

# **Der Riemengetriebene Starter-Generator (RSG) als aktuelle Herausforderung für eine funktionsoptimierte Riementrieb-Systementwicklung**

Dipl.-Ing. M. Bonkowski VDI, Hannover; Dipl.-Ing. (FH) M. Bogner VDI, Herzogenaurach

## **1. Zusammenfassung**

Am Beispiel eines Nebenaggregatetriebes mit zusätzlicher Startfunktion über den Riementrieb wird ein Einblick in die aktuellen Möglichkeiten bei der Riementrieb-Systementwicklung gegeben. Dazu wird auf die verschiedenen Einflußgrößen, deren Auswirkungen auf das Riementriebsystem bzw. die Einzelkomponenten sowie die heute zur Verfügung stehenden Entwicklungstools und Prüfmöglichkeiten eingegangen. Gleichzeitig wird mit dem riemengetriebenen Starter-Generator eine neue, in Europa noch nicht in Serie befindliche Technologie, vorgestellt. Aufgrund des hiermit möglichen komfortablen Motorstarts bei moderaten Mehrkosten ist diese Zusatzfunktion insbesondere zur Realisierung von verbrauchsreduzierenden Start/Stop-Systemen von besonderem Interesse.

## **2. Einleitung**

Für den Antrieb von heute üblichen Nebenaggregaten am Verbrennungsmotor wie Klimakompressor, Wasserpumpe, Lenkhilfepumpe und Generator hat sich der Keilrippenriemen mittlerweile bei allen Fahrzeugherstellern etabliert. Zur Sicherstellung der einwandfreien und dauerhaften Funktion sind außerdem automatische Riemenspannsysteme Stand der Technik. Aufgrund der komplexen Wechselwirkung zwischen Riemen und Spannsystem hat sich in der Vergangenheit der Ansatz bewährt, diese Komponenten zumindestens in der Entwicklungsphase als Riementriebsystem zu behandeln.

In aktuellen Systementwicklungen von solchen Nebenaggregatetrieben ist in jüngster Zeit neben dem reinen Antrieb der Aggregate auch die Zusatzfunktion „Motorstart über den Riementrieb“ immer öfter in Diskussion. Die Komponenten (Bild 1) eines solchen Systems bestehen aus einem Hochleistungskeilrippenriemen, einem Starter-Generator mit Leistungselektronik sowie einem speziellen Spannsystem, das sowohl für den Startvorgang

als auch für den Aggregatebetrieb für die richtige Riemenvorspannung sorgt. Optional ist bei hohem Drehmomentbedarf an der Kurbelwelle eine spezielle Riemenscheibe mit integriertem Planetengetriebe einsetzbar, um durch eine zusätzliche mechanische Übersetzung das vom Starter-Generator zur Verfügung stehende Drehmoment weiter zu erhöhen.

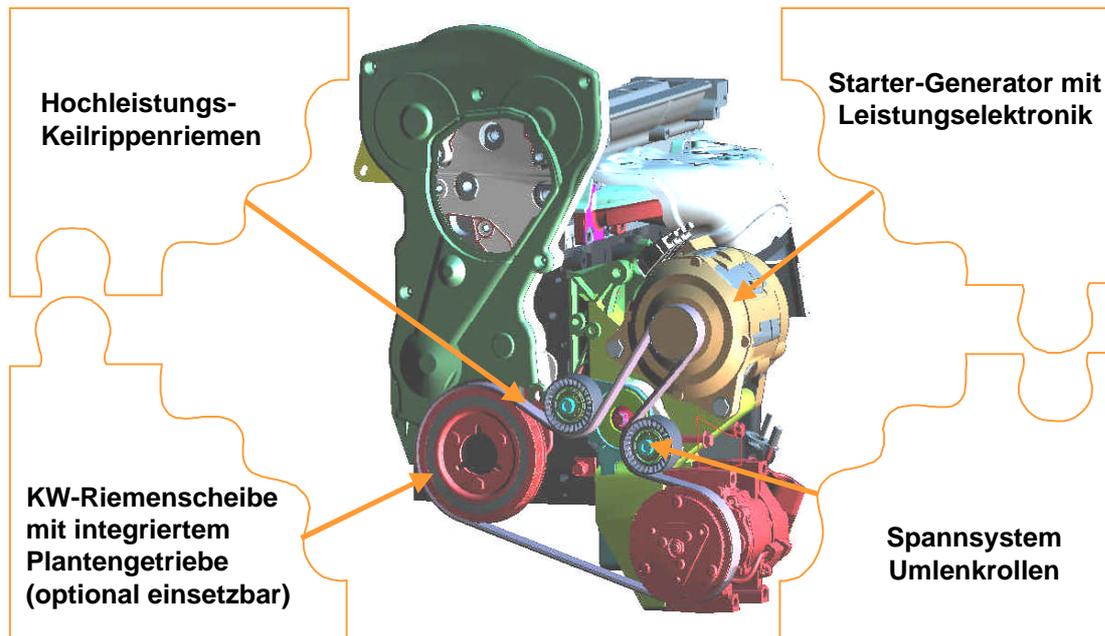


Bild 1: Komponenten eines RSG-Systems

Auf diese Weise kann neben dem Antrieb der konventionellen Aggregate ein schneller und geräuscharmer Motorstart realisiert werden. Dies ist Grundvoraussetzung für eine komfortable Start/Stopp-Automatik, wodurch sich, je nach Motorart und Einsatzbereich, ca. 5-10% Benzineinsparung erzielen lässt.

