

2 Grundlagen

2.1 Unterscheidung von Hybridtopologien

Damit von einem Hybridantrieb gesprochen werden kann, müssen nach SAE-Standard J1711 zwei unterschiedliche Energiewandler sowie zwei unterschiedliche Energiespeicher vorliegen [1]. Bei den heute gängigen Hybridfahrzeugen sind das ein Verbrennungsmotor (VM) mit Kraftstofftank und eine Elektromaschine (EM) mit Batterie. Es sind aber auch Anwendungen bekannt, bei denen Brennstoffzellen statt eines VM eingesetzt werden [2].

Häufig genutzte Unterscheidungsmerkmale der Hybridantriebe sind zum einen Anzahl und Anordnung der EM und zum anderen die Kapazität der Batterie. Beide Faktoren haben einen großen Einfluss darauf, welche Betriebszustände in welchem Ausmaß darstellbar sind. Als Beispiele seien die Fähigkeit, rein elektrisch zu fahren sowie das Potenzial der Nutzung von Bremsenergie genannt.

Nachfolgend werden die wichtigsten Topologien vorgestellt. Zuvor soll jedoch noch darauf aufmerksam gemacht werden, dass es in der Fachwelt sehr unterschiedliche Systematiken zur Bezeichnung der einzelnen Strukturen gibt. Lediglich die Einteilung in „seriell“, „parallel“ und „leistungsverzweigt“ kann als allgemeingültig angesehen werden. Weitere Einteilungen dieser Gruppen sind hingegen nicht einheitlich.

2.1.1 Serieller Hybridantrieb

Beim seriellen Hybridantrieb ist der VM nicht direkt mit den Rädern verbunden. Er wird stattdessen zum Antreiben eines Generators verwendet, während eine zweite EM die Räder antreibt [3], **Bild 2.1**. Der Einsatz eines Schaltgetriebes ist bei diesem Konzept optional [4].

Die fehlende mechanische Verbindung zwischen VM und Antriebswelle hat zwei wesentliche Konsequenzen. Zum einen wird das Fahrzeug immer

elektrisch angetrieben. Zum anderen kann der Betriebspunkt des VM vom Fahrzustand entkoppelt werden. Auch muss der VM im Bremsbetrieb nicht mitgeschleppt werden, wodurch das Rekuperationspotenzial deutlich erhöht wird [5].

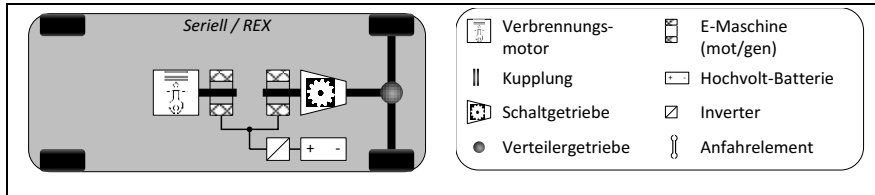


Bild 2.1: Serieller Hybridantrieb (schematisch)

nach [5] [6]

2.1.2 Paralleler Hybridantrieb

Ein paralleler Hybridantrieb bietet die Möglichkeit, die Räder nicht nur mit dem VM sondern auch mit der EM anzutreiben [3]. Die weitere Unterteilung erfolgt nach unterschiedlichen Kriterien.

So unterscheidet z. B. Kirchner in [3] zunächst die Art, wie die Leistungen von VM und EM überlagert werden. Anschließend wird die Anordnung der Energiewandler für eine weitere Differenzierung herangezogen.

Im Gegensatz dazu orientieren sich die Bezeichnungen „P1“, „P2“, „P3“ und „P4“ am Aufbau des Triebstranges. Die vier Varianten unterscheiden sich durch die Position der EM sowie die Existenz einer Trennkupplung zwischen VM und EM [7]. Mitunter werden für die P1- bzw. P2-Hybride auch die Begriffe „mild“ oder „strong“ verwendet [8].

Nachteilig an dieser Logik ist, dass sich damit nicht alle Parallel-Topologien erfassen lassen. Darüber hinaus ist nicht immer sofort klar, welche Topologie sich hinter der Bezeichnung verbirgt. Daher haben sich für spezielle Strukturen auch andere Bezeichnungen etabliert. So wird der P4-Hybrid häufig auch als „Axle-Split“ [9] oder „Through-the-Road-Hybrid“ [10] bezeichnet.

Nachfolgend werden ausgewählte Parallel-Topologien mit den Bezeichnungen vorgestellt, wie sie in der vorliegenden Abhandlung verwendet werden.

P1-Hybrid

Beim P1-Hybrid ist die EM am Kurbelwellenausgang des VM angeordnet [6], **Bild 2.2**. Da es bei diesem Typ keine Trennkupplung zwischen den beiden Antriebsmaschinen gibt, sind diese immer miteinander verbunden. Für den rein elektrischen Betrieb und die Rekuperation heißt das, dass der VM mitgeschleppt werden muss [11]. Um die Energiebilanz in beiden Betriebszuständen zu verbessern, muss also das Schleppmoment reduziert werden.

