

Gigantisch effizient

Entwicklung eines diesel-elektrischen
Antriebs für Tagebau-Muldenkipper



Mit dem Muldenkipper SET230 des chinesischen SANY-Konzerns lassen sich in einer Fuhre bis zu 230 Tonnen Nutzlast bewegen. Sein diesel-elektrischer Antrieb und ein dSPACE HIL-Simulator sorgen dabei für größtmögliche Effizienz: der eine im Schwerlasteinsatz, der andere in der Entwicklung und Validierung der aufwendigen Antriebsregelung.



Haben Sie schon mal ein mehrstöckiges Wohnhaus eine über 20-prozentige Steigung hinauffahren sehen? Wenn nicht, sollten sie unbedingt einmal eine große Tagebaumine besuchen. Die hier eingesetzten Muldenkipper erreichen heute gut und gerne die Ausmaße eines kleinen Wohnblocks und ein Gesamtgewicht von mehreren hundert Tonnen. Trotz solcher enormen Massen bewegen sich diese Giganten aber auch in unwegsamem und steilem Gelände stets sicher und mittlerweile auch sehr effizient. Dafür sorgt nicht zuletzt der diesel-elektrische Antrieb, der sich für Muldenkipper dieser Größenordnung fest am Markt etabliert hat. Ein Dieselmotor treibt hier einen Generator an, der über elektronische Wechselrichter zwei Drehstrommotoren an der Hinterachse mit Strom für den Vortrieb versorgt. Durch diese Bauweise ohne starren Durchtrieb vom Dieselmotor zur Antriebsachse kann sowohl auf ein Schaltgetriebe als auch auf mechanische Kupplungen, Differenziale oder Antriebswellen komplett verzichtet werden, womit sich Gewicht und Wartungsaufwand der Fahrzeuge stark reduzieren. Um die hohe Effizienz und Fahrsicherheit auch während des harten Arbeitseinsatzes in der Mine sicherzustellen, erfordert dieses Antriebskonzept allerdings hochkomplexe Re-

gelungsstrategien für die elektrischen Komponenten.

Modellbasiert in neue Dimensionen

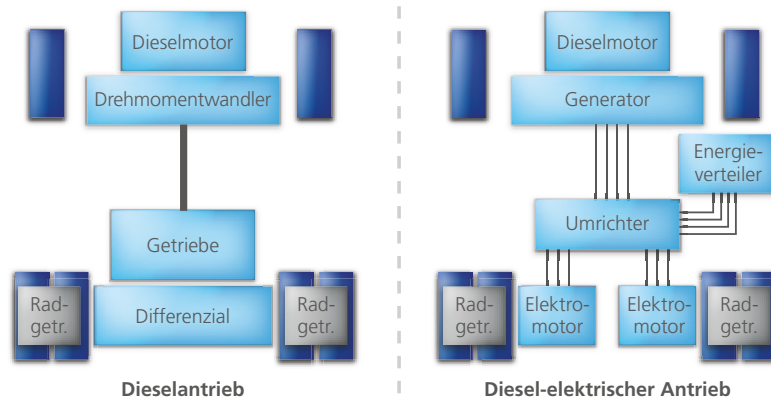
Vor dieser Herausforderung standen auch die Ingenieure des chinesischen SANY-Konzerns, als sie mit der Entwicklung des Muldenkippers SET230 (technische Daten siehe Tabelle) gleich in doppelter Hinsicht Neuland betreten. Zum einen bedeutete seine gigantische Nutzlast von 230 Tonnen für das Unternehmen einen Vorstoß in eine ganz neue Dimension. Zum anderen besaßen die Ingenieure nur rudimentäre Erfahrungen mit der diesel-elektrischen Antriebstechnik. Aus diesem Grund setzte sich SANY zum Ziel, große Anteile der Regelungsentwicklung frühzeitig per Simulation zu erproben und abzusichern.

