

1. EINLEITUNG

Die Komplexität von Personenkraftwagen (Pkw) wird bestimmt über die spezifischen Kundenanforderungen. Umfragen zu Kaufkriterien von Kunden ergeben, dass neben der Sicherheit (95 %) und Zuverlässigkeit (93 %) auch das Fahrverhalten (81 %), sowie der Fahrkomfort (62 %), als besonders wichtig angesehen werden [BS11]. Aus den spezifischen Kundenanforderungen leiten sich die funktionalen Anforderungen an das Gesamtfahrzeug, deren Subsysteme und Komponenten, ab. Ein Teil dieser funktionalen Anforderungen beschäftigt sich mit Schwingungsphänomenen im Gesamtfahrzeug. Das Auftreten jener Schwingungsphänomene ist in der Regel das Resultat von Koppelschwingungen der Fahrzeugkomponenten. Diese können explizit erwünscht sein, wie z.B. Koppelschwingungen der Abgasanlage zum aktiven Sounddesign des Motors oder Anregung der Frontscheibe zur Verbesserung des Hörerlebnisses der Soundanlage). Ein Großteil aller Schwingungsphänomene ist allerdings unerwünscht und beeinflusst unter anderem den Fahrkomfort, die Fahrdynamik und die Betriebsfestigkeit des Fahrzeuges. In Abbildung 1.1 werden die wichtigsten Schwingungsphänomene anhand des Frequenzbereiches nach [EG17], [Ang17], [MW14], [SHB10] und [Zel12] mit der Einteilung in Gesamtfahrzeug/Karosserie, Fahrwerk und Antriebsstrang dargestellt.

Die gezeigten Schwingungsphänomene können je nach Ausprägung für die Insassen als unangenehm empfunden werden, da die angeregte niedrige Schwingfrequenz im Bereich der Kopf-, Gliedmaßen- und Magenresonanz von 5-10 Hz [BS11] liegt. Beispiele hierfür sind das Karosseriezittern und Sitzreiten. Für den Menschen resultiert daraus ein Unwohlsein bis hin zu Übelkeit. Ebenso unangenehm werden Vibrationen empfunden, die durch Körperschallübertragung vom Fahrzeug zu den Berührungspunkten mit den Insassen (z.B. Lenkrad) geleitet werden. Bekannte Vertreter dieser körperschallinduzierten Störschwingungen sind Lenkraddreherschwingungen und Leerlaufvibrationen des Aggregates. Besonders kundenrelevant ist die Minimierung von hörbaren Schwingungen. So können Abrollgeräusche des Reifens und Geräusche der Abgasanlage als störend empfunden werden.

Neben dem durch den Insassen wahrnehmbaren Anteil der Schwingungen gibt es bei einigen Phänomenen auch massive zyklische Belastungen von Bauteilen als Folge der Schwingungserregung. Diese führen zur Minderung der Lebensdauer und können bei mangelnder Ursachenbekämpfung zum frühzeitigen Versagen der Bauteile führen. Im Fahrwerk entstehen, z.B. beim Bremsen auf unebener Fahrbahn (sog. Bremsstempeln), hohe Lasten in den Fahrwerkslenkern und Hinterachsträgerlagern. Deren Auswirkungen können neben Verformung und Bruch von Fahrwerksbauteilen auch Verformungen an der Karosserie sein. Ein damit verwandtes Phänomen ist das Anfahrstempeln. Charakteristisch sind hierbei zyklische Lastschwankungen der Abtriebswellenmomente und hohe Lasten in den Aggregatlagern. Die folgenden Abschnitte beschreiben das Phänomen Anfahrstempeln anhand der Kundenwahrnehmung und geben einen Überblick zum Stand der Technik. Ausgehend davon werden offene Forschungsschwerpunkte identifiziert und in Form von Forschungsfragen und methodischen Lösungsansätzen beschrieben.

1. Einleitung

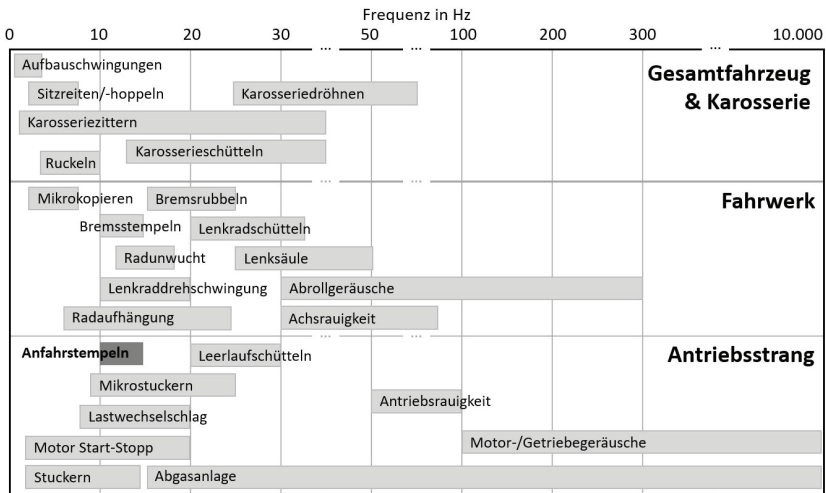


Abb. 1.1.: Überblick über die Einteilung von Schwingungsphänomenen im Pkw nach [EG17], [Ang17], [MW14], [SHB10] und [Zel12]

1.1. PROBLEMSTELLUNG UND RELEVANZ

Anfahrstempeln wird vom Kunden in speziellen Anfahrtsituationen wahrgenommen. In der Regel treten Anfahrstempelschwingungen bei starken Beschleunigungsvorgängen aus niedriger Geschwindigkeit, bzw. Stillstand, und bei niedriger Gangstufe auf. Besonders ausgeprägt sind diese Schwingungen auf feuchter Straße. Auf trockener Straße tritt Anfahrstempeln ebenfalls auf, allerdings ist die Auftrittshäufigkeit geringer. Subjektiv verschlechtert sich während des Stempelns unabhängig vom Feuchtigkeitsgrad der Straße die Beschleunigungsperformance des Fahrzeuges.