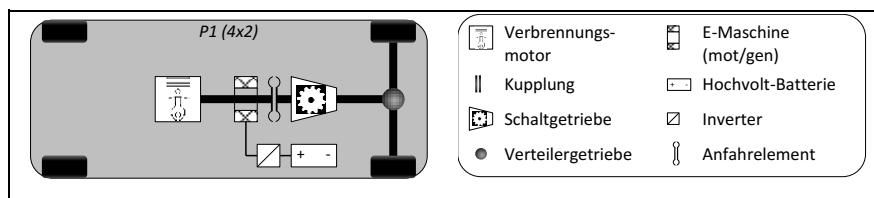


Bild 2.2: P1-Hybrid (schematisch)

nach [5] [6]

P2-Hybrid

Dem gegenüber ist der P2-Hybrid durch eben jene Trennkupplung zwischen dem VM und der EM gekennzeichnet, **Bild 2.3**.

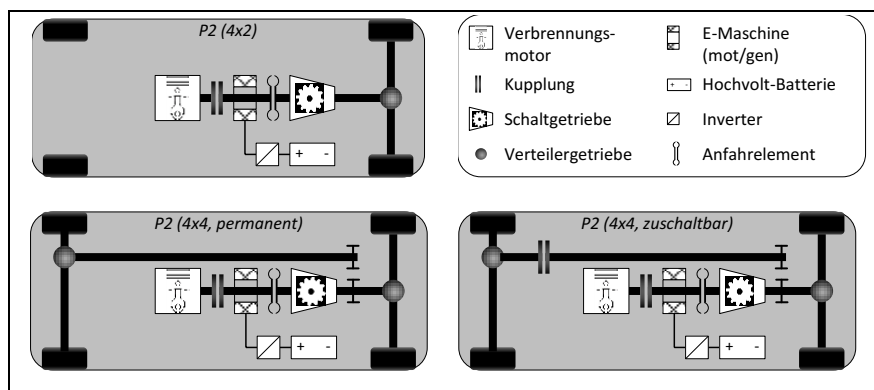


Bild 2.3: P2-Hybrid in 4x2- und 4x4-Ausführung (schematisch)

nach [5] [6]

Die EM sitzt am Getriebeeingang und fungiert im Falle einer geöffneten Trennkupplung als alleinige Antriebsmaschine [6]. Der ActiveHybrid 5 von BMW verfügt über eine solche Topologie [12].

Es gilt zu beachten, dass die konkrete Ausführung des Schaltgetriebes nicht von Bedeutung ist. Manuelle Getriebe können ebenso verbaut werden wie Planeten-Automatgetriebe oder Doppelkupplungsgetriebe.

P3-Hybrid

Beim P3-Hybrid ist die EM um eine weitere Position im Antriebsstrang nach hinten gerutscht und sitzt jetzt am Getriebeausgang [6], **Bild 2.4**.

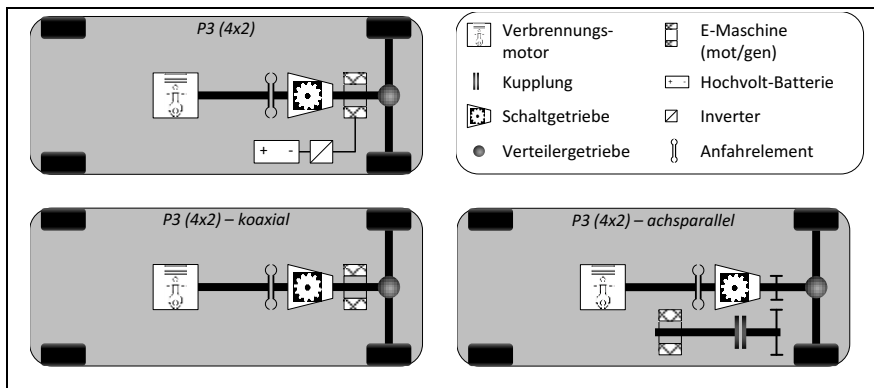


Bild 2.4: P3-Hybrid mit verschiedenen EM-Anbindungen (schematisch) nach [5] [6]

Auch hier spielt die Getriebebauart keine Rolle. Allerdings ist die EM an dieser Stelle des Triebstranges deutlich höheren Drehzahlen ausgesetzt. Aus diesem Grund wird sie häufig nicht koaxial, sondern achsparallel angebunden. Die jetzt vorhandene Übersetzung bietet die Möglichkeit, das Drehzahl-niveau der EM spürbar zu senken. Bei Bedarf kann zusätzlich eine Trennkupplung verbaut werden, mit der die EM bei zu hohen Drehzahlen vom restlichen Antriebsstrang getrennt wird.

In **Bild 2.6** sind exemplarisch die Leistungsflüsse für zwei Szenarien dargestellt. Im ersten Beispiel ist der vierte Fahrgang eingelegt. Die Momentenaddition findet am Losrad des vierten Ganges statt. Der „Final Drive 2“ (FD2) muss also das Summenmoment übertragen.