Durch die Verwendung der bewährten Klauenpolmaschine in 14V-Technik bleiben auch die Mehrkosten für ein solches System im überschaubaren Rahmen, wobei grundsätzlich natürlich auch ein Wechsel auf das zukünftige 42V-Bordnetz mit entsprechend höheren Leistungen problemlos möglich ist.

Kompakte Abmessungen der Komponenten und geringer Modifikationsbedarf am Motor tragen ebenfalls zu geringen Entwicklungs- und Systemkosten bei, zumal die Applikation an vorhandene Motorkonzepte relativ einfach möglich ist, da keine Änderungen im Abtriebsstrang erforderlich sind.

### 3. Funktion und Einsatzbereiche

Beim Startbetrieb wird mittels einer sowohl als Starter als auch Generator funktionsfähigen E-Maschine, die im Bereich des heutigen Generators angeordnet ist, der Verbrennungsmotor über den Riementrieb gestartet (Bild 2). Aufgrund der begrenzten Drehmomentkapazität der E-Maschine können im 14V-Bordnetz Ottomotoren bis ca. 2,5 l Hubraum bei Warmstart und ca. 2,0 l bei Kaltstart gestartet werden. Bei Dieselmotoren liegen die Hubraumgrenzen infolge des höheren Drehmomentbedarfs an der Kurbelwellen mit ca. 2,0 l für den Warmstart und ca. 1,5 l für den Kaltstart naturgemäß niedriger.

Durch Einsatz eines Zusatzgetriebes an der Kurbelwelle lassen sich aufgrund der zusätzlichen mechanischen Übersetzung die Einsatzbereiche um jeweils etwa 0,5 l Hubraum nach oben verschieben, Grenzen ergeben sich dann durch die verfügbare elektrische Leistung.

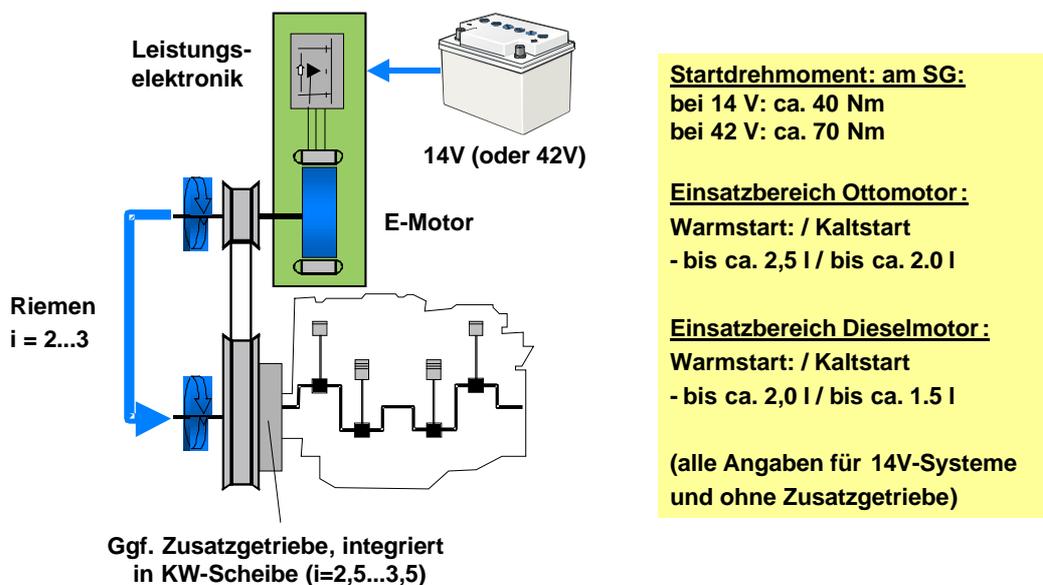


Bild 2: Funktion und Einsatzbereich des RSG bei Startbetrieb

Beim Aggregatebetrieb (Bild 3) erfolgt die Generatorfunktion wie üblich über den Riementrieb, ein ggf. vorhandenes Zusatzgetriebe an der Kurbelwellenscheibe schaltet selbsttätig auf eine Übersetzung von 1. In der Generatorfunktion lassen sich im 14V-Bordnetz elektrische Leistungen von ca. 3 kW bei einem maximalen Wirkungsgrad von ca. 70% und im 42V-Bordnetz sogar elektrische Leistungen von ca. 8 kW bei einem maximalen

Wirkungsgrad von ca. 75% erzeugen. Außerdem ist bei Bedarf sowohl eine Drehmomentunterstützung (Boosten) des Verbrennungsmotors als auch eine zusätzliche Energierückspeisung (Rekuperation) im Bremsbetrieb durch die E-Maschine darstellbar.