Dieses Schwingungsphänomen ist in vielerlei Hinsicht bei der kundengerechten Auslegung eines Fahrzeuges relevant. Zum einen nimmt der Insasse akustisch ein zyklisches Schlagen bei Fahrzeugen mit Frontantrieb, lokalisiert an der Vorderachse, verbunden mit Vibrationen am Sitz und Lenkrad wahr. Zum anderen können Schäden an den Aggregatlagern entstehen. Hierbei kommt es zu Verformungen oder Brüchen des Lagergehäuses, zu Beschädigungen am Lagerkern, sowie Verformungen an der karosserie-seitigen Anbindung der Lager und zum Verlust von Vorspannkräften in den Lagerverschraubungen. Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, solch sicherheitsrelevante Bauteile so zu entwickeln, dass sie im Kundenbetrieb nicht ausfallen und andererseits über die Konzeptarbeit das Auftreten von solch potentiell gefährlichen Vibrationen zu verhindern, bzw. deren Ausprägung zu minimieren.

Das Anfahrstempeln tritt vorzugsweise bei Fahrzeugen mit Frontantrieb auf und ist unabhängig von der Anordnung von Motor und Getriebe (Quer- bzw. Längseinbau) beobachtbar. Heckgetriebene Fahrzeuge können ebenfalls ein Anfahrstempeln an der Hinterachse zeigen, jedoch tritt dies nur bei Fahrzeugen mit sehr hohem Motordrehmoment auf. Bei Allradfahrzeugen ist ein Stempeln bisher nicht beobachtet worden.

Die Reaktion des Fahrers auf solch ein Ereignis ist in der Regel die abrupte Motormomentenreduktion durch Lösen des Fahrpedals, woraufhin die Stempelschwingung sofort abklingt. Ausführungen anderer Autoren zur phänomenologischen und mechanischen Beschreibung finden sich in folgendem Abschnitt.

1.2. STAND DER TECHNIK

Das Schwingungsphänomen Anfahrstempeln ist seit den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts aus Veröffentlichungen bekannt und vielfältig untersucht worden. In der Literatur haben sich auch andere Bezeichnungen etabliert, bzw. im Sprachgebrauch der Fahrzeughersteller entwickelt. In [EM08] werden „Antriebsstempeln“, „Anfahrtrattern“ oder „Anfahrradspringen“ als entsprechende Synonyme genannt. Im englischsprachigen Raum wird der Effekt als „Power Hop“ oder „Wheel Hop“ bezeichnet. Nach Analyse bereits bestehender Literatur wird eine Unterteilung nach den Mechanismen für die Entstehung der Stempelschwingung und deren Rückkopplungseffekt auf das Gesamtfahrzeug vorgenommen. Ergänzt wird die Darstellung des aktuellen Wissensstandes um die Einflussgrößen und Stellhebel auf die Entstehung und Ausprägung der Stempelschwingung. Eine Zusammenfassung zum Stand der Technik wird in folgenden Abschnitten vorgestellt.

1.2.1. ENTSTEHUNG EINER STEPELSCHWINGUNG

Im Jahr 1988 erfolgt in [HaH88] die Einordnung des Phänomens als selbsterregte Schwingung. Die angefachte Schwingung entsteht am angetriebenen Rad und wirkt über die Radaufhängung auf die Karosserie, sowie über den Antriebsstrang auf den Motor und die Aggregatelagerung. Das Anfahrstempeln tritt nach [HaH88] vorzugsweise bei frontangetriebenen Fahrzeugen während eines Beschleunigungsvorgangs mit hohen Motormomenten auf. Leistungsstarke heckgetriebene Fahrzeuge können laut dieses Autors das Phänomen ebenfalls zeigen.

Bei speziellen Fahrbahn-Reifen-Kombinationen bilden sich beim Anfahren nach Erreichen der Schlupfgrenze Stick-Slip-Drehschwingungen der Räder aus. Als Ursache der Selbsterregung wird der Abfall der Reibkennlinien der Reifen bei zunehmender Gleitgeschwindigkeit angenommen. Die durchgeführten Studien in [HaH88] zeigen, dass nach Aufbringen eines Momentensprungs am Rad je nach Fabrikat eine stationäre Schwingung entsteht. Dies lässt sich nur durch Vorhandensein einer Selbsterregung erklären, an welcher das Rad maßgeblich beteiligt ist. Die Untersuchungen in [HaH88] haben zeigen können, dass die elastische Lagerung des Motors nicht die Ursache für das Problem ist. Lediglich beeinflusst die Aggregatelagerung die Auswirkung, d.h. in diesem Fall die auftretenden Beschleunigungsamplituden am Motor. Der charakteristische Frequenzbereich für Anfahrstempeln liegt zwischen 8 und 16 Hz. Das Anfahrstempeln wird als ein rein längsdynamische Selbsterregung durch den Reifen-Fahrbahn-Kontakt angenommen [HaH88].

In [EM08], [EMW09] und [Eng10] wird Anfahrstempeln aus Sicht der dynamischen Bauraumuntersuchung des Aggregates betrachtet. Neben den erhöhten Belastungen der Bauteile und der Fahrkomfortreduzierung führt Anfahrstempeln laut der Autoren zu einem deutlich erhöhten Aggregatbauraumbedarf. Zudem hat dieser Effekt einen ausgeprägten Einfluss auf die Fahrsicherheit und auf die Lebensdauer von Fahrwerk-, Aggregatelagerungs- und Karosseriebauteilen.