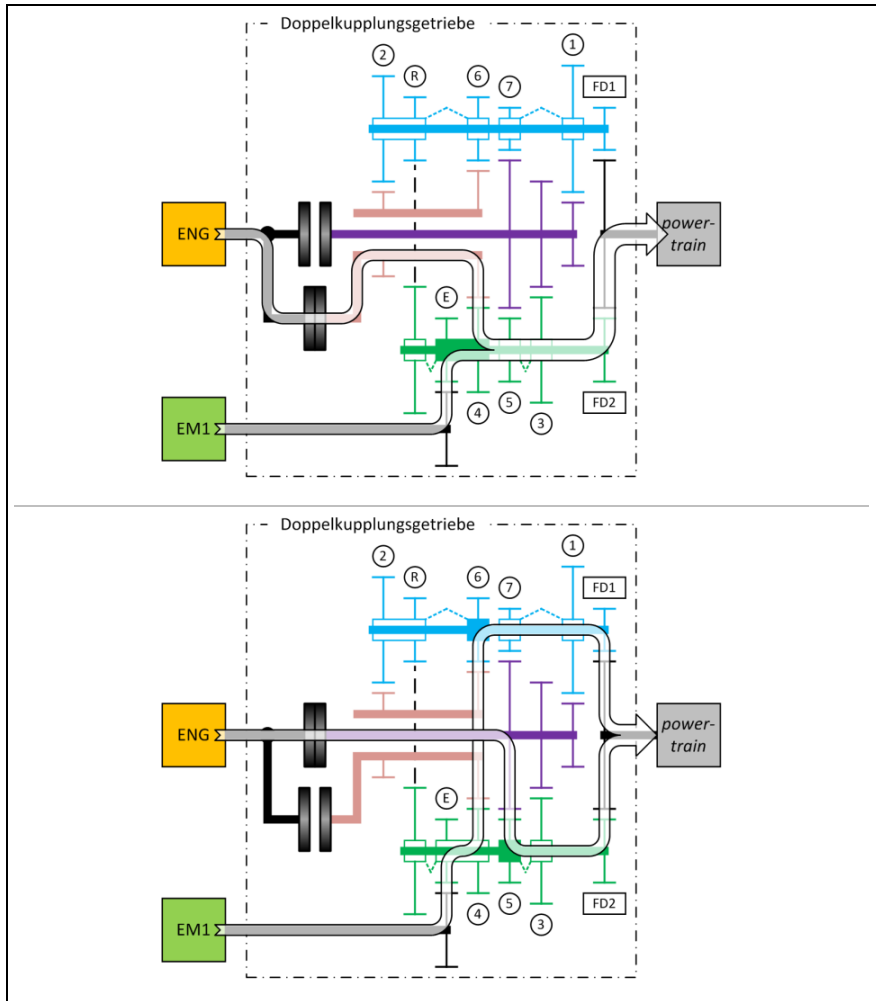


Bild 2.6: Ausgewählte Leistungsflüsse in einem hybridisierten Doppelkupplungsgetriebe

modifiziert
nach [13]

Im zweiten Beispiel ist der fünfte Fahrgang eingelegt. Das von der EM eingeleitete Moment wird zunächst in Schubrichtung über den vierten Gang und weiter in Zugrichtung über den sechsten Gang übertragen. Damit überträgt der FD1 das „elektrische“ Moment, während der FD2 das verbrennungsmotorische Moment überträgt. Erst am Getriebeausgang werden die beiden Momente zusammengeführt.

Axle-Split

Für die Topologie, bei der der VM das eine Radpaar und die EM das andere Radpaar antreibt, wird hier der Begriff „Axle-Split“ (AS) verwendet. Diese Bezeichnung verdeutlicht sofort die Besonderheit dieser Ausführung, was bei Begriffen wie „P4“ oder „Through-the-Road“ nicht der Fall ist. Der Aufbau eines AS-Hybridantriebs ist in **Bild 2.7** dargestellt.

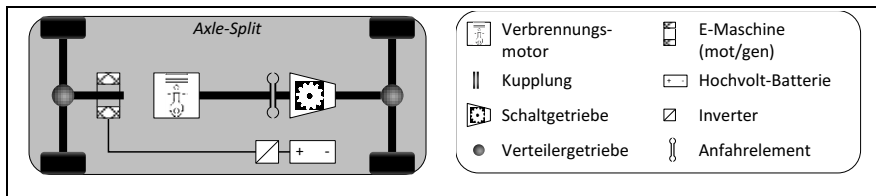


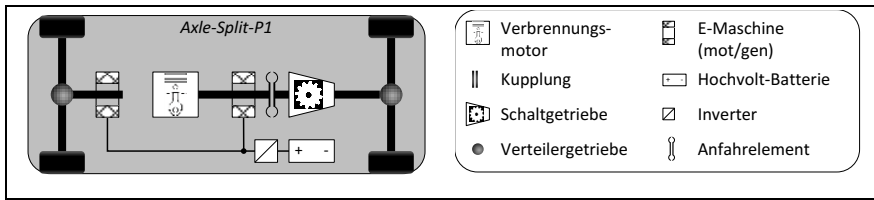
Bild 2.7: Axle-Split-Hybrid (schematisch)

nach [5] [6]

Erwähnenswert ist, dass bei AS-Hybriden keine Addition von Momenten im Antriebsstrang erfolgt. Vielmehr addieren sich die Zugkräfte, die von den beiden Teil-Triebsträngen an den Radpaaren erzeugt werden. Ein Vertreter dieser Topologie ist der Peugeot 508 RXH [15].

