

# 1

## Motivation

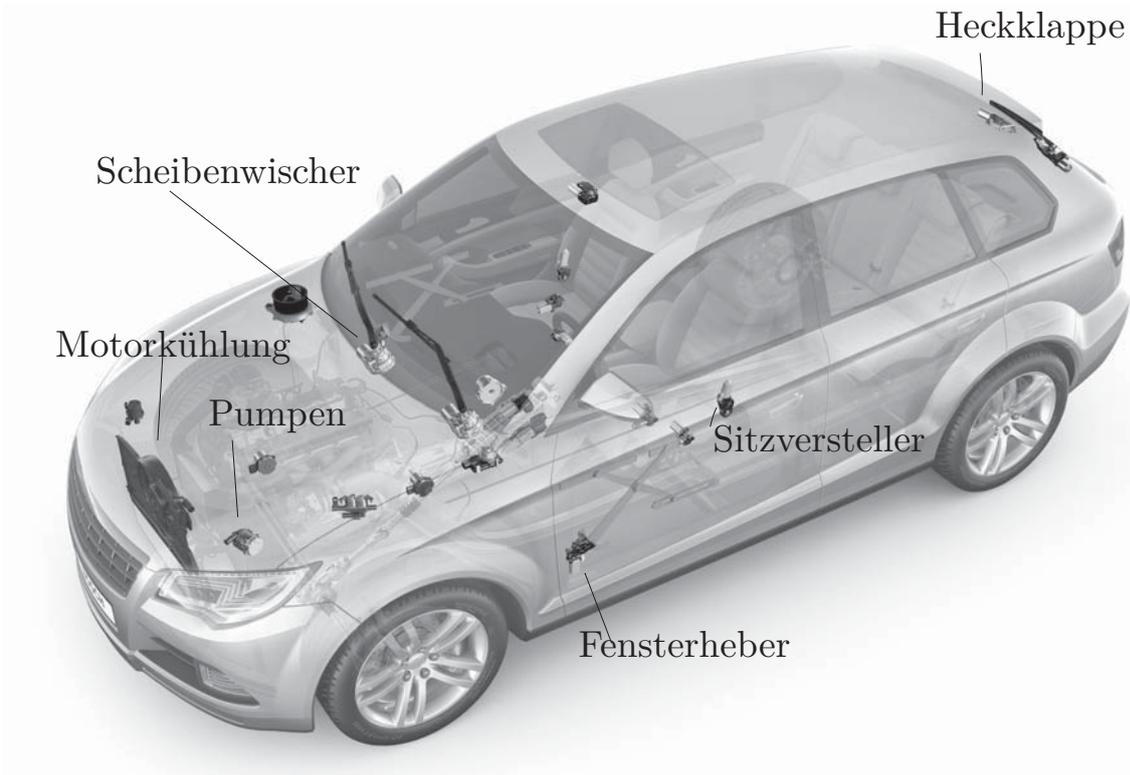
---

Elektromotoren finden seit mehreren Jahrzehnten in den verschiedensten Bereichen Anwendung, von der Medizintechnik bis zu Gartengeräten. Eines der Haupteinsatzgebiete ist jedoch nach wie vor die Automobilindustrie, wo sie beispielsweise als Stellsysteme für Sitze, Fenster oder Heckklappen oder als Antrieb für Wischersysteme eingesetzt werden. Abbildung 1.1 gibt einen Überblick über die Einsatzbereiche der unterschiedlichen Motortypen im Kraftfahrzeug (Kfz). Auf dem europäischen Markt finden sich heutzutage im Durchschnitt 53 Elektromotoren pro Fahrzeug, im Premiumsegment können es bis zu 115 Stück sein [Rob16]. Dies zeigt die Bedeutung von Elektromotoren, speziell der Elektrokleinmotoren.

Im Zuge der Elektrifizierung ist mit einer weiteren starken Zunahme an Elektrokleinmotoren in den nächsten Jahren zu rechnen, da auch zusätzliche Sicherheitsfunktionen wie etwa Bremsassistenten und Lenkunterstützung zunehmend an Bedeutung gewinnen. Auch die steigende Nachfrage nach Komfortlösungen sowie eine strengere Gesetzgebung im Bereich der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs wirken sich positiv auf die Bedeutung von Elektromotoren aus [Sch03].