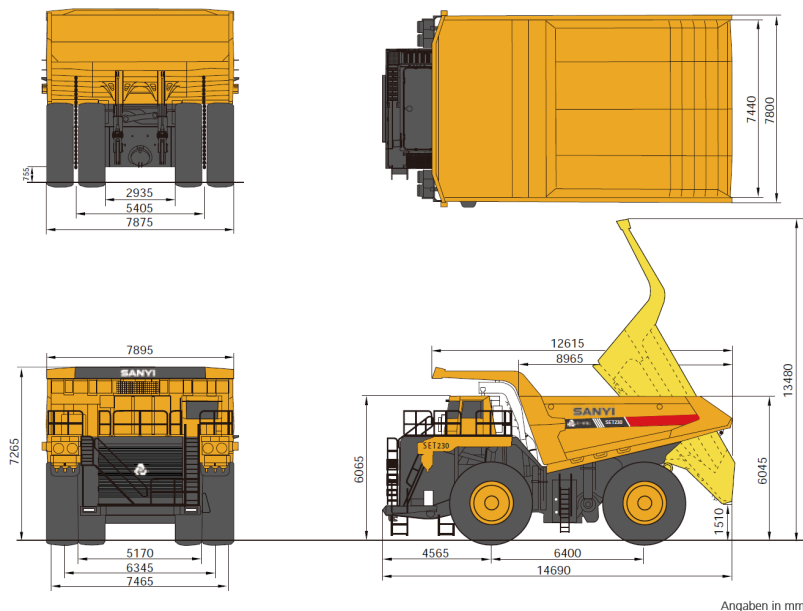
Schlüsselfertig zum „virtuellen“ Fahrzeug

Statt die realen Elektrokomponenten in einem großen Labor zu testen, entschied sich das Unternehmen dafür, das komplette Antriebssystem des SET230 mit Hilfe eines schlüsselfertigen Full-Size-HIL-Simulators von dSPACE zu simulieren. Auf diese Weise lassen sich neu entwickelte und auf dem Steuergerät implementierte Regelungen sofort im Zusammenspiel mit einem „virtuellen“ Gesamtfahrzeug testen und validieren.

>>

Im Vergleich zu herkömmlichen dieselgetriebenen Muldenkippern (linke Grafik) kommen diesel-elektrische Muldenkipper wie der SET230 ohne einen starren Durchtrieb vom Dieselmotor zur Antriebsachse aus (rechte Grafik). Das spart Gewicht und reduziert den Wartungsaufwand.





| | |
|---------------------------------|---------|
| Maximale Steigung | 24 % |
| Kontinuierliche Steigung | 12,5 % |
| Maximales Gefälle | -14 % |
| Kontinuierliches Gefälle | -13 % |
| Höchstgeschwindigkeit | 64 km/h |
| Gewicht des Elektroantriebs | 45 t |
| Maximale Nutzlast | 230 t |
| Maximal erlaubtes Gesamtgewicht | 400 t |

Technische Daten des SANY SET230: Für ein bis zu 400 t schweres Fahrzeug liefert der diesel-elektrisch betriebene Muldenkipper beeindruckende Fahrleistungen ab, auch in schwierigem Gelände.

Das ermöglicht es den Ingenieuren, ihre Regelungsstrategien bereits auf dem Prüfstand zu optimieren. Damit reduzieren sich teure Streckentests mit dem realen Fahrzeugprototyp, ohne dass Abstriche bei der Sicherheit gemacht werden müssen.

Leistungsstarker und flexibler Simulator

Im HIL-Simulator von SANY kommt ein DS1006 Processor Board zum Einsatz, das dank der hohen Rechenleistung seines Vierkern-Prozessors selbst

komplexeste Simulationsmodelle noch in Echtzeit berechnen kann. Zudem bietet der Prozessor die Möglichkeit, unterschiedliche Berechnungsaufgaben während der verschiedenen Funktionstests auf seine einzelnen Kerne zu verteilen. Für die Signalvorverarbeitung und eine prozessorbasierte Elektromotor-Simulation auf Signalebene setzt SANY auf die dSPACE Electric Motor HIL (EMH) Solution auf Basis von zwei DS5202 FPGA Base Boards. Zum einen misst diese Solution die schnellen, elektromotorspezifischen

Signale der Steuergeräte, beispielsweise die pulsweitenmodulierten Steuersignale der Leistungselektronik. Zum anderen generiert sie die Drehgebersignale für die Regelung der Elektromotoren. Die Signalkonditionierung wurde von dSPACE exakt an die spezifischen Anforderungen von SANY angepasst, sodass Sensoren mit einem Stromausgang von bis zu ± 600 mA Feedback-Signal simuliert werden können. Für die Tests der CAN-Bus-Kommunikation mit den übrigen Fahrzeugsystemen kommen bei SANY zwei DS2202 HIL I/O Boards zum Einsatz, die den Ingenieuren in Kombination mit dem RTI CAN MultiMessage Blockset auch eine komfortable Restbussimulation erlauben.