Axle-Split-P1

Wird das eine Radpaar nicht rein verbrennungsmotorisch, sondern durch einen P1-Hybrid angetrieben, wird die Bezeichnung „Axle-Split-P1“ (AS-P1) verwendet, **Bild 2.8**.

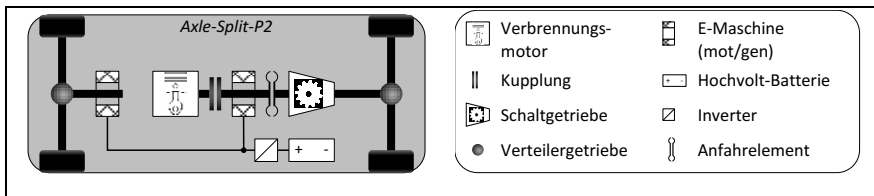
**Bild 2.8:** Axle-Split-P1-Hybrid (schematisch)

nach [5] [6]

Arbeitet die EM im hybriden Teil-Triebstrang motorisch, findet hier eine Momentenaddition statt. Zusätzlich kommt es wie beim AS-Hybrid zu einer Zugkraftaddition.

Axle-Split-P2

Die bereits beschriebene Erweiterung des P1-Hybrids um eine Trennkupplung ist natürlich auch bei der der AS-Variante möglich und führt zum AS-P2-Hybrid, **Bild 2.9**. Ein aktuelles Fahrzeug mit dieser Topologie ist der Porsche 918 Spyder [16].

**Bild 2.9:** Axle-Split-P2-Hybrid (schematisch)

nach [5] [6]

Bei allen drei vorgestellten Axle-Split-Hybriden können alle Getriebearten verbaut werden.

2.1.3 Leistungsverzweigter Hybridantrieb

Durch die Kombination eines seriellen und eines parallelen Hybridantriebes entsteht ein Mischhybrid, **Bild 2.10**.

Die Leistung des VM wird dabei auf einen mechanischen und einen elektrischen Zweig aufgeteilt [11], woher das Konzept auch seinen Namen hat. Diese Aufteilung kann z. B. mit Hilfe eines Planetengetriebes realisiert werden. Dieser Getriebetyp verfügt über eine Eingangs- und zwei Ausgangswellen, wobei der VM die Eingangswelle antreibt.

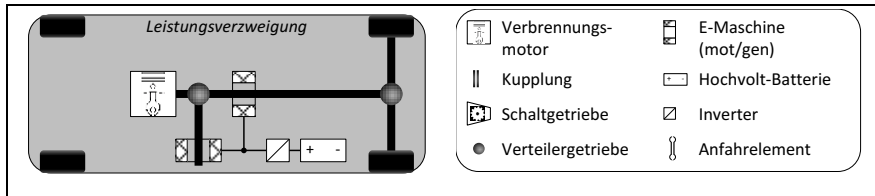


Bild 2.10: Leistungsverzweigter Hybridantrieb

nach [5] [6]

Die eine Ausgangswelle bildet den mechanischen Zweig, die andere Ausgangswelle treibt eine erste EM an und bildet somit den Beginn des elektrischen Zweiges. Dieser endet bei der zweiten EM, wodurch die beiden Pfade wieder zusammengeführt werden. Die zweite EM kann sowohl vom Generator als auch von der Hochvolt-Batterie gespeist werden.

Einer der bekanntesten Vertreter dieser Topologie ist der Toyota Prius [17].

2.2 Ausgewählte Betriebszustände bei Hybridfahrzeugen

Eingangs von Kapitel 2.1 wurde bereits angedeutet, dass mit einigen Topologien manche Betriebszustände nicht oder zumindest nicht sinnvoll darstellbar sind. Nachfolgend sollen die wichtigsten Zustände etwas näher beleuchtet werden.

2.2.1 Motor-Stopp-Start

Bei der Motor-Stopp-Start-Funktion wird der VM unterhalb einer bestimmten Fahrzeug-Grenzgeschwindigkeit abgeschaltet. Das ist typischerweise bei Fahrzeug-Stillstand oder langsamem Rollen der Fall [6]. Wird die Kupplung bzw. das Fahrpedal betätigt, springt der Motor von allein wieder an. Aber

auch andere Eingriffe, wie ein ausreichend großer Lenkradeinschlag, können zu einem Motorstart führen.

Beachtet werden muss, dass Nebenaggregate wie die Klimaanlage trotz abgeschaltetem VM weiterhin funktionieren sollen. Aus diesem Grund erfordert die Motor-Stopp-Start-Funktion eine ausreichend dimensionierte Batterie [6]. Darüber hinaus wird eine Regelung benötigt, die in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie z. B. dem Ladezustand der Batterie (SOC, engl.: state of charge) die Funktion deaktiviert bzw. beendet. Das Abschalten des VM kommt zur Verbrauchsreduzierung auch in Fahrzeugen mit klassischem Antriebskonzept zum Einsatz [11].