Das Auftreten der Antriebsstrangschwingung häuft sich bei feuchten bzw. nassen Fahrbahnbedingungen und kann sowohl bei Fahrzeugen mit manuellen, wie auch automatisierten Getrieben, beobachtet werden. Anfahrstempeln tritt bei Anfahrmanövern auf ebener Fahrbahn, sowie an Steigungen auf. Beim beschriebenen Fahrmanöver bringt der Fahrer im Stillstand des Fahrzeuges den Motor auf eine Drehzahl von ca. 3000 U/min, um dann schlagartig einzukuppeln und über die Fahrpedalstellung maximales Motormoment anzufordern. Bei Fahrzeugen mit Automatikschaltung wird aus dem Stillstand heraus maximal beschleunigt. Messungen an einem VW Golf V GTI ergaben, dass der Motor mit einer Frequenz von ca. 11 Hz und das Fahrwerk mit 23 Hz (Querlenkerbeschleunigung) schwingt. Zudem wurden starke Schwingungen des Radschlupfes zwischen 0-50 % ermittelt.

Die Zuordnung der Schwingmodi erfolgt in [EM08] anhand eines linearisierten Rotationsschwingers bestehend aus drei Drehträgheiten und drei Steifigkeiten. Die Trägheiten des Ersatzsystems sind die Ersatzträgheit des Motors, das Massenträgheitsmoment des Rades und die rotatorische Ersatzträgheit der Aufbaumasse. Es zeigte sich, dass das Ersatzsystem des Antriebsstranges eine Eigenfrequenz von zirka 11 Hz hat und die größten Auslenkungen an der Ersatzträgheit des Motors entstehen. Die Eigenfrequenz, die den Rädern zuzuordnen ist, entspricht dem Eigenmode mit der Eigenfrequenz von

1. Einleitung

etwa 23 Hz, der vor allem in den Beschleunigungssignalen der Querlenker in Fahrzeuginnenrichtung enthalten ist. Die Auswertung der Messdaten erlaubt weiterhin eine Betrachtung der Bewegungsformen der vorherrschenden Frequenzanteile. Die beiden wesentlichen Bewegungsformen sind eine ausgeprägte Nickbewegung des Aggregates mit gleichzeitiger Vertikalbewegung der Vorderachse bei 11 Hz. Die Eigenschwingungsform mit 23 Hz beinhaltet ebenfalls eine Nickbewegung des Aggregates sowie das Längspendeln der Vorderachse. Abbildung 1.2 veranschaulicht die Eigenschwingungsformen einer Power-Hop-Schwingung nach [EMW09].

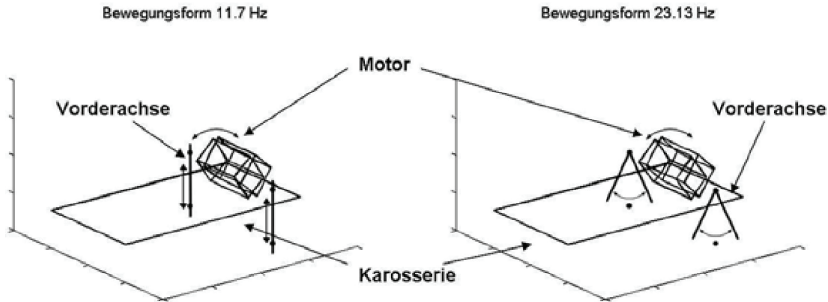


Abb. 1.2.: Bewegungsformen der gemessenen Power-Hop-Schwingungen nach [EMW09]

Der Autor aus [EMW09] bezeichnet das Schwingungsphänomen als eine durch den Reifen angefachete Schwingung von Fahrwerk und Antriebsstrang und formuliert die Annahme, dass es sich um einen Stick-Slip-Effekt des Reifens handeln könnte. Die Vermutung beruht auf der Auswertung der Messsignale und Videoaufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Es wird vom Autor darauf hingewiesen, dass für die Erregung eines Anfahrstempels zwei Anregungsmechanismen verantwortlich sein könnten. Zum einen kann es sich um eine Selbsterregung aufgrund der fallenden Reibwertkurve bei zunehmendem Gleitschlupf handeln. Andererseits gibt es mechanische Modelle, welche selbsterregte Schwingungen trotz monoton steigender Reibkennlinie ausführen. Hierbei entstehen überwiegend selbsterregte Normalkraftschwankungen. Abbildung 1.3 veranschaulicht die beiden mechanischen Ersatzmodelle der Selbsterregung.

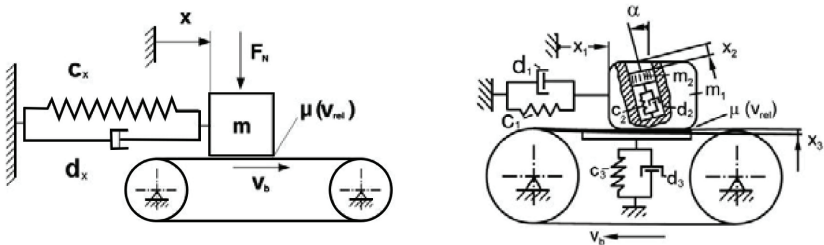


Abb. 1.3.: Ersatzmodelle zur Beschreibung selbsterregter Reibschwingungen nach [Eng10], Einmassenschwinger (links) und Mehrmassenschwinger mit induzierter Vertikalkraftschwankung (rechts), Nomenklatur vom Autor übernommen

Das Schwingensystemverhalten beim Anfahrstempeln wird vom Autor als wahrscheinlich selbsterregte Schwingung aufgrund der fallenden Reibkennlinie angenommen, aber nicht bewiesen. Aus den Ergebnissen und Beobachtungen der Fahrversuche können lediglich Indizien abgeleitet werden, die darauf hindeuten, dass es sich um die Selbsterregung aufgrund der Form und des Verlaufs der Kraftschluss-Schlupf-Beziehung des Fahrbahn-Reifen-Kontaktes handelt. In diesem Fall erhält das System seine Energie aus dem Motor. Bei Betrachtung der μ -Schlupf-Kurve wird erkennbar, dass dem

System durch das Antriebsmoment bis zum Erreichen des maximalen Haftbeiwertes Energie zugeführt wird. Mit zunehmendem Schlupf wird, aufgrund der im Allgemeinen fallenden Charakteristik, weniger Energie zugeführt. Sobald die potentielle Energie durch die Verspannung des Systems groß genug ist, um die Reibung und Dämpfung zu überwinden, wird es zu einem Rückschwingen des Reifens kommen. Die Entstehung und die resultierenden Schwingungsamplituden werden durch einen steilen Abfall der μ -Schlupf-Kurve und einem hohen Reibwertniveau bestimmt. Bei der Betrachtung des Gesamtfahrzeuges kommt hinzu, dass die potentielle Energie, die in den Elastizitäten des Antriebsstrangs und den Lagerungen gespeichert ist, bei den Stick-Slip-Schwingungen des Reifens in kinetische Energie umgewandelt wird und somit erneut einen Beitrag zum Erhalt des Systemzustandes liefert.