Modellierung bis ins Detail

Neben leistungsstarker und flexibel einsetzbarer Hardware für die Simulation standen für SANY aber auch die möglichst exakte Modellierung ihres Muldenkippers und die bestmögliche Nachbildung seines ungewöhnlich rauen Arbeitsumfeldes im Fokus. Da in beiden Aspekten auch eine Offline-Simulation mit MATLAB®/ Simulink® möglich sein sollte, entschied SANY sich für eine umfangreiche Palette an dSPACE Automotive Simulation Models (ASM), da diese alle technischen Teilgebiete des Muldenkippers und die Rahmenbedingungen seines Einsatzgebiets entweder bereits nahtlos abdeckten oder ohne großen Aufwand daran angepasst werden konnten. Für die Simulation des diesel-elektrischen Systems kommt zum einen ASM Engine Basic zum Einsatz, das bereits alle notwendigen Parameter für den Dieselmotor abbildet. Für die vielfältigen elektrischen Bestandteile des Antriebs konnte SANY neben einigen maßgeschneiderten Modellen größtenteils auf die Bibliothek der ASM Electric Components (ASM EC) zurückgreifen, von deren Bestandteilen einige individuell an den speziellen Einsatzzweck angepasst wurden. Dazu zählten unter anderem der fremder-

„Aufgrund der guten Erfahrungen mit dem HIL-Simulator und der ASM Tool Suite werden wir zukünftig weitere dSPACE Produkte in unsere Werkzeugkette integrieren.“

Lu Liling, Projektingenieurin, SANY Group

regte Synchronmotor des Generators (ASM EC, angepasst), die Wechselrichter (ASM EC), die Gleichrichter, der Zwischenkreis (ASM EC), die Bremswiderstände und die beiden Asynchron-Käfigläufer-Fahrmotoren (ASM EC). Die Simulationsmodelle zur Fahrdynamik konnten nahezu komplett über die Bibliothek ASM Vehicle Dynamics parametrisiert werden, die von Untersetzungsgetrieben über Reifen, Lenkung, Bremsen und Aufhängungen alle längs- und querdynamischen Einflussfaktoren abbildet. Lediglich die Einflüsse verschiedener Beladungszustände des Muldenkippers, von Leerfahrten bis hin zur Ausschöpfung der vollen 230 Tonnen Nutzlast, wurden zusätzlich in die Modellierung/Parametrierung integriert. Die in ASM Vehicle Dynamics bereits enthaltenen Umgebungsmodelle er-

laubten darüber hinaus eine akkurate Nachbildung der anspruchsvollen Geländeprofile, in denen der Muldenkipper unterwegs ist. Von kurzen Aufwärtspassagen über starke Steigungen bis hin zu einem Dauerbetrieb auf längeren Gefällstrecken konnten so die verschiedensten Anforderungen an den Betrieb des SET230 evaluiert werden.

Intuitive Parametrierung, anschauliche Visualisierung

Zur intuitiven Anpassung der Modellparametrierung und zur Verwaltung seiner umfangreichen Parametersätze inklusive der maßgeschneiderten Komponenten nutzt SANY die grafische Benutzeroberfläche von dSPACE ModelDesk. Darüber hinaus ist die Visualisierungssoftware dSPACE MotionDesk im Einsatz. Damit lassen sich die Ergeb-

nisse sämtlicher simulierten Fahrmanöver und Szenarien in einer anschaulichen 3D-Online-Animation darstellen, bei der die Auswirkungen von Parameteränderungen in Echtzeit sichtbar werden. Die gesamte Bedienung sowie die Aufzeichnung aller Testdaten nehmen die Ingenieure von SANY über dSPACE ControlDesk vor.