2.2.2 Hybrides Fahren / Boosten

Unter dem Begriff Boosten wird das Unterstützen des VM durch die EM – typischerweise bei Beschleunigungsvorgängen – verstanden [11]. Das ist besonders beim Anfahren interessant, da eine EM ihr maximales Drehmoment im Gegensatz zu einem VM bereits bei Null Drehzahl aufweist [4]. Das Boosten bietet hier folglich die Möglichkeit, die Fahrleistungen spürbar zu verbessern.

Alternativ dazu kann der VM bewusst kleiner dimensioniert werden. Die dadurch fehlende Leistung wird durch die EM bereitgestellt [6]. Für beide Konzepte ist ein ausreichend hoher Ladezustand der Traktionsbatterie notwendig.

Im Folgenden bedeutet hybrides Fahren, dass das Fahrzeug von beiden Antriebsmaschinen bewegt wird. Das Boosten stellt damit eine Form des hybriden Fahrens dar und wird hier nicht gesondert betrachtet.

2.2.3 Rein elektrisches Fahren

Beim rein elektrischen Fahren ist der VM abgeschaltet bzw. ausgekuppelt, wodurch alle Fahrzustände mit Hilfe der EM realisiert werden müssen. Da jetzt ausschließlich die Traktionsbatterie als Energiespeicher verwendet wird, kann dieser Modus nur mit einer entsprechend dimensionierten Batterie über

eine sinnvolle Zeitspanne aufrechterhalten werden [11]. Ist das rein elektrische Fahren aktiviert, fährt das Fahrzeug lokal emissionsfrei und nahezu geräuschlos, was besonders in emissionssensiblen Bereichen, wie beispielsweise in Innenstädten oder vor Krankenhäusern, erstrebenswert ist. Einschränkung muss erwähnt werden, dass die Reichweiten aktueller Hybridfahrzeuge im rein elektrischen Betrieb noch deutlich unterhalb der Werte konventioneller Antriebe liegen.

2.2.4 Lastpunktverschiebung (spez. Lastpunktanhebung)

Der Lastpunkt eines VM wird durch die Drehzahl und das Drehmoment definiert. Dabei variiert der spezifische Kraftstoffverbrauch über das gesamte Kennfeld zum Teil erheblich [4]. Mit Hilfe einer EM kann das abzugebende Moment des VM verändert und somit der Lastpunkt in Bereiche niedrigerer Verbräuche verschoben werden. Ob die Drehzahl ebenfalls verändert wird, hängt von der Hybridstruktur und der Betriebsstrategie ab.

Arbeitet die EM als Generator, wird der Lastpunkt des VM angehoben und er muss mehr Moment abgeben. Dies wird im Folgenden als Lastpunktanhebung bezeichnet.

Dem gegenüber führt ein motorischer EM-Betrieb zu einer Momentenreduzierung beim VM. Dieser Zustand entspricht dem hybriden Fahren (s. o.).

2.2.5 Rekuperation

Bei einer konventionellen Bremse wird kinetische Energie mittels Reibung in thermische Energie umgewandelt. Aus Sicht des Systems „Fahrzeug“ ist diese anschließend nicht mehr nutzbar und somit „verloren“. Gelingt es durch eine andere Art von Bremse, die kinetische Energie in eine weiterhin nutzbare Form umzuwandeln, kann der Energieverlust reduziert werden.

Als weiterhin nutzbare Energie bietet sich bei Hybridfahrzeugen die elektrische Energie an. Die EM arbeitet generatorisch und bremst so das Fahrzeug. Die Umwandlung von kinetischer in elektrische Energie wird als Rekuperation bezeichnet [18].

Übersteigt das gewünschte Bremsmoment das maximal mögliche Generatormoment, wird die konventionelle Bremsanlage mit einbezogen [11]. Neben den Energieverlusten wird durch das Rekuperieren auch der Verschleiß an der konventionellen Bremsanlage reduziert.

Es soll hier noch einmal daran erinnert werden, dass keine Energieumwandlung verlustfrei abläuft. Somit treten auch bei der Rekuperation thermische Verluste auf.

2.2.6 Rollen / Segeln

Der Begriff „Segeln“ muss auf Grund seiner häufigen Verwendung als Fachwort angesehen werden. Dennoch ist bei seinem Gebrauch Vorsicht geboten. Der Grund sind die sehr unterschiedlichen Auffassungen darüber, in welchem Zustand sich die Antriebsmaschinen befinden.

So wird das Segeln auf einschlägigen Webseiten als ein Betriebsmodus erklärt, in dem „sowohl der Verbrennungsmotor als auch die E-Maschine [...] nicht aktiviert“ sind [19].

Dem gegenüber verspricht beispielsweise Honda „die Fähigkeit des so genannten Segelns, d. h. die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrens“ und setzt damit die beiden genannten Zustände gleich [20]. Der VM ist also abgeschaltet und die EM arbeitet motorisch.

Andere Hersteller wiederum verstehen unter Segeln zahlreiche Formen des generatorischen Betriebes. Als Beispiel sei hier die Marke Mercedes-Benz genannt, die in Betriebsanleitungen unter dem Stichwort Segeln auf den Schubtrieb verweist und dort erklärt, dass „der Verbrennungsmotor [...] abgeschaltet und vom Antriebsstrang abgekoppelt [wird]. Der Elektromotor arbeitet als Generator und erzeugt für die Nebenverbraucher die erforderliche Energie und lädt die Hochvoltbatterie auf“ [21]. Auf das Laden der Batterie wird im sog. „verlängerten Schubtrieb“ verzichtet, so „dass nur noch die Stromversorgung der momentan betriebenen Nebenverbraucher abgedeckt wird“ [21].