Der Autor unterscheidet zwischen drei verschiedenen Anregungsformen, welche in Abbildung 1.4 anhand der Relativverschiebungen Δx am Aggregat (Messpunkt 1) in x-Richtung zwischen Aggregat und Karosserie und dem Verlauf der Radgeschwindigkeiten v_{Rad} von Vorder- und Hinterachse eines VW Golf V GTI mit elektronischer Differentialsperre exemplarisch dargestellt sind [Eng10].

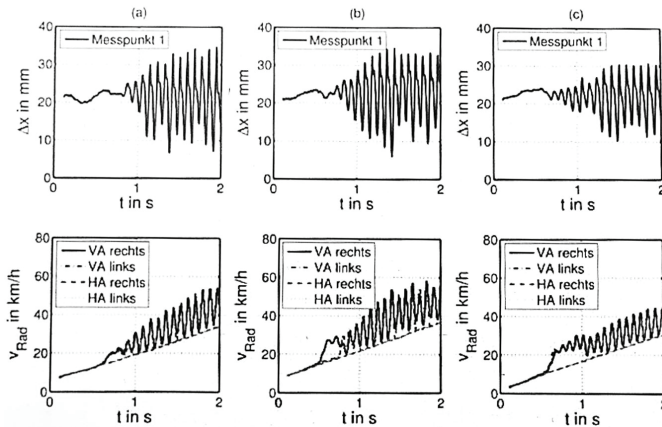


Abb. 1.4.: Verlauf der Relativverschiebung Δx in x-Richtung (Messpunkt 1) zwischen Aggregat und Karosserie, sowie die gemessenen Radgeschwindigkeit v_{Rad} nach [Eng10] zur Darstellung der unterschiedlichen Stempelverläufe eines VW Golf V GTI mit elektronische Differentialsperre

Die Form (a) zeigt ein gleichzeitiges Ansteigen der Radgeschwindigkeiten der Vorderachse. In der mittleren Spalte (b) steigen die Radgeschwindigkeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten an. Diese unterschiedlichen Geschwindigkeitsverläufe führen im Fahrzeug zu einem Eingriff der elektronischen Differentialsperre und zu einem phasengleichen Weiterschwingen der Radgeschwindigkeiten. Die dritte Anregungsform (Spalte (c)) tritt im Allgemeinen bei einem Eingriff der Antriebsschlupfregelung auf. Es kommt zunächst zu einem starken Anstieg der Raddrehzahlen. Diese führt zu einem Eingriff der Schlupfregelung und zum Einbremsen der Räder. Infolge dessen wird eine Stempelschwingung induziert.

Diese Untersuchungen zeigen, dass die Schwingungen bis zu einem bestimmten Punkt aufklingen und es anschließend zu einem Abklingen kommt. Ursachen hierfür sieht der Autor in [Eng10] zum einen im abfallenden Motormoment bei höheren Drehzahlen und zum anderen in der Tatsache, dass der negative Gradient der Schlupfkurve bei steigender Geschwindigkeit geringer wird. Die i.d.R. mit der Geschwindigkeit zunehmende Bedämpfung der Bewegung führt ebenfalls zur Steigerung der dissipierenden Energie im System. Ob nur eine dieser Ursachen das Abklingen der Schwingung verursacht, oder eine Kombination der Effekte, konnte nicht vollständig geklärt werden.

Für die Zuordnung der Stempelschwingung zu einer bestimmten Eigenschwingungsform des gesamten Schwingungssystems wurde ein vereinfachter Mehrmassen-Torsionsschwinger hinsichtlich seiner

1. Einleitung

Eigenwerte und Eigenschwingungsformen untersucht. Das vereinfachte Schwingungssystem ist mit Zuordnung der Steifigkeits- und Trägheitselementen in Abbildung 1.5 dargestellt. Die Analyse der Eigenwerte und den dazugehörigen Eigenschwingungsformen hat ergeben, dass die gemessene Frequenz der Stempelschwingungen im Fahrversuch von 11 Hz der Eigenmode der Aggregatelagerung entspricht. Die gemessene Eigenfrequenz der Räder von 23 Hz korreliert zudem mit dem ermittelten Eigenmode der Trägheit J_5 des Ersatzsystems. Der Autor in [Eng10] interpretiert die Ergebnisse des Ersatzmodells aus Abbildung 1.5 in der Form, dass er die Stempelfrequenz als Eigenfrequenz des geschlossenen Antriebsstrangs, mit der Aggregateträgheit als angeregten Masseort, ansieht.

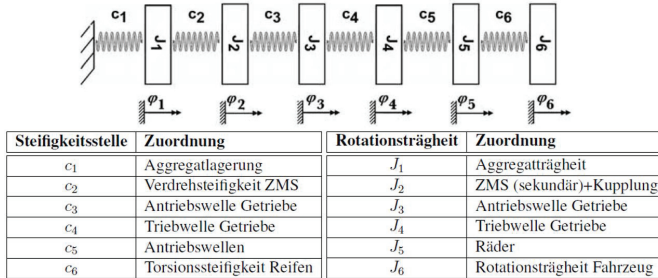


Abb. 1.5.: Vereinfachtes Schwingungssystem für die Ermittlung der Eigenwerte und Eigenschwingungsformen für die Untersuchung von Anfahrstempeln nach [Eng10]

Die Aggregatelanerung wird als die bestimmende Elastizität der Eigenschwingungsform angenommen. Es sei angemerkt, dass im Zuge der Eigenwertanalyse des Schwingungssystems ebenfalls die Auswirkung bei Variation der Steifigkeit der Motormomentenstütze in Längsrichtung empirisch untersucht wurde. Die Änderung der Steifigkeit der Motormomentenstütze hat laut Autor direkte Auswirkungen auf die Torsionssteifigkeit der Aggregatelanerung. Die Untersuchungen im Fahrversuch bei Steifigkeitsänderung der Pendelstütze führte zu keiner Verschiebung der Stempelfrequenz.