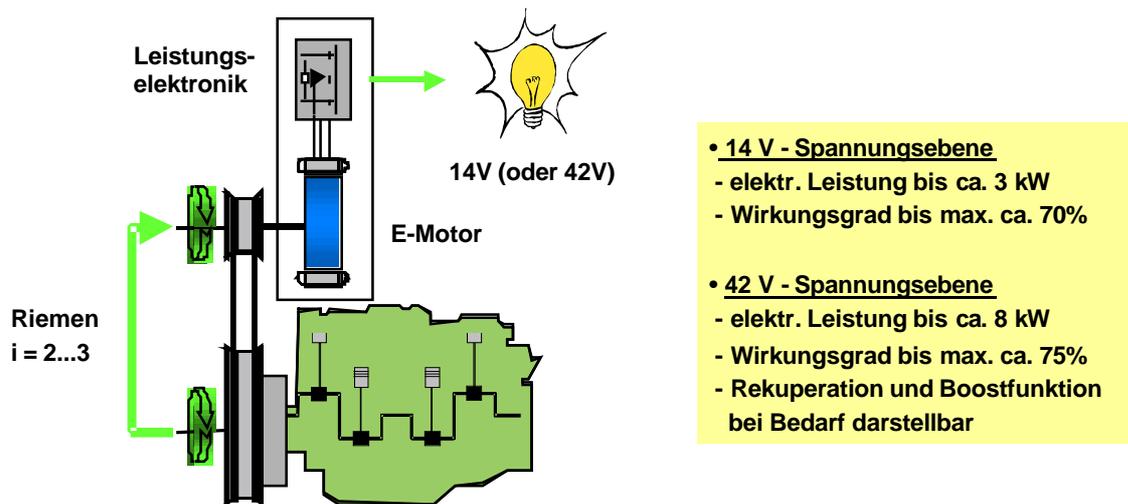


Bild 3: Funktion und Einsatzbereich des RSG bei Aggregatebetrieb

#### 4. Auswirkungen auf den Riementrieb

Der RSG besitzt zwar gegenüber Kurbelwellen-Starter-Generatoren den großen Vorteil, keine Änderungen im Abtriebsstrang des Motors zu verursachen, allerdings muß bei der Auslegung des Riementriebsystems auf einige Punkte geachtet werden. So führt die Richtungsumkehr des Drehmoments am Generator bei Start- (und ggf. Boostbetrieb) zu wechselndem Leer- und Zugtrum, was insbesondere bei der Spannsystemauslegung zu berücksichtigen ist, damit eine angepaßte Riemenspannkraft sowohl im Startbetrieb als auch im generatorischen Betrieb gewährleistet werden kann.

Die stark erhöhte Generatorleistung und ein erhöhtes Massenträgheitsmoment der E-Maschine führen außerdem zu größeren stationären und dynamischen Belastungen im Riementrieb, zumal der Einsatz eines Generatorfreilaufs aufgrund des Start- und ggf. Boostbetriebs nicht möglich ist. Die Folge sind höhere Zugkraft-, Biegewechsel- und Verschleißbeanspruchungen für den Riemen, größere mechanische Belastungen und erhöhte Dämpfungsanforderungen für das Spannsystem und höhere Lagerkräfte an Spann- bzw. Umlenkrollen sowie weiteren im Antrieb integrierten Nebenaggregaten.

Insbesondere aufgrund dieser Zusatzanforderungen ist eine frühzeitige und kompetente Riementrieb-Systemoptimierung unabdingbare Voraussetzung, um letztendlich ein funktionsfähiges und dauerlauffähiges Riementriebsystem mit Start/Stopp-Funktion oder sogar zusätzliche Boost- und Rekuperationsfunktion (im 42V-Bordnetz) darzustellen.

## 5. Hochleistungs-Keilrippenriemen für RSG-Anwendungen

Auf Basis der heute für hohe Laufzeiten und weite Einsatztemperaturen besonders geeigneten EPDM-Keilrippenriemen UNIPOWER<sup>®</sup> sind zur weiteren Optimierung für RSG-Applikationen diverse Modifikationen, wie in Bild 4 gezeigt, vorgenommen worden, um den speziellen Anforderungen im RSG-Einsatz gerecht zu werden.

### Anforderungen bei RSG-Einsatz:

- höhere Biegewechselbeständigkeit
- verbessertes Schwingungsverhalten
- höhere Zugstrangbelastbarkeit
- verbessertes Verschleißverhalten