Hinzu kommt, dass auch bei konventionellen Antriebssträngen mehrere Varianten des Segelns unterschieden werden. Sie beziehen sich darauf, ob der

VM ausgekuppelt und im Leerlauf betrieben oder ausgekuppelt und abgeschaltet wird. Die Fa. Bosch verwendet hier die Begriffe „Leerlauf-Segeln“ und „Start/Stop-Segeln“ [22].

Auf Grund der unterschiedlichen Interpretationen des Begriffes Segeln wird er in der vorliegenden Abhandlung nicht weiter verwendet. Stattdessen wird vom „Schubbetrieb“ die Rede sein, wenn die EM im Generatorbetrieb arbeitet. Als „momentenfreies Rollen“ wird das Abschalten aller Antriebsmaschinen bezeichnet.

2.2.7 Externes Laden / Plug-In-Hybrid

Bei allen Hybridvarianten kann die zum Laden benötigte elektrische Energie durch den VM mit nachgeschaltetem Generator oder durch Rekuperation bereitgestellt werden. Gibt es zusätzlich die Möglichkeit, elektrische Energie von außen zuzuführen, wird von einem Plug-In-Hybrid gesprochen [6]. Grundsätzlich kann jeder Hybrid zu einem Plug-In-Hybrid erweitert werden.

Neben der zusätzlichen Lademöglichkeit zeichnen sich derartige Hybride durch eine höhere Kapazität der Traktionsbatterie sowie eine andere Betriebsstrategie aus. Beides dient dem Ziel, eine möglichst große Reichweite im rein elektrischen Betrieb zu erzielen. Während des Betriebes werden deutlich geringere SOC-Werte akzeptiert, da ein Laden auch nach dem Abstellen des Fahrzeugs möglich ist.

2.3 Klassierungen, Zählverfahren, Kollektive

Mess- oder Simulationsdaten liegen typischerweise in Form zahlreicher zeit-, mitunter auch wegabhängiger Signale vor. Aus diesen Daten lassen sich Extremwerte einzelner Messkanäle noch recht einfach ablesen. In vielen Fällen sind aber nicht nur die Extremwerte interessant, sondern auch die zu diesem Zeitpunkt erfassten Werte anderer Kanäle. Darüber hinaus spielt es für viele Untersuchungen eine Rolle, ob ein Signal einen bestimmten Schwellwert über- bzw. unterschreitet, selbst wenn es in diesem Moment keinen extremen Wert annimmt.

Zählverfahren dienen dem Zweck, genau solche Informationen bereitzustellen. Sie werten ein oder mehrere Messkanäle gemäß bestimmter Vorgaben aus und beantworten so die Frage, wie häufig oder lange ein bestimmter Zustand vorlag bzw. ein bestimmtes Ereignis stattfand.

Die Ergebnisse werden in verschiedenen Formen dargestellt. Neben Matrizen sind das vor allem zwei- und dreidimensionale Diagramme, die sog. Kollektive.

Im Folgenden werden ausgewählte Zählverfahren zusammenfassend vorgestellt. Köhler et. al. beschreiben in [23] eine Reihe von Verfahren in deutlich ausführlicherem Umfang. In Anlehnung an das dortige Vorgehen wird bei den folgenden Erklärungen von der in **Bild 2.11** dargestellten Belastungs-Zeit-Funktion (BZF) ausgegangen.

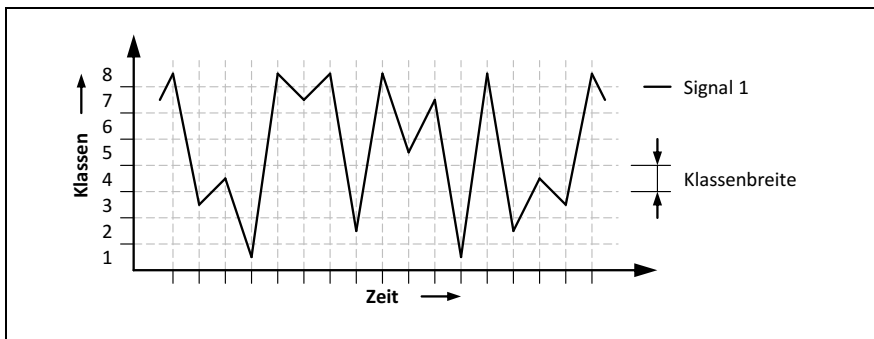


Bild 2.11: Belastungs-Zeit-Funktion (schematisch)

nach [23]

Um ein Zählverfahren anwenden zu können, muss der Messbereich zuvor in Klassen unterteilt worden sein [23]. Dabei hat die Wahl der Klassenbreite einen spürbaren Einfluss auf die spätere Auswertung der Messergebnisse. Durch den Einsatz von Computern und der damit zur Verfügung stehenden Rechenleistung kann mit kleinen Klassenbreiten gearbeitet werden, was detaillierte Analysen erlaubt. Allerdings ist eine Erhöhung der Klassenzahl nicht immer sinnvoll. Wird der Messbereich beispielsweise in 100 Klassen unterteilt, so entspricht eine Klassenbreite 1 % davon [23], was in vielen Fällen völlig ausreichend ist.

