Verschleiß und Korrosion [MÜCK23]. Daher umfassen die Kontaktanforderungen hohe Betriebsfrequenzen und Strombelastbarkeit, elektromagnetische Verträglichkeit und Übertragungsgeschwindigkeiten $\gg 10$ Gbit/s. Gefordert werden doppelseitige Federkontakte mit minimalen Abmessungen bei größtmöglicher Kontaktdichte, glatte Oberflächen und eine Goldbeschichtung zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit [SING20].

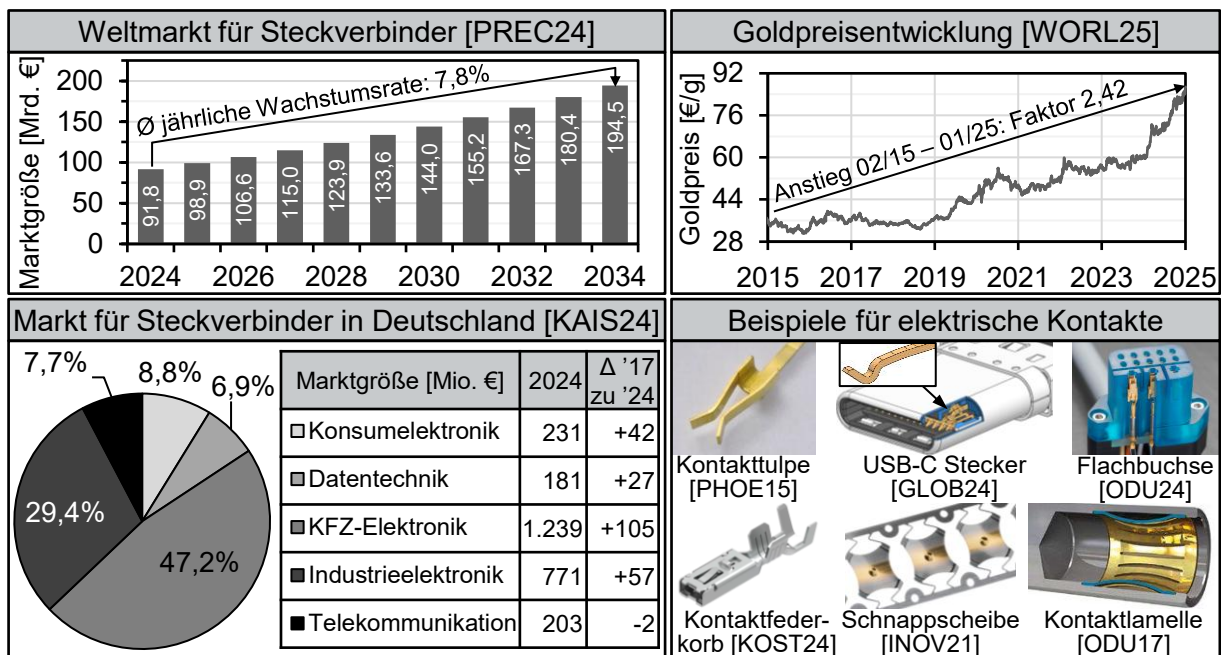


Bild 1.1: Beispielhafte elektrische Kontakte, deren Bedarf und die Goldpreisentwicklung.
Examples of electrical contacts, their market needs and the gold price trend.

Dem Aufwärtstrend stehen gleichzeitig jedoch die steigenden und teils volatilen Rohstoffpreise für Kupfer und Edelmetalle als Hürde gegenüber [VASH23]. Der Goldpreis

ist in den letzten 10 Jahren um den Faktor 2,42 gestiegen, vgl. Bild 1.1 oben rechts [WORL25]. Insbesondere bei Gold als Beschichtungswerkstoff besteht ein zusätzliches Interesse als Kapitalanlage, sodass der Preis nicht ausschließlich an den Bedarf und die Verfügbarkeit gekoppelt ist, sondern vielmehr ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren darstellt. Wesentlicher Preistreiber ist die Goldnachfrage, welche sich an die vier Faktoren der „Inflation und Geldpolitik“, der „geopolitischen Stabilität“, den „Wert des US-Dollars“ sowie der „Marktspekulation“ knüpft [DEUT25b]. Ferner herrscht ein Kostendruck durch Produktdiversifikation (z. B. Differenzierung in low-cost und high-tech) und Produktindividualisierung sowie Konkurrenz aus Niedriglohnländern. Folglich sind Verbesserungspotenziale in der Herstellung und Beschichtung elektrischer Kontakte konsequent zu erschließen.