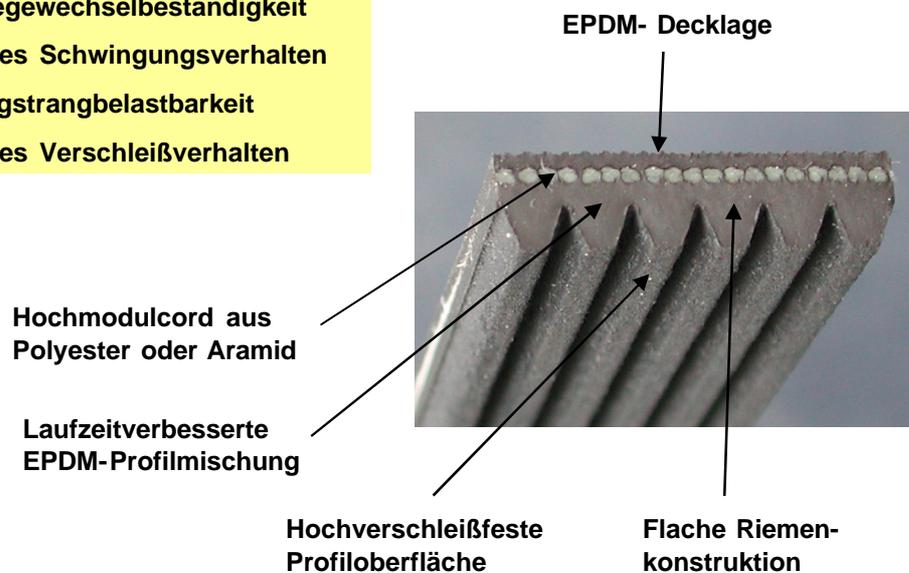


Bild 4: Keilrippenriemen für RSG-Applikationen: UNIPOWER<sup>®</sup> BSA

Diverse Funktions- und Start/Stopp-Dauerlaufversuche auf entsprechenden Prüfständen sowie Funktionserprobungen an befeuerten Motoren und mit Prototypfahrzeugen haben mittlerweile gezeigt, daß die Anforderungen für aktuelle RSG-Applikationen erfüllt werden. Die axiale Baubreite kann im Regelfall bei den heute üblichen 6 Rippen bleiben, nur bei sehr hohen Drehmomentanforderungen sowie Zusatzfunktionen wie Boosten und Rekuperation sind ggf. 1-2 Rippen mehr erforderlich.

Die anfängliche Befürchtung, daß mit einem kraftschlüssigen Übertragungsmittel die erforderlichen Umfangskräfte nicht übertragbar seien, sind ausgeräumt und auch die Riemenlebensdauer, die natürlich sehr stark applikationsabhängig ist, kann bei optimaler Systemabstimmung für Motorlebensdauer dargestellt werden.

## **6. Spannsysteme für RSG Anwendungen**

Die einfachste Möglichkeit einen Riemen zu spannen, ist die Verwendung einer „starrten“ Spannrolle. Eine derartige Spannrolle wird mittels Exzenter oder Langloch in den Riemetrieb geschwenkt, nachteilig ist hierbei jedoch die benötigte sehr hohe Vorspannung des Riemetriebs und die hieraus resultierende stark reduzierte Systemlebensdauer. Bei konventionellen Nebenaggregatetriebsen werden daher automatische Spannsysteme eingesetzt, um die Riemenvorspannkraft während der gesamten Systemlebensdauer nahezu konstant zu halten.

- § Sicherstellen einer angepaßten und nahezu konstanten Riemenspannkraft, sowohl bei Start-, als auch im generatorischen Betrieb (Wechsel zwischen Leer- und Zugtrum)**
- § Sicherstellung einer ausreichenden Riemenvorspannung für einen zuverlässigen Motorstart über den gesamten Temperaturbereich**
- § Sicherstellen einer hohen Lebensdauer aller Komponenten**
- § Reduzierung von Riemenschlupf und Laufgeräusch**
- § Reduzierung dynamischer Spitzenbelastungen im Riemetrieb**
- § Ausgleich von Riemenlängung und Verschleiß über Lebensdauer**

Bild 5: Anforderungen an das Spannsystem für RSG-Anwendungen

Ein derartiges Spannsystem wird normalerweise im Leertrum angeordnet. Bei Riemetriebsen für RSG Anwendungen ist eine eindeutige Zuordnung des Leertrums nicht mehr möglich, da der Generator im Startbetrieb antreibendes, im generatorischen Betrieb dagegen getriebenes Element ist. Die Richtung des an der Generatorscheibe wirksamen

Drehmoments kehrt sich also je nach Betriebszustand um, der Einsatz konventioneller Spannsysteme ist daher nicht mehr möglich.

Die große Herausforderung bei der Entwicklung von für RSG-Anwendungen geeigneten Spannsystemen liegt demnach darin, unabhängig vom Betriebszustand das jeweils vorhandene Leertrum zu spannen. Der Idealzustand ist erreicht, sobald die Möglichkeit besteht, während des Startbetriebs die Vorspannkraft zusätzlich zu erhöhen, während im generatorischen Betrieb die Vorspannkraft reduziert werden kann. Ferner muß bei Hochleistungs-RSG-Anwendungen zusätzlich noch die Möglichkeit des Boost- und Rekuperationsbetriebs sichergestellt werden.

Ein Lösungsansatz für die geschilderte Problematik stellt das sogenannte „Pendelspannsystem“ dar. Besonderes Merkmal ist die Ausführung mit zwei voneinander unabhängigen Hebelarmen, die lediglich durch eine Feder verbunden sind. Dieses Spannsystem wird im Riementrieb derart angeordnet, daß immer einer der beiden Hebelarme im jeweils vorhandenen Leertrum sitzt. Durch die Verlagerung des Gesamtsystems ergibt sich für den Startbetrieb eine andere Betriebsposition als im generatorischen Betrieb, was bei entsprechender Drehpunktlage und ggf. gezielt unterschiedlichen Hebelarm-längen zu einer Erhöhung der Vorspannkraft im Startbetrieb führt.

