

1 Einleitung

Der Synchronriemen ist ein weitverbreitetes Zugmittel im Steuertrieb von PKW-Motoren. Entscheidende Vorteile, die den Einsatz des Synchronriemens gegenüber anderen Antriebskonzepten den Vorzug geben, sind nach *Krause* [1]:

- hohe Drehzahlfestigkeit
- geringes Leistungsgewicht
- geringes Leistungsvolumen
- Wartungsfreundlichkeit
- geringe Kosten

Bei genauer Betrachtung der als Vorteil dargestellten Punkte zeigt sich, dass der Punkt „Wartungsfreundlichkeit“ beim Einsatz des Synchronriemens im PKW besonderer Kritik bedarf. In den Medien wird und wurde dazu ausführlich berichtet und diskutiert. Grund waren und sind die z.T. vorgeschriebenen Wechselintervalle und Frühausfälle. Deshalb arbeiten viele Motorenhersteller auch an Alternativen wie Kettentrieb und Rädertrieb. Bild 1.0.1 zeigt eine Auswertung von PKW-Motoren bis 2001 getrennt nach Diesel- und Ottomotoren [*Autodata Limited* 2].

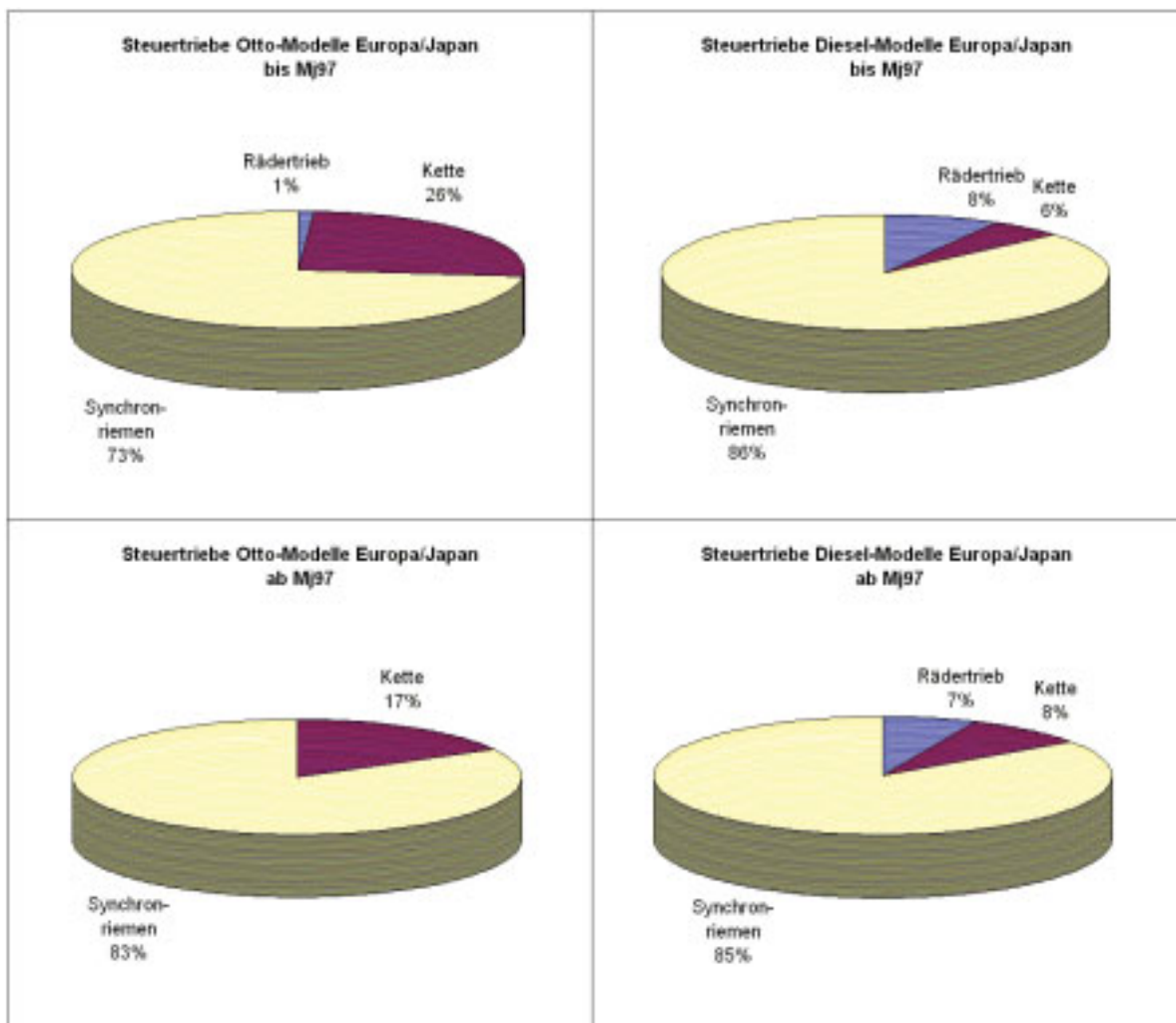


Bild 1.0.1: Vergleich der Steuertriebe japanischer und europäischer PKW der Modelljahre (Mj.) 1986 bis 1996 und der Modelljahre (Mj.) 1997 bis 2001; berücksichtigt sind Hersteller, die Synchronriemen einsetzen [2]

Auffällig ist der Trend bei Dieselmotoren im Gegensatz zu den Ottomotoren zu Steuertrieben mit Kette bei Vergleich der im Einsatz befindlichen Motoren bis 1997 zu den Motoren ab 1997. Noch nicht zu erkennen ist die Neuentwicklung von Steuertrieben mit Stirnrädern. Aktuelle Beispiele sind z.B. die neuen 5- und 10-Zylinder-Dieselmotoren von Volkswagen [Hadler