Die Charakteristik einer selbsterregten Schwingung beim Anfahrstempeln wurde ebenfalls in [SOF08] postuliert. Der Autor aus [SOF08] bezeichnet Anfahrstempeln als wahrscheinlich lokal instabile Torsionsschwingung des Antriebsstranges, verursacht durch einen Stick-Slip-Effekt des Rades. Diese tritt überwiegend bei hochmotorisierten Personen- und Lastkraftwagen bei starker Längsbeschleunigung auf. Die Anregungsfrequenz entspricht dabei der ersten torsionalen Eigenfrequenz des Antriebsstranges. Ursache ist der negative Gradient der Schlupf-Kurve zwischen Reifen und Fahrbahn. Eine allgemeine Darstellung der Schlupfkurve zeigt Abbildung 1.6a. Bei der Darstellung des Schlupfverlaufes wird angenommen, dass der Reibkoeffizient μ abhängig von der Schlupfgeschwindigkeit ist.

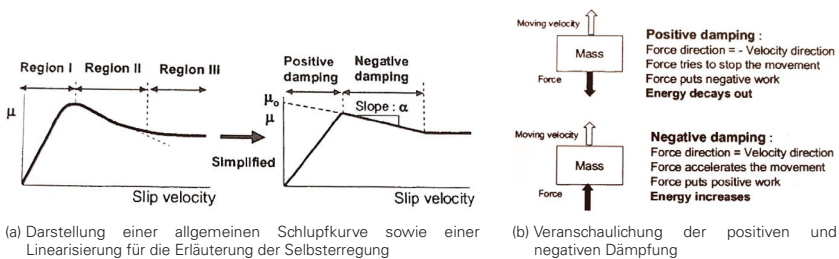


Abb. 1.6.: Verlauf der Schlupfkurve und Erläuterung zur Dämpfung für die Beschreibung der Selbsterregung nach [SOF08], Nomenklatur vom Autor übernommen

Der negative Gradient der Schlupfkurve führt zu negativer Dämpfung des Systems und wird anhand der positiven, bzw. negativen, Arbeit veranschaulicht (siehe Abbildung 1.6b). Die Kraft, die sich der Bewegung entgegenstellt, erzeugt negative Arbeit. Diese mindert die Systemenergie und wirkt wie eine positive Dämpfungskraft. Eine Kraft, welche gleichgerichtet zur Geschwindigkeit ist, erzeugt positive Arbeit. Die Systemenergie steigt, fungiert wie eine negative Dämpfungskraft und führt zur Selbsterregung. Somit ist die vom Autor vorgeschlagene Ideallösung gegen ein Anfahrstempeln das Einbringen von torsionaler Dämpfung im Antriebsstrang, um die negative Dämpfung zu kompensieren.

Der negative Gradient wird bestimmt vom Material des Reifens, dem Profildesign und dem Straßenzustand. Auf feuchten Straßen ist die Anregung einer Stempelschwingung leichter und die Schwingung ausgeprägter, da im Normalfall einer feuchten Straße der Gradient steiler wird [SOF08].

Eine Publikation aus dem Jahr 2012 [Zel12] bezeichnet das Anfahrstempeln als Koppelschwingung zwischen dem System Rad/Achse und dem Aufbau im Bereich der Radeigenfrequenz. Dabei bewegt sich das Rad beim Anfahren nach vorn oben. Verliert das Rad bei dieser Bewegung den Fahrbahnkontakt, so reißt die Längskraft am Latsch ab und das Rad schwingt wieder zurück. Durch den erneuten Fahrbahnkontakt nimmt das Rad, laut Autor, wieder Schwingungsenergie auf und wird erneut nach vorn beschleunigt. Damit führt das Rad keine reine Vertikalschwingung in z-Richtung aus, es bewegt sich vielmehr auf einer elliptischen Bahnkurve in der x-z-Ebene. Diese Schwingform wird durch Anregungen aus der Fahrbahn in z-Richtung, z.B. bei Schwellerüberfahrt, zusätzlich angefacht und kann grundsätzlich von jedem Rad alleine ausgeführt werden. Der typische Frequenzbereich liegt dabei bei 12-14 Hz.

Die Veröffentlichung [MK14] beschreibt das Anfahrstempeln ähnlich als eine zyklische, elastokinematische Bewegung der Vorderachse eines Kraftfahrzeuges. Dabei verschiebt sich die Vorderachse durch die beim Anfahrvorgang auftretenden Kräfte (in einer ersten Bewegung in einem Kontaktpunkt zwischen den Vorderrädern und der zu befahrenden Straße) aufgrund der Vortriebskraft nach vorn und oben, wodurch der maximale Kraftschluss zwischen den Vorderrädern und der Straße verringert wird. Verlieren die Vorderräder hierbei aufgrund einer überhöhten Antriebskraft gänzlich den Kraftschluss zur Straße, wird es durch eine zuvor erzeugte Vorspannung von Elastomerlagern einer Aufhängung der Vorderräder nach hinten und unten beschleunigt. Danach wiederholt sich die beschriebene Bewegung zyklisch, weshalb die Vortriebskraft um einen wachsenden Mittelwert mit ebenfalls wachsender Amplitude schwingt.