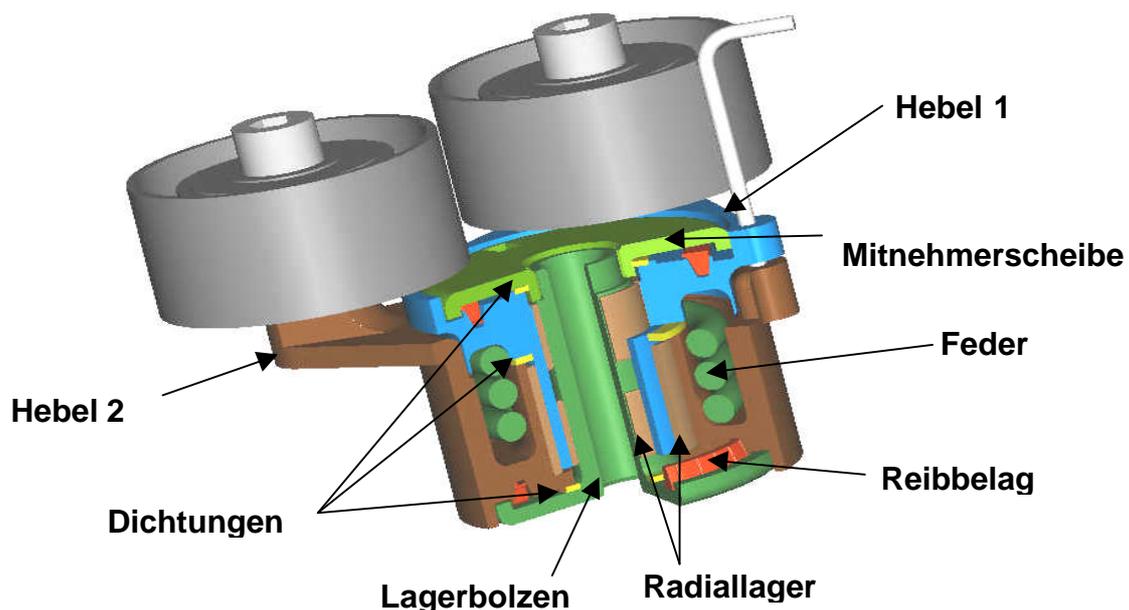


Bild 6: Pendelspannsystem in Schittdarstellung

Neben der gezeigten Variante des Pendelspannsystems befinden sich selbstverständlich auch andere Spannerkonzepte in der Entwicklung, deren ausführliche Beschreibung würde jedoch den gegebenen Rahmen sprengen.

## 7. Entwicklungstools

Die Entwicklungsphase eines Riementriebsystems gliedert sich im Wesentlichen in drei große Abschnitte. Rechnerische Auslegung und dynamische Simulation des Riementriebs, Konstruktion und Bauteiloptimierung sowie Überprüfung der Hardware im Versuch. Hierfür sind speziell an die neuen Herausforderungen angepasste Entwicklungstools vorhanden. Die rechnerische Auslegung erfolgt zunächst statisch unter Berücksichtigung aller Belastungszustände und Toleranzlagen, darüberhinaus werden bei der statischen Auslegung auch thermische Effekte berücksichtigt. Im direkten Anschluß wird eine dynamische Simulation des Riementriebs durchgeführt. Ziel ist hierbei, Aufschluß über das Verhalten des Riementriebs unter dynamischer Anregung der Kurbelwelle zu erhalten. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Bewegung des Spannsystems, sowie auf den Kräften, die im Riementrieb auftreten können.