Als sogenannte Hilfsmotoren kommen im Kfz meist Gleichstrom- bzw. direct current (DC)-Motoren zum Einsatz. Hierbei sorgen die mit der Drahtwicklung elektrisch leitend verbundenen Lamellen eines auf eine Welle aufgedruckten Kommutators für die notwendige Kommutierung.

Gründe für die Dominanz der DC-Motoren sind vorwiegend die geringen Herstellkosten durch den vergleichsweise einfachen Aufbau. Weitere Vorteile der mechanisch kommutierten DC-Motoren gegenüber Motoren mit elektrischer Kommutierung, den electrically commutated (EC)-Motoren,



**Abbildung 1.1:** Elektrokleinmotoren kommen im gesamten Kraftfahrzeug zum Einsatz. Bild: Robert Bosch GmbH, Electrical Drives

sind zudem die Qualität sowie die Produkteinführungszeit [Sch03]. Dies ist hauptsächlich in der langjährigen Erfahrung begründet und die Lücke zwischen beiden Motortypen wird sich in den nächsten Jahren kontinuierlich schließen.

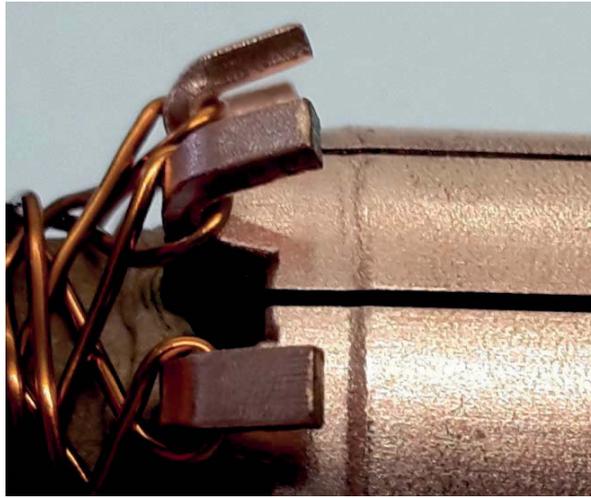
Der Markt stellt unterschiedliche Anforderungen an die Motoren, wie Effizienz, Gewicht, Bauraum und Preis. Wichtiges Merkmal in der Auslegung der Motoren ist zum Beispiel die Umgebungstemperatur des Motors oder auch der Einbauort, an dem sich der Motor befindet. So befindet sich der Großteil der Elektromotoren im Einsatz im Medium Luft bei unterschiedlicher Temperatur. Jedoch sind beispielsweise Pumpen direkt im Kraftstoff tätig, sogenannte Nassläufer. Sämtlichen unterschiedlichen Anforderungen wird man durch Variation einzelner Komponenten gerecht. Die Dicke des Blechpaketes ist ebenso entscheidend wie die Anzahl der Haken des Kommutators, die Kommutatorgröße, der Drahtdurchmesser oder das Wickelschema. Ein Motor für das Motorkühlgebläse muss beispielsweise leistungsstark sein. Geringe Größe des Motors und steigende Effizienz bzw. Leistungsfähigkeit des Motors stehen grundsätzlich im Gegensatz zueinander. Diese Herausforderung erfordert ein detailliertes Verständnis

aller Prozessschritte und eingesetzten Verfahren um die konstruktive Aufgabe der Entwicklung zu unterstützen. Sind sowohl der Ablauf als auch die Wirkzusammenhänge der Prozesse in ihrer Vollständigkeit verstanden, lassen sich die steigenden Anforderungen bewältigen. Produkte können optimiert ausgelegt und überwacht und mögliche Problematiken in den Anforderungen frühzeitig erkannt werden. Probleme zu kennen und erkennen bevor sie auftreten, ist der große Nutzen eines tiefgehenden Prozessverständnisses. Dies resultiert zuerst in einer Einsparung an Entwicklungszeit einer optimierten Auslegung der Motorkonstruktion und im späteren Fertigungsumfeld in einer Ausschussminderung und folglich in einer Reduzierung der gesamten Herstellkosten.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der seriennahen Grundlagenuntersuchung eines Prozessschrittes der Elektrokleinmotorenfertigung. Die Kommutatoren werden mit Hilfe einer Variante des Widerstandsschweißens, dem so genannten Hot-Staking oder Warmverpressen, kontaktiert. Der Kommutator besteht aus mehreren einzelnen Lamellen, an deren Ende sich eine Hakengeometrie anschließt, in welche die Drahtwicklung eingehängt ist, Abbildung 1.2. Der Hot-Staking-Prozess dient der Herstellung eines elektrischen und mechanischen Kontaktes zwischen der Drahtwicklung und den Kommutatorlamellen und ist der kritischste Prozess in der Kleinmotorenfertigung, bedingt durch die mechanischen, elektrischen und thermischen Einflüsse des Prozessablaufs [Yea01]. Jedoch ist das Hot-Staking zugleich ein Prozess, welcher in der bisherigen Forschung noch unzureichend Beachtung gefunden hat und es am Verständnis grundlegender Zusammenhänge fehlt.