Eine rein experimentelle Untersuchung des Anfahrstempels findet sich in [EZT15]. Anhand von Fahrversuchen mit einem Messfahrzeug konnte gezeigt werden, dass sowohl die Räder, als auch die Abtriebswelle und der Motor, beim Anfahrstempeln mit der gleichen Frequenz von 11,5 Hz schwingen. Weitere Aussagen zum Entstehungsmechanismus von Anfahrstempeln finden sich in diversen Patentschriften und werden in der Folge erläutert. Anfahrstempeln wird in [TRS02] als allgemein instabiler Zustand des Antriebsstrangs bezeichnet, ausgelöst durch einen Traktionsverlust und einem Radschlupf oberhalb des optimalen Schlupfbereiches. Bei sehr hohen Motormomenten wird der Zustand aufrechterhalten, was dazu führt, dass der Antriebsstrang torsional und Fahrwerkskomponenten vertikal schwingen.

Anfahrstempeln ist nach [KM16] eine unerwünschte Bewegung der angetriebenen Räder, die dann auftritt, wenn die angetriebenen Räder wechselnd auf der Straßenoberfläche haften und gleiten. Der intermittierende Radschlupf bewirkt zwangsweise eine oszillatorische Bewegung, die gegen die Fahrzeugaufhängung wirkt und zur Vibration der Achse der Antriebsräder führt. Dieser Schwingungsmodus kann sich den Eigenfrequenzen des Fahrwerks nähern und zu einer strukturellen Resonanz führen, wodurch sich die Auslenkungen und die resultierenden Schwingungen verschlimmern.

1.2.2. RÜCKKOPPLUNGSEFFEKTE AUF DAS GESAMTFAHRZEUG

Durch die selbsterregte Schwingung des Rades kommt es in [HaH88] aufgrund von Rückkopplung über die Abtriebswellen zu starken Karosserievibrationen und ausgeprägten Starrkörperbewegungen des Motors. Durch diese Schwingungen können, neben dem Verlust an Beschleunigungsvermögen und zum Teil beträchtlichen Komforteinbußen für die Insassen, auch Schäden an der Radaufhängung und am Antriebsstrang hervorgerufen werden.

1. Einleitung

Das Stempeln ist nach [MK14] im Innenraum eines Kraftfahrzeugs deutlich zu hören und durch ein Schlagen der Vorderachse in ihren Anbindungspunkten zur Karosserie zu spüren. Die sich beim Stempeln ergebenden Schwingungen mindern zudem den Fahrkomfort. Außerdem wird durch das Stempeln ein Verschleiß im Bereich von Aufhängungslagerungen der Vorderräder erhöht, was üblicherweise auf einen ungünstigen Lastfall einer schwingenden Belastung mit großer Amplitude zurückzuführen ist. Weiterhin wird ein Abrieb der Reifen der Vorderachse erhöht, wenn der Kraftschluss verlorengeht.

In [EM08] [EMW09] [Eng10] wird beschrieben, dass Anfahrmanöver aufgrund der Pendellagerung bei einer Front-Quer-Motoranordnung zu Pendelbewegungen des Aggregates in Fahrzeuginnenrichtung führen. Neben den Belastungen auf die Aggregatelagerung kommt es zu Lastüberhöhungen an den Abtriebswellen, da die Wellen neben dem Antriebsmoment noch zusätzlich durch das Trägheitsmoment des pendelnden Motors stark dynamisch belastet werden. Die starke Schwingung des Aggregates beeinflusst zudem den Verbrennungsprozess im Motor.

An der Vorderachse regen bei Fahrzeugen mit Frontantrieb gemäß [Zel12] Radschwingungen den kompletten elastisch gelagerten Antriebsstrang zu Koppelschwingungen an. Das Anfahrstempeln ist daher insbesondere bei Fahrzeugen mit Frontantrieb relevant. Im Resonanzbereich können Schwingungsamplituden so groß werden, dass die Gummilager der elastischen Lagerungen anschlagen. Dadurch verlieren diese nicht nur ihre Elastizität, sondern auch ihre dämpfenden Eigenschaften. Die Längselastizität wird in diesem Fall überwiegend durch die Nachgiebigkeit der Karosserie in der Lageraufnahme bestimmt. Die diesem Arbeitspunkt mindert sich die dämpfende Wirkung der Radführung. Bei ungenügender Dämpfung kann sich der Vorgang soweit aufschaukeln, dass nicht nur unangenehme Vibrationen hervorgerufen werden, sondern auch die Betriebsfestigkeit der Lagerungskomponenten ernsthaft gefährdet ist.

1.2.3. EINFLUSSGRÖSSEN AUF DIE STEPELSCHWINGUNG

Die in der Literatur genannten Einflussgrößen und Stellhebel zur Beeinflussung der Stempelschwingung werden im Folgenden zusammengefasst und geclustert nach Räder/Reifen, Fahrwerk, Antriebsstrang und Aggregatelagerung.

Räder/Reifen Bei der Auswahl von Reifen gilt, je kleiner der Abfall der Reibungskennlinie bei zunehmender Gleitgeschwindigkeit, desto geringer wird die Ausprägung der Schwingungen beim Anfahrstempeln [HaH88]. Der Reifenfahrbahnkontakt wird charakterisiert über das Schlupfverhalten. Eine feuchte Straße initiiert schneller ein Anfahrstempeln, da der negative Gradient der Schlupfkurve steiler wird [SOF08]. Aus [SOF08] ist ebenfalls bekannt, dass Winterreifen weniger zum Anfahrstempeln neigen, da der Reifenaufbau im Vergleich zum Sommerreifen zu einem geringeren Schlupfgradienten führt.

In der Literatur wurde ebenfalls der Einfluss der Radlast betrachtet. Es zeigt sich, dass Versuche mit geringer Radlast keine Raddreherschwingungen erzeugen. Mit zunehmender Radlast wird das System stärker angefacht. Je nach Reifen entstehen erst ab einer gewissen Grenzlast Schwingungen, die mit zunehmender Radlast stärker werden [HaH88].

In [Eng10] wird der Einfluss des Radlastverlaufes am Prüfstand untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass das Lastniveau sowie niederfrequente zyklische Radlastschwankungen keinen Einfluss auf die Entstehung einer Stempelschwingung haben.