u.a. 75, 76]. Aber auch z.B. Renault und Volvo haben Stirnradtriebe beim Dieselmotor im Einsatz. Diese Entwicklung zeigt besonders bei den enormen Druck in der Technischen Entwicklung für Dieselmotoren zu größerer Wartungsfreundlichkeit und damit zur Suche neuer Antriebskonzepte.

Ein Blick zurück in die Anfänge der Entwicklung direkteinspritzender Dieselmotoren (SDI, TDI®) bei Volkswagen zeigt einige Ursachen für die Lebensdauerprobleme. Die deutlich höheren Einspritzdrücke beim TDI® gegenüber den früher im Einsatz befindlichen Wirbelkammernmotoren erzeugten ein völlig neues Ausfallbild des Synchronriemens. Es handelte sich offensichtlich um eine thermische Überhitzung im Zahn des Synchronriemens. Die anfänglich erzielten Laufzeitergebnisse des Synchronriemens waren so niedrig, dass es fraglich war, ob das Aggregat mit einem Synchronriemen umsetzbar ist. Verantwortlich für die Probleme sind die Massenkräfte, die durch die dynamische Bewegung erzeugt werden und durch den höheren Einspritzdruck deutlich verstärkt wurden. Keine der bisherigen Erfahrungen in der Anwendungstechnik (Automobil- wie Industrieanwendung) erklärte hinreichend den Schadensablauf. Der Durchbruch gelang mit der halbautomatischen Spannrolle und der Umstellung des Elastomers auf ein temperaturstabileres Material (HNBR) [Kühlmeyer 78, Strauß 79]. Dadurch konnte zum einen die Biegewechselast am Zahn durch Sicherstellung einer Mindestvorspannung im Riemen reduziert, zum anderen die Temperaturbeständigkeit des Zahns gesteigert werden.