Ziel der Arbeit ist ein erweitertes Prozessverständnis zu erlangen, basierend auf dem Ansatz einer sequentiellen Prozessphasenanalyse. Kern dieser Analyse ist die zeitsynchrone Aufzeichnung aller elektrisch zugänglichen Prozessparameter mit hoher zeitlicher Auflösung. Nur so ist es möglich, die Physik sowie die Metallurgie des Prozesses nachzubilden und neue Informationen über den Prozess zu erhalten.

Zu Beginn dieser Arbeit wird nach dieser Motivation auf den aktuellen Stand der Technik auf den Gebieten der Elektromotoren sowie des Widerstandsschweißens eingegangen, Kapitel 2. Hierbei wird neben den Grundlagen der Elektromotoren auch das allgemeine Verfahren des Widerstandsschweißens erläutert, da das Hot-Staking-Verfahren dem Widerstandsschweißens zugeordnet ist. Abschließend werden in diesem Kapitel gängige Methoden der Prozessüberwachung und Prozesskontrolle beim Widerstandsschweißen vorgestellt. Einige Möglichkeiten hierbei erweisen sich als hilfreich für das Hot-Staking.



**Abbildung 1.2:** Der lackisolierte Wicklungsdraht ist in die Haken des Kommutators eingehängt und wird durch das Hot-Staking-Verfahren elektrisch und mechanisch mit dem Kommutator verbunden.

In Kapitel 3 wird das untersuchte Hot-Staking-Verfahren im Detail vorgestellt. Der bisher bekannte Prozessablauf, vorhergehende Untersuchungen sowie die eingesetzten Materialien und Werkstoffe stehen dabei im Vordergrund. Das Kapitel schließt mit einer Übersicht über das auftretende Widerstandsnetzwerk, dessen Bedeutung in den Untersuchungen deutlich wird.

Kapitel 4 zeigt im Anschluss an die Grundlagenkapitel die Ziele und die grundlegende Vorgehensweise auf. Wesentliches Ziel ist hierbei die Prozessregelung und Prozessüberwachung. Hierzu ist ein grundlegendes Verständnis des Prozesses notwendig, das es aufzubauen gilt.

Bevor auf die Messungen eingegangen wird, behandelt Kapitel 5 den verwendeten Messaufbau inklusive der Sensorik zur Messung relevanter Prozesskenngrößen. Weiterhin wird das Programm zur Messdatenerfassung erläutert.

Hieran schließt sich Kapitel 6, in dem die einzelnen Phasen innerhalb des Prozessablaufs vorgestellt werden. Die Kenntnis dieser Phasen hat große Bedeutung für die Deutung späterer Ergebnisse.

Kapitel 7 bildet den eigentlichen Kern dieser Arbeit, denn hier werden die getätigten Untersuchungen aufgezeigt und deren Bedeutung für ein grundlegendes Prozessverständnis erläutert. Besondere Geltung erlangt hierbei die Untersuchung zum Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Hakenfestigkeit sowie die Messung der Prozesstemperatur zeitsynchron zur Messung der übrigen relevanten Prozesskenngrößen.

In diesem Kapitel werden zudem metallografische Untersuchungen sowie die Art des Verbindungsmechanismus aufgezeigt, verdeutlicht durch Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen von Hakenunterseiten bei unterschiedlichen Stromflussdauern.

In Kapitel 8 werden die essentiellen Untersuchungsergebnisse zusammengefasst und es wird ein Ausblick über aufbauende Untersuchungsreihen gegeben.