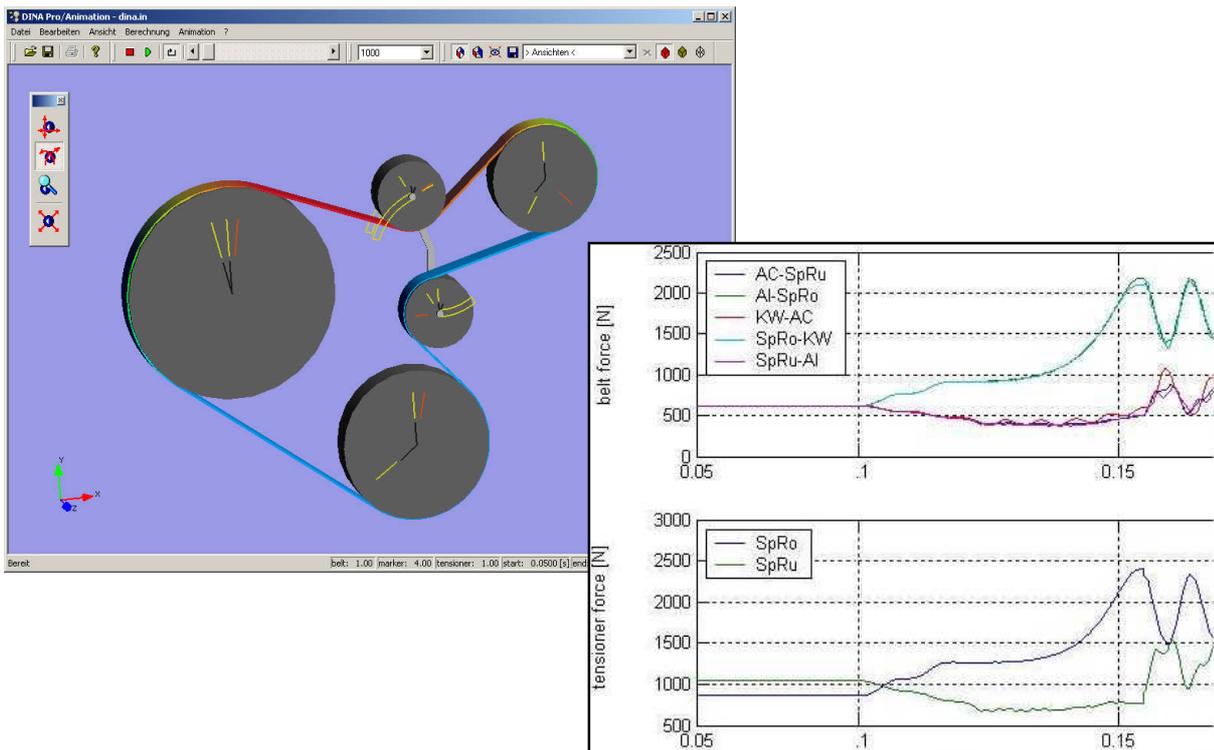


Bild 7: RSG-Antrieb in einer DINA Simulation

Bisher konnte die dynamische Simulation des Riementriebs nur für stationäre Betriebspunkte durchgeführt werden, aufgrund der veränderten Anforderungen von RSG Anwendungen wurde die vorhandene Software jedoch grundlegend überarbeitet. Mittlerweile sind neben stationären Berechnungen auch transiente Simulationen möglich. Demnach kann ein kompletter Startvorgang, quasi ab Drehzahl Null, bis hin zur maximal möglichen Motordrehzahl simuliert werden. Dies ermöglicht bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium die Optimierung des Gesamtsystems und trägt somit zu verkürzten Entwicklungszeiten und geringeren Entwicklungskosten bei.

Hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung der Spannsysteme kommen moderne 3D-CAD Systeme, wie z.B. Pro-Engineer zum Einsatz. Im Nachgang kann dann die vorhandene Geometrie anhand der simulierten Belastungsdaten bzgl. der Festigkeit aller Bauteile analysiert werden. Um den vorhandenen Bauraum bestmöglich auszunutzen und das Spannsystem hinsichtlich auftretender Belastungen zu optimieren, besteht ferner die Möglichkeit, eine Topologieoptimierung der Bauteile durchzuführen.

Neben der dynamischen Simulation ist auch die Funktions- und Lebensdaueranalyse des Keilrippenriementriebs unter stationären Lastzuständen ein wichtiges Entwicklungstool, das im Zusammenspiel mit der statischen Auslegung des Spannsystems und der dynamischen Simulation zur frühzeitigen Antriebsoptimierung genutzt wird. Die Eingabeparameter und die Ergebnisse nach einem Berechnungsdurchgang zeigt das nachfolgende Bild 8 .



Bild 8: Lebensdauer- und Funktionsberechnung des Keilrippenriemens

Mit diesem Entwicklungstool kann in einer frühen Phase in Abhängigkeit der gewählten Riemenausführung und –breite die zu erwartenden Lebensdauer des Keilrippenriemens,

sowie wichtige Funktionskennwerte wie z.B. stationärer Schlupf oder Mindestvorspannkraft ermittelt werden. Sollten die Lebensdauanforderungen mit dem vorgegeben Trieblayout nicht zu erreichen sein, sind außerdem aus den Ergebnissen Optimierungsmaßnahmen abzuleiten, deren Auswirkungen in weiteren Berechnungsdurchgängen direkt überprüft werden können. Somit ist eine unter den gegebenen Randbedingungen funktions- und lebensdaueroptimierte Riemetriebssystemauslegung sowie die schnelle technische Bewertung verschiedener Alternativvarianten möglich.

## 8. Prüfstände und Meßeinrichtungen für die Riemetriebssystementwicklung

Trotz der vielfältigen Berechnungsmöglichkeiten sind auch Versuchseinrichtungen notwendig um die Funktion und die Lebensdauer der Komponenten sowie des gesamten Riemetriebssystems zu verifizieren. Das Spektrum reicht von verschiedensten Komponentenprüfständen zum Nachweis der Funktion und Lebensdauer von Riemen, Spannsystem und Umlenkrollen bis zur Untersuchung kompletter Riemetriebe anhand eines sogenannten Breadboardtests. Hierfür wird der gesamte Riemetrieb inklusive der Nebenaggregate auf einer Grundplatte 1:1 nachgebildet. Die Kurbelwelle wird mittels eines E-Motors simuliert, der auch in der Lage ist, die Kurbelwellendrehungleichförmigkeiten (gemessen oder gerechnet) abzubilden, und alle Aggregate können über entsprechende Belastungseinheiten gezielt mit Drehmoment beaufschlagt werden.