Hervorgerufen durch die Notwendigkeit von niedrigem Kraftstoffverbrauch, hoher Leistungsdichte und geringen Schadstoffemissionswerten steigen die erforderlichen Einspritzdrücke und damit verbunden die dynamischen Belastungen weiter. Daraus ergeben sich ständig gesteigerte Anforderungen an den Synchronriemen mit neuen Problempunkten. Diese neuen Problempunkte und der Wunsch nach Wartungsfreiheit des Steuertriebs machen weitere Anstrengungen notwendig. Ziel ist deshalb nach wie vor die systematische Ermittlung von Ausfallmechanismen und daraus abgeleiteter Lebensdauerverbesserungsmaßnahmen. Grundlegende, speziell auf den Dieselmotor ausgerichtete Entwicklungsarbeit beim Motorentwickler wird notwendig, um die Lebensdauerprobleme erfolgreich zu lösen. Die Riemenhersteller und deren Zulieferer sind dabei wesentliche Partner. Die Entwicklungserfolge und das in der Regel auch günstigere akustische Verhalten sowie die oben genannten Vorteile machen den Synchronriemen weiter interessant als Steuertriebelement. Da mit der Wartungsfreundlichkeit die zu erwartenden Laufleistungen im Versuch steigen, sind für eine effektive Entwicklung Werkzeuge notwendig, die eine sichere Prognose der zu erwartenden Kundenlaufleistung zulassen. Die Erprobungszeiten für Laufleistungen oberhalb von ca. 200.000 km sind zu lang für die vorhandenen Entwicklungszeiten. So bietet sich ein an Schadensmechanismen orientiertes Vorgehen bei der Analyse gelaufener Riemen und bei der Formulierung von Entwicklungszielen an. Durch das phänomenologische Vorgehen ist erst eine zielgerichtete Entwicklung möglich.

Ein Blick auf die Entwicklung der Ottomotoren zeigt aufgrund der geringeren Belastung erhebliche Entwicklungserfolge, die nicht zuletzt auf den Erfahrungen aus der Dieseleentwicklung basieren. Hier sind wartungsfreie Steuertriebe darstellbar. Beim Dieselmotor mit Pumpe-Düse-Einspritzung und mit Verteilereinspritzung ist das bisher noch nicht der Fall. Die vorliegende Arbeit leistet deshalb einen Beitrag zum Verständnis der Schadensmechanismen und zu einer Lebensdauerprognose.

2 Aktueller Kenntnisstand aus Literatur und Entwicklung

2.1 Grundlegende Arbeiten

Direkteinspritzende Dieselmotoren werden in Großserie erst seit Anfang der 90er Jahre im PKW eingesetzt. Die Problemstellungen aus dem Betrieb sind deshalb noch nicht umfassend untersucht. Die Literatur bietet wenige Ansätze, die Schadensmechanismen zu verstehen und die Laufleistung zu prognostizieren.

Das Augenmerk wird in der Literatur überwiegend auf Industrie- und Ottomotorenanwendungen gelegt. Hervorzuheben sind hier die umfassenden Arbeiten von *Krause* [3] und *Funk* [4]. Für Anwendungen im Allgemeinen Maschinenbau sind Erkenntnisse in großer Breite vorhanden und beim Riemenhersteller empirisch in Auslegungskriterien eingearbeitet. Damit ist die Möglichkeit einer Konstruktionsauslegung mit genügend hoher Sicherheit gegeben. Als Ausfallmechanismen werden in [1] folgende Schadensbezeichnungen genannt, Tabelle 2.1.1:

Schadensfall	mögliche Ursache
Kantenverschleiß	<ul style="list-style-type: none"> - falsche Bordscheibengeometrie - Fluchtungs- und Winkelabweichungen
Verschleiß am Gewebe der Zahnflanken	<ul style="list-style-type: none"> - zu hohe Umfangskraft - unpassende Teilung (Riemen-Scheibe) - zu raue Scheibenoberfläche - zu niedrige Vorspannung
Verschleiß am Gewebe des Stegbereichs	<ul style="list-style-type: none"> - Vorspannung zu hoch - zu raue Scheibenoberfläche
Zahnfußanrisse	<ul style="list-style-type: none"> - zu hohe Umfangskraft - unpassende Teilung (Riemen-Scheibe) - Elastomerversprödung durch Alterung - zu niedrige Betriebstemperatur (bei Polyurethan-Riemen) - falsche Verzahnung
Riemenriss	<ul style="list-style-type: none"> - zu hohe Vorspannung - zu hohe Umfangskraft - Eingriffstörungen (Riemen-Scheibe) - zu hohe Biegebelastung
Aufweichen des Elastomers	<ul style="list-style-type: none"> - zu hohe Betriebstemperatur - Kontakt mit aggressiven Medien