Hieraus eröffnet sich der Bedarf an innovativen Verfahren zum ressourcen- und energieeffizienten Umgang mit Rohstoffen und Edelmetallen in der Branche für elektrische Komponenten. Als Ansatz wird bereits durch Entwicklungen wie ortsselektive Beschichtungen mit Schichtdicken von $< 1 \mu\text{m}$ oder wenigen Mikrometern versucht, Ressourcen einzusparen. Die Galvanotechnik stellt hier den Stand der Technik dar und wird überwiegend für die dünne, flächige Beschichtung der Kontaktbauteile eingesetzt. Zugleich weist die Galvanotechnik jedoch vier spezifische Nachteile auf:

1. Hoher Energie- & Ressourcenaufwand
2. Eingeschränkte Variabilität & Selektivität
3. Fehlende Systemintegrationsmöglichkeiten in bestehende Prozessketten
4. Abwasser- & Abluftaufbereitung infolge Umweltschutz- & Sicherheitsauflagen

Diese Dissertation beschreibt daher eine komplementäre und nachhaltige Beschichtungstechnologie auf Basis kostengünstiger Mikrogolddrähte. Per Laser-Draht-Mikroauftragschweißen werden in einem prozessintegrierbaren System Goldkontaktpunkte bedarfsgerecht aufgeschweißt. Bei nahezu 100 % Materialausnutzung werden so Edelmetall und Energie im Vergleich zur flächigen, galvanischen Beschichtung eingespart. Die Wirkmechanismen beim Mikroauftragschweißen werden methodisch analysiert und hinsichtlich einer guten schweißmetallurgischen Anbindung an das Substrat optimiert. Damit wird die Durchmischung des Golds mit dem Substrat minimiert und ein geringer Kontaktwiderstand ermöglicht (Kapitel 4). Anlagenseitig wird ein integrierbares, alleinstehendes System entwickelt, welches den Mikrodraht per Achssystem und Drahtkopf zuführt. Die Automation erfolgt über einen Blechvorschub, eine Strahlablenkeinheit sowie über ein System zur aktiven Kompensation von Abweichungen (Kapitel 5). Weiterhin adressiert die Arbeit eine prozesseitige Einstellbarkeit der Beschichtungspunkte. Hierzu werden Prozessfenster für einen wiederholbaren Beschichtungsprozess ermittelt und hinsichtlich der Skalierbarkeit untersucht (Kapitel 6). Die Validierung des Beschichtungsergebnisses erfolgt analog zu industriellen Prüfverfahren und wird anhand von Korrosionseigenschaften und des Kontaktwiderstandes bewertet. Analysen zur Zykluszeit dienen ferner als Grundlage für die Technologieskalierung sowie in Kombination mit dem Einsparpotenzial an Energie und Edelmetall zur Wirtschaftlichkeitsbewertung (Kapitel 7).

Introduction

The number and complexity of electronic devices is increasing worldwide. Higher levels of automation and digitalization are driving this development. Industrial machines, automobiles, smart devices and household goods are therefore incorporating more and more electrical contact interfaces. Bild 1.2, bottom right, shows examples of electrical contacts. These electrical contacts, which are usually made of sheet metal, are designed to transmit data and signals reliably and are therefore coated with precious metal to protect against corrosion and improve electrical conductivity. The relevance and need for research into sustainable, flexible and economical precious metal coating technologies is underlined by market forecasts. In 2024, the global market for electrical connectors amounts to € 91.8 billion and is forecast to grow to € 194.5 billion by 2032, see Bild 1.2 top left [PREC24]. The main drivers of rising demand are digitalization, home and industrial automation, consumer electronics and the automotive industry [VASH23]. In Germany, the connector market is largely made up of automotive and industrial electronics. Both sectors have shown strong market growth since 2017 (see Bild 1.2 bottom left). For example, a BMW 7 Series vehicle has approximately 2,950 electrical connectors [KNOB16, S. 349]. At the same time, these electrical contacts are a cause of frequent system failures due to mechanical-thermal wear and corrosion [MÜCK23]. Therefore the contact requirements include high operating frequencies and current carrying capacity, electromagnetic compatibility and signal transfer rates $\gg 10$ Gbit/s. Ideally, double-sided spring contacts with minimal dimensions and the highest possible contact density, smooth surfaces and a gold coating to improve conductivity are required [SING20].