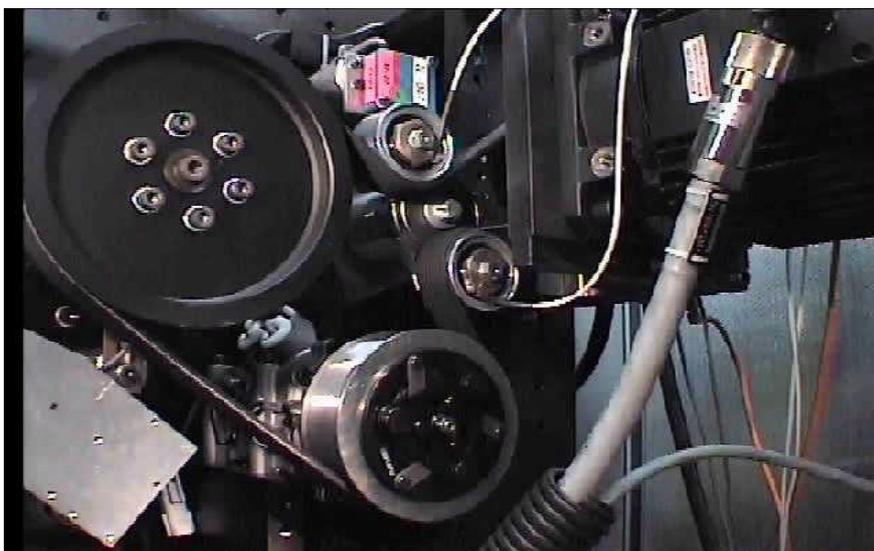


Bild 9: RSG-Simulationsprüfstand

Speziell für die Simulation eines RSG Triebes wurde ein eigens hierfür konstruierter Simulationsprüfstand aufgebaut. Hier wird neben der Kurbelwelle auch der Startergenerator mittels geeigneter E-Motoren simuliert. Die Simulation kann sowohl für den Startbetrieb als auch für den generatorischen Betrieb durchgeführt werden, bei Bedarf sind außerdem auch Rekuperation und Boostfunktion nachstellbar.

Sobald ein realer Motor verfügbar ist, besteht selbstverständlich auch die Möglichkeit einer Riementriebmessung am befeuerten Motor, wobei die gezielte Belastung von Motor und Nebenaggregaten notwendig ist. Auch Messungen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen (z.B. Kaltstart) oder sogar im Fahrzeug können durchgeführt werden, ein klimatisierter Rollenprüfstand steht hierfür zur Verfügung.

Typische Meßgrößen für eine umfassende Funktionsanalyse sind hierbei Wege und Kräfte der Spannrollen, Schlupfverhalten des Riemens an unterschiedlichen Scheiben, Rienschwingungen und Kräfte im Riemen sowie Beschleunigungsverhalten von Bauteilen. Bild 10 zeigt den Meßaufbau an einem befeuerten Motor für RSG-Grundsatzversuche.

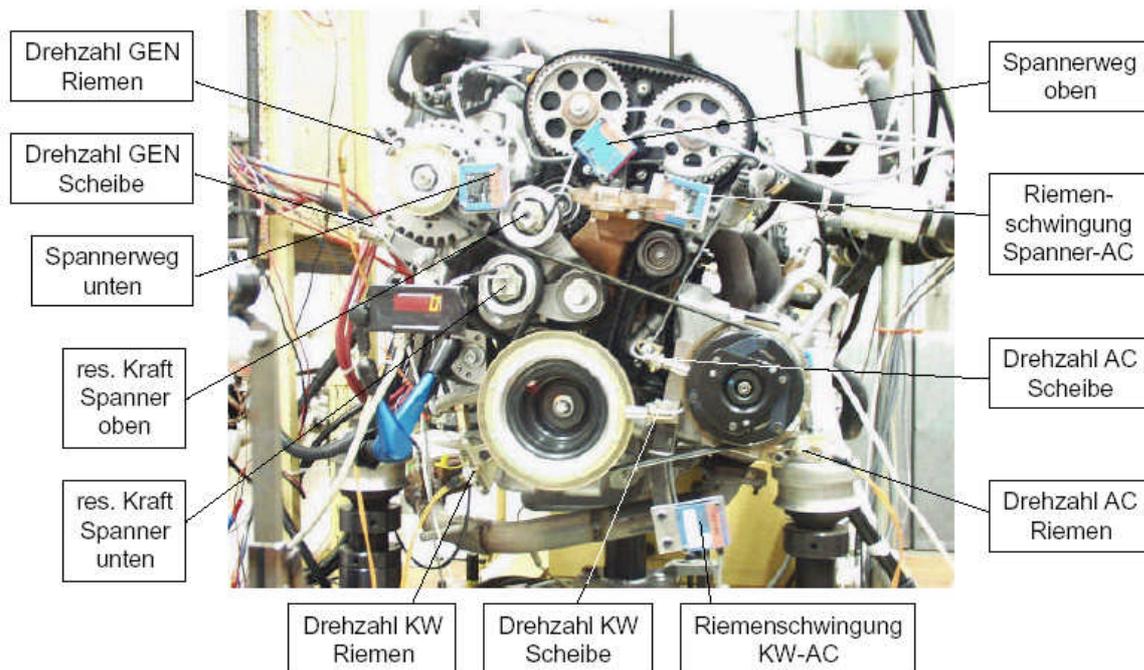


Bild 10: Riementriebmessung an einem befeuerten Motor

Alle Meßwerte werden zeitgleich erfasst und können anschließend nach Bedarf ausgewertet werden. Bei RSG-Applikationen ist z.B. das Startverhalten hinsichtlich Riemenschlupf und Startzeit von großem Interesse. Im Bild 11 sind diese Werte für den RSG-Start und zum Vergleich für den Start mit konventionellem Anlasser eines 1,6l Benzinmotors dargestellt.