Tabelle 2.1.1: Synchronriemenschäden und mögliche Ausfallursachen [1]

Der Riemen steht bei dieser Betrachtung allerdings nicht im Mittelpunkt. Die Verbesserungsmaßnahmen bei Schäden werden überwiegend in den Betriebsbedingungen gesehen. Das heißt, dass die Randbedingungen dem Riemen angepasst werden müssen.

Murakami, Watanabe [7] und *Furukawa* [73] richteten den Blick auf die Kraftverteilung der im Eingriff befindlichen Zähne des Synchronriemens im Umschlingungsbogen des treibenden und des getriebenen Rades. Sie sehen die Verformung der im Eingriff befindlichen Zähne und das

daraus abgeleitete Zahneingriffsverhalten als wesentlich die Lebensdauer beeinflussend an. Dazu wurden mathematische Modelle entwickelt, die die Kraftverteilung beschreiben, hervorzuheben sind hier die Arbeiten von *Peeken* [5] und *Karolev* [6]. Dieser Ansatz trifft offensichtlich für weniger stark dynamisch beanspruchte Steuertriebe zu. Eine Optimierung des Zahneingriffs ergibt experimentell eine höhere Lebensdauer.

Dalgarno u.a. [9] ermittelten dazu ein Lebensdauerprognose-Modell des Synchronriemens. Als Lebensdauerparameter führten sie die Verformung der Riemenzähne ein. Dieser Parameter ist sowohl abhängig vom Riemen als auch von der Kraftverteilung.

Kühlmeyer [78] und *Benda* [77] weisen in ihren experimentellen Untersuchungen zur Riemenlebensdauer auf den wesentlichen Einfluss der Riemenvorspannung bei dynamischen Betrieb hin. Bei wachsender Dynamik ist eine höhere Riemenspannung notwendig.

Isuka u.a. [66, 67, 68] untersuchten sehr ausführlich das Versagen des Cords (vgl. Bild 2.3.1) am Ottomotor. Es zeigt sich, dass die Separation der Cordfilamente (vgl. Bild 2.3.4b) im Zahnbereich wesentliche Schadensursache für Schäden am Cord ist.

Alle diese Veröffentlichungen beschreiben wesentlich das Verhalten von Steuertrieben in Industrie und Ottomotorenanwendungen. Sie geben für Dieselanwendungen nur bedingt Hilfestellung.

Der Vorschlag einer Lebensdauerprognose von *Arnold, Farrenkopf* und *Mc Namara* [74] geht jedoch auch auf Erfahrungen aus Dieselanwendungen zurück. Basis der Bewertung ist die Trennung nach folgenden Ausfallmechanismen (hier als Fehlermodi bezeichnet):

- Zahnabscherung
- Verschleiß
- Riemenriss
- Seitenverschleiß

Die eigentliche Lebensdauerprognose basiert auf der Korrelation von Versuchsdaten aus Komponententests und Fahrzeugtests. Auf physikalische Zusammenhänge wird in der Veröffentlichung nicht weiter eingegangen. Dieser Ansatz ist jedoch im Gegensatz zu den bisher bekannten umfassender. Er berücksichtigt verschiedene, parallel ablaufende Prozesse, die einen Ausfall erzeugen können. Der Ansatz bietet zumindest die Möglichkeit eines phänomenologischen Vorgehens, basierend auf physikalischen Zusammenhängen. Das hier angewendete Vorgehen entspricht im Ansatz dem, welches auch in dieser Arbeit vorgeschlagen wird.

Die besondere Charakteristik der Beanspruchung im Dieselmotor und deren unbekannte Ausfallbilder werden bisher nur in [74] berücksichtigt.