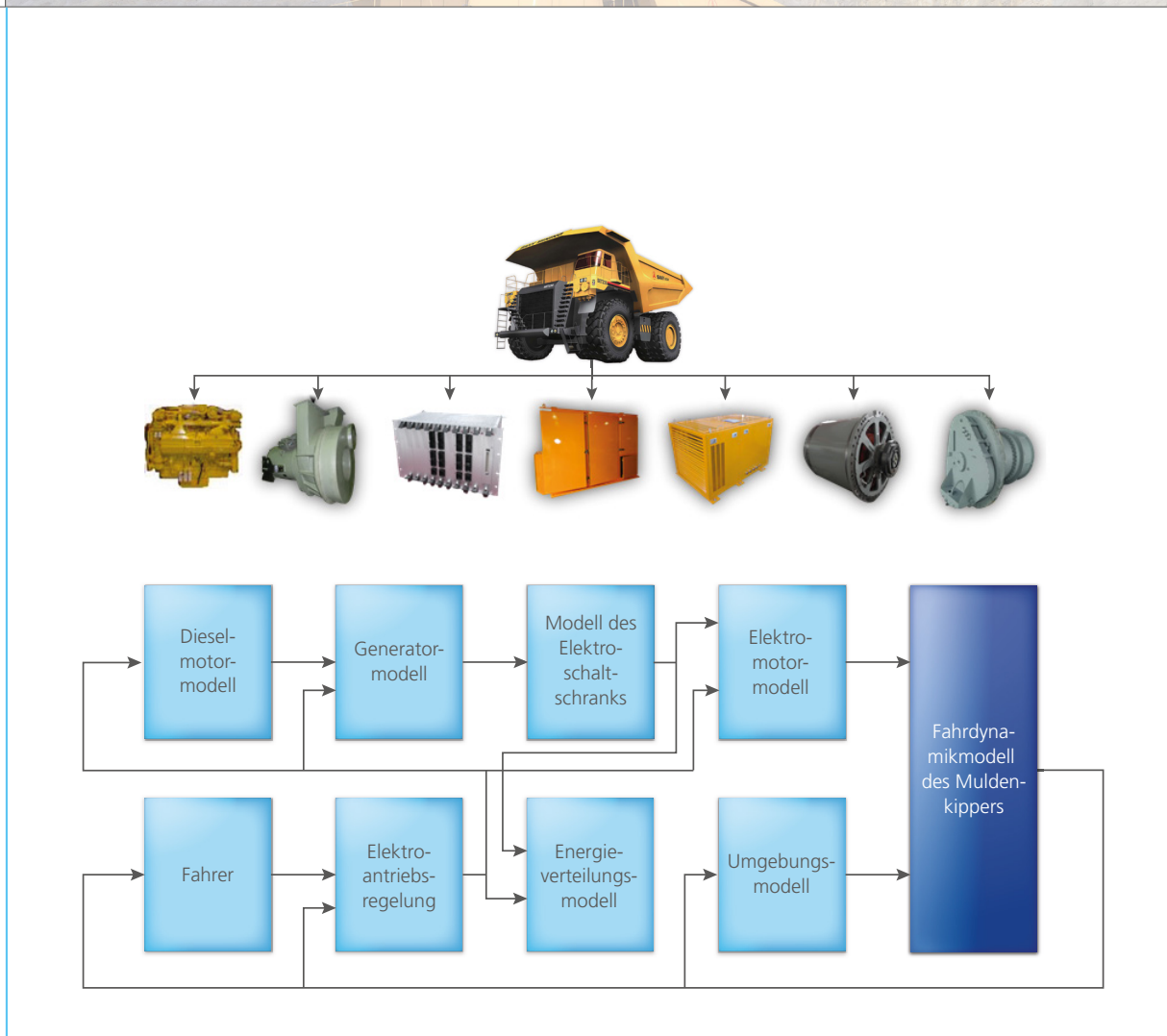
Binnen kürzester Zeit betriebsbereit

Der HIL-Simulator für den SET230 mit samt aller seiner Hard- und Software-Komponenten wurde von dSPACE Engineering-Teams entwickelt und gemeinsam mit SANY angepasst, implementiert, parametrisiert, getestet und schlüsselfertig am Standort Shanghai in Betrieb genommen. Vom Eingang der Bestellung bis zur Inbetriebnahme vergingen lediglich acht Monate, sodass

>>

„Virtuelles“ Gesamtfahrzeug: Der schlüsselfertige Full-Size-HIL-Simulator von dSPACE bildet sämtliche Sensorik- (rechts) und Aktuatorik-komponenten (links) des SET230 nach. So können die SANY-Ingenieure die grundlegenden Regelungsstrategien frühzeitig im Zusammenspiel mit den anderen Fahrzeugsystemen erproben, und das ohne teure Testfahrten mit dem realen Muldenkipper.