Der Reifenfülldruck beeinflusst ebenfalls das Stempelverhalten. Je niedriger der Innendruck, desto geringer ist der Abfall der Schlupfkurve und folglich weniger stark ausgeprägt sind die Stempelschwingungen. Konträr dazu verhalten sich High-Performance-Reifen, da der Gradient der Schlupfkurve dieses Reifentypes steiler als von einem Standardreifen ist [SOF08]. Der Einfluss des Reifenfülldruckes wurde in [EZT15] anhand von Fahrversuchen eingehend untersucht. Die Auswirkungen sind grundsätzlich sehr gering und zudem nichtlinear. Es lässt sich keine verallgemeinerte Aussage formulieren.

In [Eng10] wurde empirisch nachgewiesen, dass der Fülldruck des Reifens keinen signifikanten Einfluss auf das Schwingensystem hat. Bei Variation des Fahrbahnbelages zwischen Beton und Asphalt konnten Veränderungen auf das Schlupfverhalten nachgewiesen werden. Die Asphaltoberfläche führte zum Anstieg der Schlupfsteifigkeit und zu einem steilerem Gradient im Bereich des Gleitens. Diese Aussage

wird in [ABZ16] ebenfalls bestätigt. Auf beiden Oberflächen kam es zum Anfahrstempeln, wobei die Stempelschwingungen auf Asphalt ausgeprägter waren.

Die Bewegungsform des Rades bezüglich der Karosserie wurde experimentell in [EZT15] untersucht. Über Linearpotentiometer, zwischen Radmitte und der Karosserie in vertikaler Richtung, wurde die Radbewegung aufgezeichnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bewegung des Rades während des Stempelns parallel zur Bewegung der Karosserie ist. Die gemessenen Amplituden sind extrem gering und führen zum Schluss, dass keine signifikante Bewegung des Rades in Vertikalrichtung stattfindet. Die gleiche Aussage, dass die Vertikalbewegung von Rad und Fahrwerk vernachlässigbar ist, bestätigt [KGP16]. In der gleichen Versuchsreihe wurde zudem der Einfluss der Straßenbedingungen hinsichtlich Feuchtigkeit untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Anfahrstempeln auf nassem Beton ausgeprägter und länger stattfindet als auf trockenem Beton. Die Schwingfrequenz bleibt dabei unverändert. Bei extrem niedrigem Reibwert hingegen findet nur kurz ein Stempeln mit geringer Amplitude statt, bevor die Räder letztlich komplett durchdrehen.

Fahrwerk Eine Lastminderung beim Anfahrstempeln kann nach [HaH88] durch Erhöhung von Dämpfung der Längsbewegung des Rades im Radkasten erreicht werden. Zudem führt eine Verringerung des Anfahrnickausgleiches bei frontgetriebenen Fahrzeugen, bzw. Erhöhung bei heckgetriebenen Fahrzeugen, ebenfalls zu reduzierten Lasten.

Der serienmäßige Einsatz von längsdynamischen Fahrerassistenzsystemen, wie dem ASR (Antriebschlupfregelung) verhindert das Auftreten des Ereignisses nicht vollständig. Unter Umständen können Schwingungen durch Eingriffe des Assistenzsystems angeregt werden. [EM08] [Eng10].

Als weiterer Stellhebel wird die Bedämpfung der Vertikalbewegung des Rades bezüglich der Karosserie für die Stabilisierung eines Fahrzeugs während des Stempelns in [Moh18] angeführt. Dies wird durch die aktive Regelung des Stoßdämpfers durch Erhöhung der Dämpfungskraft erreicht. Als Fazit aus den getätigten Untersuchungen sieht der Autor aus [EZT15] das meiste Potential für die Reduzierung der Intensität von Anfahrstempelschwingungen in einer anwendungsbezogenen Schlupfregelung. Optimierte Regelsysteme zur Lastreduktion, welche die Frequenz beim Anfahrstempeln erkennen und gezielte Eingriffe vornehmen, werden als zielführend und kostengünstig angesehen. Im Bezug auf Schlupfregelsysteme wird in [KGP16] angemerkt, dass der Raddrehzahlsensor für die Detektion von Anfahrstempeln erst oberhalb einer gewissen Geschwindigkeitsschwelle zuverlässig als Regelgröße verwendet werden kann. Bei Anfahrstempeln im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ist die Sensorinformation möglicherweise nicht brauchbar und eine Regelung basierend auf den Sensordaten somit nicht möglich.

Eine konventionelle Antriebsschlupfregelung (ASR) kann nach [MK14] aufgrund eines ihr zugrunde liegenden Reglerkonzeptes keinen kritischen Schlupf detektieren. Der zeitlicher Verlauf des Schlupfs während des Stempelns unterscheidet sich zu stark von einem ansonsten auftretenden Schlupf, der zu einem regulären Eingriff der Antriebsschlupfregelung führt.

Eine Möglichkeit ein Anfahrstempeln vor seiner Entstehung zu unterbinden bzw. zur Reduktion der Stempelasten bei bereits induzierter Schwingung sieht [KM16] in der Applikation von geregelten Bremsengriffen. Über diverse Sensoren des Fahrzeuges wird der Schlupfzustand der Räder detektiert und entsprechend der Fahrsituation ein Bremsengriff eingeleitet.