2.3.1 Bereichspaar-Mittelwert-Zählung

Die Bereichspaar-Mittelwert-Zählung (BPM-Z) bestimmt die Häufigkeit von Schwingspielen, wobei ein Schwingspiel aus einer positiven und einer negativen Flanke besteht. Beide Flanken müssen die gleiche Größe und die gleiche Mittelspannung aufweisen. Das Ergebnis kann als Matrix oder als Summenhäufigkeit dargestellt werden [23]. In **Bild 2.12** sind beide Varianten für die Auswertung der BZF dargestellt.

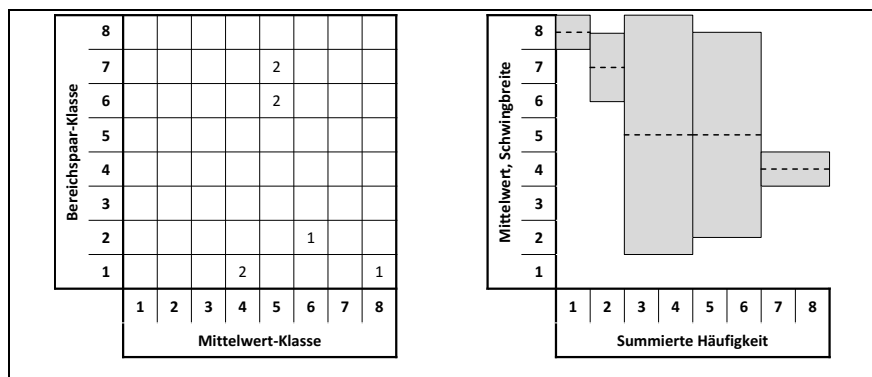


Bild 2.12: Zählergebnis einer Bereichspaar-Mittelwert-Zählung

nach [23]

2.3.2 Rainflow-Zählung

Mit der Rainflow-Zählung (RNF-Z) wird die Anzahl geschlossener Hysteresen ermittelt. Damit das gelingen kann, darf sie nicht sequentiell arbeiten. Prinzipiell führt die RNF-Z zu ähnlichen oder identischen Ergebnissen wie die BPM-Z [23].

Der Name „Rainflow“ (deutsch: Regenfluss) wurde von Matsuishi und Endo gewählt, um die von ihnen entwickelte Methode zu veranschaulichen. Durch das Drehen der Zeitachse um 90° im Uhrzeigersinn kann der Regen gedanklich entlang der schrägen Dächer fließen [24], **Bild 2.13**. Die Vorstellung des Zählverfahrens erstreckte sich im Zeitraum von 1967 bis 1975 über insgesamt sechs Veröffentlichungen [25].

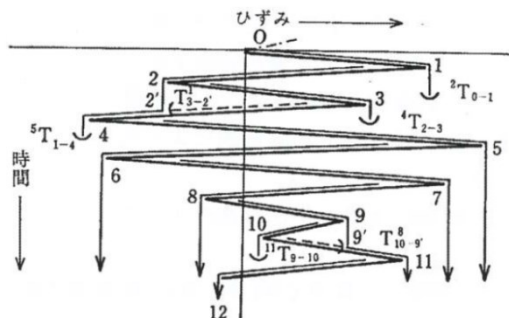


図7 狭義の Rain Flow Method による有効区間の決定

(図において尖頭値 12 における瞬間の有効区間は 0—1, 1—4, 2—3, 3—2', 4—5, 5—6, 6—7, 7—8, 8—11, 9—10, 10—9', 11—12 である。)またひずみは塑性ひずみ。

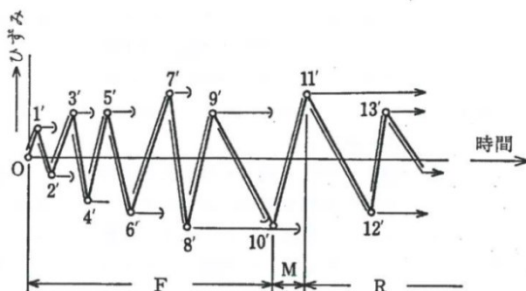
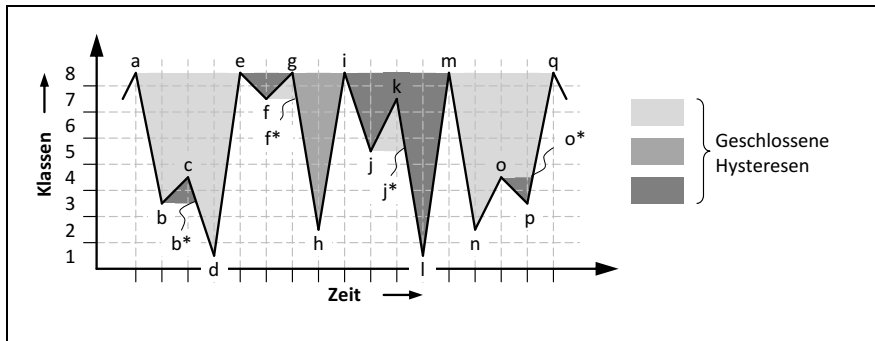


図11 最大最小法と狭義の Rain Flow Method における図12の系列中の半サイクル分の対応

Bild 2.13: Ursprüngliche Darstellungen der Rainflow-Zählung

[24]

Zur Erklärung der RNF-Z wird wieder von der bekannten BZF ausgegangen. Zusätzlich werden die Umkehrpunkte durch Buchstaben identifiziert, **Bild 2.14**.