Breites Spektrum an Modellparametern: Vom Dieselmotor und den Komponenten der elektrischen Antriebe über den Fahrer bis hin zur Umgebung fließen zahlreiche Faktoren in das Fahrdynamikmodell des Muldenkippers ein.

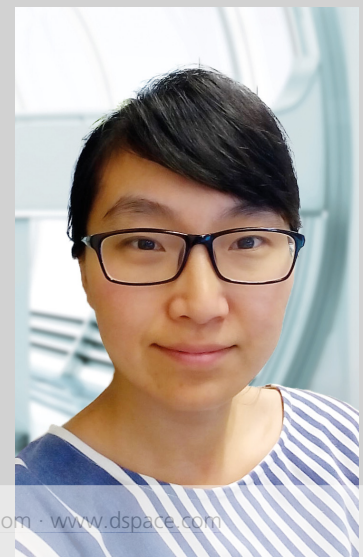
SANY die Entwicklung der E-Motor-Steuerung für den SET230 planmäßig starten konnte. Durch den modellbasierten Ansatz und die ebenso effizienten wie flexibel einsetzbaren dSPACE Werkzeuge gelang es den Ingenieuren, alle geplanten Entwicklungsschritte termingerecht umzusetzen, die grundlegenden Regelungsstrategien zu testen und noch vor Ort am Standort Shanghai erfolgreich zu validieren. Am Ende des Prozesses stand eine E-Motor-Regelung mit größtmöglicher Effizienz und Zuverlässigkeit. Die Entwicklungszeiten im Labor, die Kalibrierzeiten im Fahrzeug und damit auch die Kosten reduzierten sich durch den Einsatz der dSPACE Werkzeuge deutlich. Ergänzend dazu konnte SANY seinen Erfahrungsschatz im Bereich elektrifizierter Antriebsstränge enorm ausbauen. Die

gewonnenen Erkenntnisse wurden für den sukzessiven Aufbau eines hochmotivierten neuen Entwicklerteams genutzt. Nach den Erfolgen mit dem HIL-Simulator und den ASM-Modellen plant SANY, zukünftig weitere dSPACE Produkte in seine Werkzeugkette zu integrieren, unter anderem die Testautomatisierungssoftware AutomationDesk, den Seriene-Generator TargetLink® und das Datenmanagement-Werkzeug SYNECT®. Im mit dem SET230 erstmals betretenen Marktsegment der schweren diesel-elektrisch betriebenen Muldenkipper will SANY zudem mit noch größeren Modellen seine Position weiter ausbauen. Gut möglich also, dass die „fahrenden Wohnblöcke“ zukünftig noch um ein paar Stockwerke wachsen. ■

Lu Liling, Qi Lie, SANY Group

Lu Liling

Lu Liling arbeitet als Ingenieurin im Entwicklungsteam für den SET230-Muldenkipper bei der SANY Group in Shanghai, China.





Anschaulich visualisiert: Mit dSPACE MotionDesk können die SANY-Entwickler die auf dem HIL-System simulierte Fahrmanöver und Szenarien in einer anschaulichen 3D-Online-Animation nachstellen und so die Auswirkungen ihrer Parameteränderungen in Echtzeit sichtbar machen.

Qi Lie

Qi Lie arbeitet als Ingenieur im Entwicklungsteam für den SET230-Muldenkipper bei der SANY Group in Shanghai, China.



Stolze Entwickler: Die intuitiven dSPACE Werkzeuge halfen SANY, nicht nur die Entwicklung und den Test seiner Muldenkipper deutlich zu vereinfachen und zu beschleunigen, sondern auch die Technologie des elektrifizierten Antriebsstranges insgesamt besser zu verstehen. Die so gewonnenen Erfahrungen werden für den sukzessiven Aufbau eines hochqualifizierten Entwicklerteams genutzt.