Antriebsstrang Die Energiequelle für das System bildet nach [Eng10] das Motormoment. Für die Ausprägung der Schwingung ist es nicht von Bedeutung, ein möglichst hohes Motormoment anliegen zu haben, vielmehr sind die Amplituden der Raddrehschwingung dann maximal, wenn das Moment gerade groß genug war, um das Rad zum Durchdrehen zu bringen. Die Einbringung von Dämpfung im Antriebsstrang wird Schwingungen beim Anfahrstempeln vermindern [HaH88] [SOF08]. Dies erklärt, warum Fahrzeuge mit Automatikgetrieben weniger starke Stempelschwingungen zeigen. Der Drehmomentwandler wirkt wie ein Torsionsdämpfer der Schwingung entgegen [SOF08]. Auch das Einbringen von Dämpfungselementen oder zusätzlichen Schwungrädern in den Antriebsstrang wird in [TRS02] vorgeschlagen. Durch Verbau einer Gummikupplung in die Antriebswelle könnte der Einfluss der Dämpfung genauer untersucht werden. Es zeigt sich das typische Verhalten eines gedämpften mechanischen Systems bei Aufbringen eines Momentensprunges. Die Schwingungsamplitude der

1. Einleitung

Radgeschwindigkeit erreicht ihr Maximum sofort nach dem Sprung. Nach einigen Zyklen ist die Schwingung jedoch bereits abgedämpft.

Eine Änderung der Abtriebswellensteifigkeit verschiebt die Frequenz der Anfahrstempelschwingung [HaH88]. Als eine technische Lösungen zur Unterbindung von Anfahrstempeln wird in [TRS02] der Einsatz von steiferen Abtriebswellen genannt.

In [McC15] wird ein Fahrzeug vorgestellt, welches asymmetrische Torsionssteifigkeiten der linken und rechten Abtriebswellen aufweist. Die Steifigkeit der Abtriebswelle der einen Seite ist dabei mehr als doppelt so groß wie jene der anderen Seite. Damit wird beabsichtigt, die Stempelschwingung der beiden Räder außer Phase zu bekommen. Im Fall der asymmetrischen Schwingung wird eine Kupplung im verbauten Differential eingesetzt, um die Energie zu dissipieren. Die gleiche Aussage der Lastminderung bei Verbau asymmetrischer Torsionssteifigkeiten zeigt [ABZ16] anhand Fahrversuchsdaten. Die größte Lastreduktion auf die Aggregatelager und die Abtriebswellenmomente werden bei der größten Asymmetrie von $V_{asym} = \frac{c_{ATW,l}}{c_{ATW,r}} = 1,81$ gemessen.

Details zu Bauteilausführungen und deren Einfluss auf die Lastminderung bei Verbau asymmetrischer Abtriebswellen finden sich unter anderem in den Patentschriften [Mic11b] und [Mic11a].

Der Unterschied im Anfahrstempeln zwischen front- und heckgetriebenen Fahrzeugen wird in [EZT15] untersucht. Der Hauptunterschied zwischen diesen beiden Fahrzeugtypen ist die Schwingfrequenz des Stempels. Während das untersuchte frontgetriebene Fahrzeug bei 11,5 Hz stempelt, verringert sich diese Frequenz beim untersuchten heckgetriebenen Fahrzeug auf 6,1 Hz. Als Ursache dafür wird die unterschiedliche Eigenfrequenz des Antriebsstrangs angegeben. Aufgrund der torsionsweichen Kardanwelle bei heckgetriebenen Fahrzeugen ist die Eigenfrequenz im Antriebsstrang niedriger.

Neben der angetriebenen Achse wird auch der Verbau des Aggregates empirisch betrachtet. Vergleichsfahrten zwischen frontgetriebenen Fahrzeugen mit längs oder quer eingebautem Motor zeigen, dass die grundsätzliche Charakteristik des Stempels vergleichbar ist, jedoch sind die Amplituden beim Fahrzeug mit Längseinbau etwas gestiegen, sowie die Stempelfrequenz von 11,5 Hz auf 8,1 Hz gesunken.

Ein zusätzlich untersuchtes Allrad-Fahrzeug hat weder auf nassem, noch auf trockenem Beton ein Stempeln gezeigt. Dies wird durch die zu geringe Antriebskraft pro Rad erklärt, welche sich bei Allradfahrzeugen statt auf zwei Räder, auf vier Räder aufteilt.

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Betrachtung des Fahrzeugdifferentials. Nach [NS16] wird der Einsatz einer elektronischen Differentialsperre als Möglichkeit zur Unterbindung von Anfahrstempeln als zielführend angenommen. Bei Detektion eines möglichen Anfahrstempels oder eines bereits induzierten Anfahrstempels regelt die elektronische Differentialsperre Momentenimpulse zwischen den beiden Abtriebsseiten.

In [ABZ16] wird die Lage des Gesamtfahrzeugschwerpunktes als Einflussgröße diskutiert. Aufgrund der dynamischen Achsentlastung neigen Fahrzeuge mit hohem Schwerpunkt eher zum Anfahrstempeln.

Aggregatelagerung Durch eine angepasst Aggregatelagerung können die Schwingungen nicht verhindert, jedoch kann auf die Schwingamplituden großer Einfluss ausgeübt werden [HaH88]. Wichtige Einflussparameter auf das Stempeln sind die Lagerkennung (Steifigkeit, Dämpfung, Spalt) und Anbindeungssteifigkeit der Karosserie, jeweils in x-Richtung [Zel12].

In [Eng10] wurde bei einem frontgetriebenen Fahrzeug, mit 3-Punkt-Pendellagerung des Aggregates, die Lagerkennung der Motormomentenstütze variiert und die Auswirkungen auf das Anfahrstempeln untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Komfortempfinden bei steiferer Motormomentenstütze deutlich verschlechtert. Die Versteifung der Motormomentenstütze in Längsrichtung führt dabei zu geringerer Aggregatbewegung bei gleichbleibender Stempelfrequenz. Die geringeren Beschleunigungen am Aggregat werden durch die Verlagerung der Rollachse des Aggregates, hin zur versteiften Pendelstützenanbindung, verursacht.

Untersuchungen zu Lagerkennungen der Aggregatelagerung wurden in [SOF08] durchgeführt. Die bestmögliche Kombination der untersuchten Lagervarianten ist eine Motormomentenstütze mit verändertem progressivem Verformungsverhalten und ein Motorlager mit aufgedickten Lageranschlängen in Längsrichtung. Damit werden die Lasten der Lager reduziert, jedoch wird dadurch die akustische Wahrnehmung des Stempels für den Fahrer deutlicher.