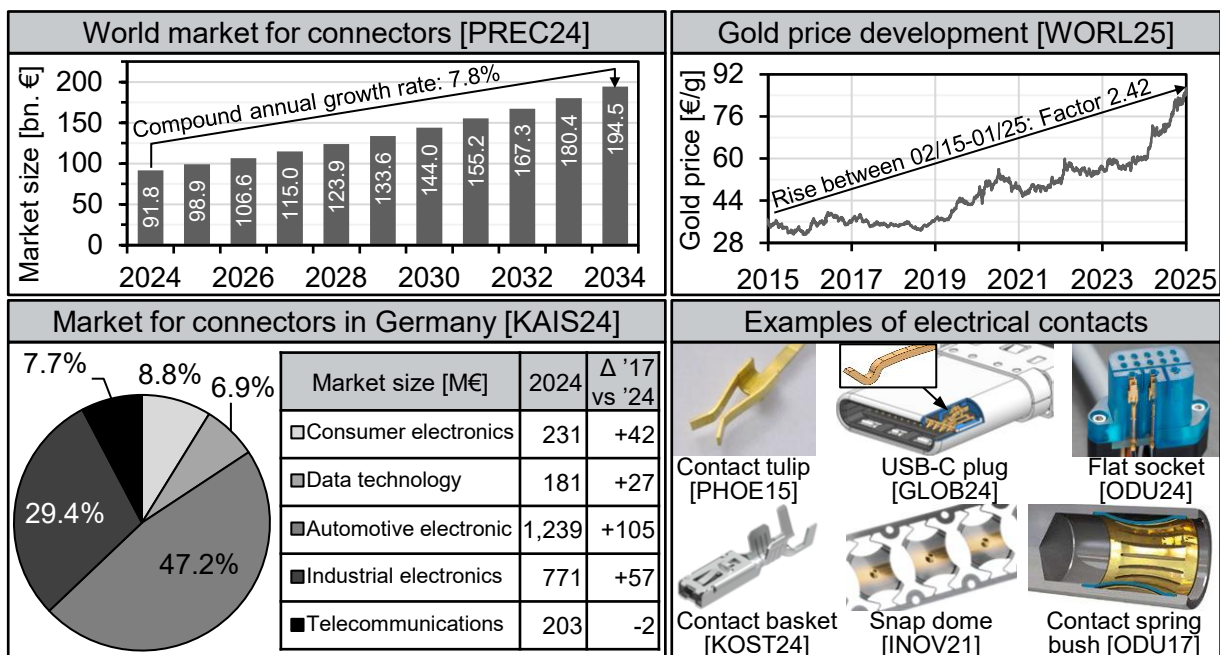


Bild 1.2: Examples of electrical contacts, their market needs and the gold price trend.

At the same time, however, the rising and partly volatile commodity prices for copper and precious metals are an obstacle to the upward trend [VASH23]. The price of gold has risen by the factor of 2.42 in the last 10 years, see Bild 1.2 top right [WORL25].

There is additional interest in gold as a plating material in particular as a capital investment, meaning that the price is not exclusively linked to demand and availability, but rather represents a complex interplay of various factors. The main price driver is the demand for gold, which is linked to the four factors of 'inflation and monetary policy', 'geopolitical stability', the 'US dollar exchange rate' and 'market speculation' [DEUT25b]. Furthermore, there is cost pressure due to product diversification (e.g. differentiation between low-cost and high-tech) and product individualization as well as competition from low-wage countries. Consequently, the potential for improvement must be consistently tapped.

This gives rise to the need for innovative processes for the resource- and energy-efficient use of raw materials and precious metals in the electrical components industry. Developments such as selective coatings with layer thicknesses of $< 1 \mu\text{m}$ or a few micrometers are already being used as an approach to save resources. Electroplating technology represents the state of the art here and is mainly used for the thin, flat surface coating of contact components. At the same time, however, electroplating has four specific disadvantages:

1. High energy & resource consumption
2. Limited variability & selectivity
3. Waste water and exhaust air treatment due to environmental protection and safety requirements
4. Lack of system integration options into existing process chains

This dissertation therefore describes a complementary sustainable coating technology based on cost-effective micro gold wires. Small gold contact dots are welded on as required using laser-based micro wire deposition in a process-integrated system. With almost 100 % material utilization, this saves precious metal and energy compared to flat electroplating. For this purpose, the mechanisms of action in micro wire deposition are methodically analyzed and optimized with regard to a good welding metallurgical bond to the substrate. This prevents the gold from mixing with the substrate and enables a low contact resistance (Chapter 4). On the system side, an integrable, stand-alone system is being developed which feeds the micro wire by an axis system and wire head. Automation takes place via a sheet metal feed, a beam deflection unit and a system for active compensation of deviations (Chapter 5). The thesis also aims to achieve process-side adjustability of the coating dots. For this purpose, process windows are determined for a repeatable coating process and examined with regard to scalability (Chapter 6). The validation of the coating result is carried out analogously to industrial test methods and is evaluated based on corrosion properties and contact resistance. Cycle time analyses are also used as a basis for technology scaling and, in combination with the potential savings in energy and precious metals, for assessing economic efficiency (Chapter 7).