

13 Das E-Bike und sein Antrieb

In einem E-Bike steckt jede Menge Mathematik aus vielen Teilbereichen.

Dr. Markus Hinterkausen, Dr. Uwe Vollmer und Dr. Uwe Iben vom Zentralbereich Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH fassen Ihre Erfahrungen zur E-Bike Entwicklung zusammen:

„Leistungsstark, leise summend und innovativ im Design – eBikes sind echte Trendprodukte des 21. Jahrhunderts. Jedoch es gibt sie schon viel länger als wir glauben wollen. Ein erstes Patent für ein Elektrofahrrad wurde bereits im Jahr 1895 angemeldet. Die E-Mobilität wurde schon um 1835 als die Zukunfts-Mobilität in den Städten angesehen. Glatte Straßen und kurze Wege waren die Argumente. Schon 1900 wurden weitere Elektrofahrräder zum Patent angemeldet, gebaut und vertrieben. Zeitgleich zu Fahrrädern mit Dampfmaschinen, die sich jedoch wegen des hohen Gewichtes nicht durchsetzen. Aber auch das E-Fahrrad blieb eine Randerscheinung bis 2010. Das hohe Gewicht der Batterien, die geringe Reichweite und der ruckartige Antrieb waren die Gründe. Doch mit der Lithium-Ionen-Batterie und neuen kleinen Sensoren begann ein neues Zeitalter der E-Mobilität. 2009 stieg Bosch eBike Systems als Start-up innerhalb des Bosch Konzerns in die E-Mobilität ein. Mit dem ersten eBike-Antriebssystem, das 2011 auf den Markt kam und entspanntes Cruisen in der Stadt genauso möglich macht wie sportliches Biken in der Natur, begann die Erfolgsstory. Ein großer Meilenstein war die Markteinführung des ABS für E-Bikes im Jahre 2017.“

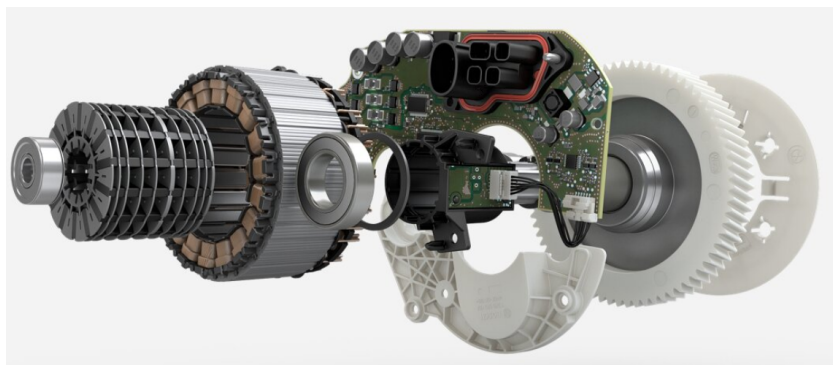


Abbildung 11: Elektromotor, Sensorik und Getriebe (Quelle: Bosch eBike Systems).

„Eine Erfolgsstory hat viele Gründe. Einer davon ist die zielgerichtete Entwicklung der Komponenten Elektromotor, Getriebe und die Sensorik. Sie bilden das Herzstück des Antriebs, siehe Abb. 11. Ein weiterer Grund ist die Bedienerfreundlichkeit des Systems. Hier wurde z.B. ein spezieller Bordcomputer entwickelt, der mit dem Smartphone verbunden werden kann.“

„Bei der Entwicklung des e-Bike-Antriebes und seiner Komponenten werden eine Vielzahl mathematischer Methoden angewandt. Analytische Methoden werden zur Erstauslegung des Antriebes und der E-Maschine genutzt. Mit diesen Ansätzen erhält man sehr schnell verschiedene Designs mit ihren Eigenschaften. Mathematische Verfahren, die hier genutzt werden, sind Vektor- und Matrizenrechnung aus der linearen Algebra und zumindest an einer Stelle die konforme Abbildung. Hierbei handelt es sich um winkeltreue Abbildungen, die u.a. in der Physik, Elektrotechnik oder Strömungsmechanik genutzt werden. Hier fließen erste Kundenanforderungen ein, wie z.B. Drehmomentenverlauf etc. Methoden der Stochastik helfen bei der Toleranzanalyse von Bauteilen, um Fertigungsverfahren und deren Toleranzen gleich zu Beginn in die Auslegung des Antriebsstrangs mit einzubeziehen.“

„In einem weiteren Schritt werden Finite Elemente Methoden (FEM) und Boundary Elemente Methoden (BEM) angewandt, um die Antriebsauslegung zu verfeinern und zu analysieren. Hier werden die entstehenden komplexen Gleichungssysteme numerisch gelöst. Dabei kommt üblicherweise der Ansatz der gewichteten Residuen mit Galerkin Testfunktionen zum Einsatz. Der Magnetkreis wird in einem ersten Schritt mit diesen numerischen Methoden modelliert und simuliert, um das Betriebsverhalten in verschiedenen Arbeitspunkten zu betrachten. Aus diesen Berechnungen werden Verhaltensmodelle im Zeitbereich oder im Frequenzbereich abgeleitet. Dazu dienen die Laplace- und Fourier-Transformationen. Modelle im Frequenzbereich sind vor allem für die Bewertung des akustischen Verhaltens hilfreich, denn eine wichtige Kundenanforderung ist ein niedriges angenehmes Geräusch.“

„Die Verhaltensmodelle im Zeitbereich werden z.B. zur Auslegung der Regelung des Antriebes genutzt und um Fahrzyklen zu simulieren. Im Zeitbereich können nichtlineare Effekte z.B. beim Materialverhalten berücksichtigt werden. Gradientenbasierte Methoden zur Topologie-Optimierung werden im Verlauf der Antriebsauslegung genutzt, um z.B. thermische, mechanische, elektrodynamische oder akustische Eigenschaften zu verbessern. Sie erfordern in der Regel den Einsatz von leistungsstarken Rechnern. Multizieloptimierung durch Suchen nach Pareto-optimalen Auslegungen in mehreren physikalischen Domänen wie strukturelle Festigkeit, Elektrodynamik, aber auch Herstell- und Materialkosten dienen der Findung der besten Auslegungen für den Antrieb. Die Regelungen werden im Frequenzbereich mit Hilfe der System-Beschreibung durch Laplace-Transformationen und im Zeitbereich durch Differentialgleichungen entworfen.“

„Hierzu dienen Hilfsmittel wie z.B. das Bode-Diagramm oder die Wurzelortskurve zur Bewertung der Güte und Stabilität des Regelkreises. Die Methode der Transferpfadanalyse beschreibt den Weg des Körperschalls von der Quelle bis zum Gehäuse, von dem es als Luftschall an unser Ohr dringt. Moderne Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) wie z.B. Deep Learning unterstützen die Bewertung des Schalls hinsichtlich psychoakustischer Wahrnehmung.“

„Alle diese mathematischen Methoden finden Anwendung bei der Auslegung des elektrischen Antriebes für das E-Bike. Schrittweise werden die Methoden und Verfahren verbessert und erweitert. Im Fokus stehen neben Genauigkeit, die Vorhersagbarkeit

und die Rechengeschwindigkeit der Algorithmen. Dabei versucht man, die Erkenntnisse von früheren Designs in neue mit einzubringen. Stück für Stück werden die Methoden und Algorithmen zu einem digitalen Zwilling zusammengefasst, der in Zukunft den Antriebsstrang komplett digital abbilden wird, was dem Ingenieur völlig neue Möglichkeiten zur Bewertung von Funktionen und Kosten eröffnet. “