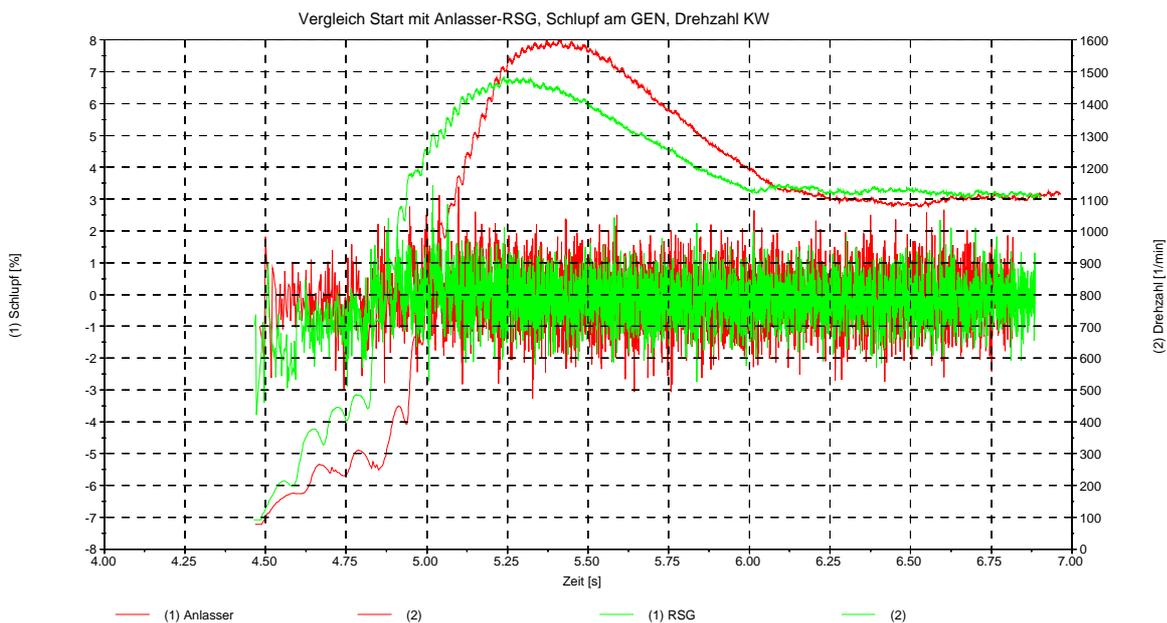


Bild 11: Schlupf- / Drehzahlverhalten eines RSG im Vergleich zum konv. Anlasser

Es zeigt sich in der Anfangsphase des Startvorgangs mit RSG, wie erwartet, ein leicht erhöhter Schlupf an der Starter-Generator-Scheibe, der für den Riemen aber noch akzeptabel ist und zu keinerlei Geräuschemissionen führt. Deutlich ist auch die kürzere Startzeit beim RSG-Start zu erkennen, was neben dem geräuschfreien Motorstart für den Einsatz in einem komfortablen Start/Stopp-System von großer Bedeutung ist.

## 9. Ausblick

Der Riemengetriebene Starter-Generator bietet die Möglichkeit, ein komfortables Start/Stopp-System ohne großen Änderungsaufwand bei moderaten Mehrkosten an vorhandene Motoren zu applizieren. Die grundsätzliche Funktion ist sowohl theoretisch als auch praktisch nachgewiesen, und auch die Dauerhaltbarkeit ist bei optimaler Systemabstimmung realisierbar.

Bei vielen Fahrzeugherstellern gibt es zur Zeit Entwicklungsaktivitäten zu dieser Thematik, so daß erste konkrete Serieneinsätze in Europa deshalb ab 2004 zu erwarten sind, wobei die Einführung zuerst bei kleinen Benzinmotoren im Rahmen des vorhandenen 14V-Bordnetzes erfolgen dürfte.

Berechnungen und erste Motorversuche haben außerdem gezeigt, dass auch im 42V-Bordnetz mit entsprechend höheren elektrischen Leistungen und besserer Startperformance sowie erweiterter Funktionalität wie Rekuperation und Boostfunktion der RSG grundsätzlich einsetzbar ist, und sich dadurch weitere interessante Perspektiven für Funktionalität und Benzineinsparung ergeben.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, daß der RSG sowohl im 14V- als auch im 42V-Bordnetz technisch realisierbar ist und sich aufgrund seiner systemtypischen Merkmale als Basis für ein kostenoptimiertes Start/Stop-System anbietet, so daß in den nächsten Jahren mit dem verstärkten Serieneinsatz dieser Technologie zu rechnen ist.

Erstveröffentlichung:

VDI Verlag GmbH Düsseldorf 2003 VDI Berichte