**Bild 2.14:** Geschlossene Hysteresen bei einer Rainflow-Zählung

nach [23]

Von den Umkehrpunkten fällt das Wasser nach unten (im Bild nach rechts), z. B. vom Punkt b auf die Gerade c-d oder vom Punkt j auf die Gerade k-l.

Sog. Halbzyklen werden immer dann gezählt, wenn das Wasser auf dem Dach abwärts fließt und einen Umkehrpunkt, also das Ende des Daches erreicht [23]. Als Beispiele können die Schwingbreiten a-b, b-c oder f-g genannt werden.

Halbzyklen werden aber auch dann gezählt, wenn das Wasser einen Punkt erreicht, an dem Wasser von einem höheren Umkehrpunkt herunterfällt und auftrifft [23]. Das ist z. B. in den Punkten b* oder f* der Fall.

Zwei Halbzyklen, die dieselbe Schwingbreite und dieselbe Lage aufweisen, bilden zusammen eine geschlossene Hysterese. Mit „Lage“ ist in diesem Zusammenhang das jeweilige Mini- bzw. Maximum gemeint [23]. Für die gewählte Funktion sind die geschlossenen Hysteresen, die auch als geschlossene Schwingspiele bezeichnet werden, in **Bild 2.14** grau hinterlegt.

Nicht immer kann eine Hystereseschleife geschlossen werden. Offene Schleifen werden im sog. Residuum abgelegt. Ist die BZF sehr kurz, kann das Residuum einen signifikanten Anteil an schädigungsrelevanten Schwingspielen enthalten [26].

Ein Extrembeispiel ist eine freie, gedämpfte Schwingung. Da hier überhaupt keine Schleife geschlossen werden kann, sind nur Einträge im Residuum vorhanden [26].

Für die weiteren Erklärungen wird der in **Bild 2.15** dargestellte, fiktive Drehmomentverlauf verwendet.

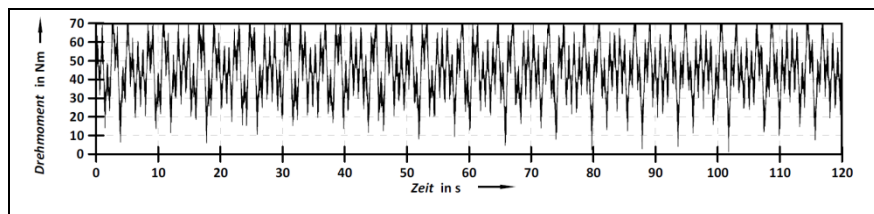


Bild 2.15: Beispielsignal für ein Drehmoment über der Zeit

Das Ergebnis einer RNF-Z wird typischerweise in Form von Matrizen oder dreidimensionalen Diagrammen ausgegeben.

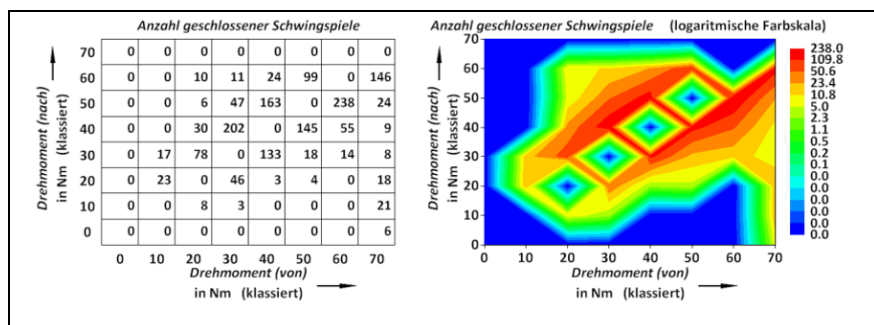


Bild 2.16: Zählergebnis einer Rainflow-Zählung

Zur Veranschaulichung wurde eine RNF-Z für das Drehmoment durchgeführt. Die Klassenzahl wurde auf 8 festgelegt. Dieser vergleichsweise niedrige Wert führt dazu, dass die tabellarische Zusammenstellung übersichtlich bleibt. Allerdings erscheint die Kennfeld-Darstellung dadurch etwas grob, **Bild 2.16**.

Bei den bis hier vorgestellten Zählverfahren wurde nur eine einzige BZF betrachtet. Häufig sind aber mindestens zwei Signale von Interesse. Daher wird im Folgenden ein Algorithmus vorgestellt, bei dem zwei Parameter gleichzeitig ausgewertet werden.

2.3.3 Zweiparametrische Verweildauerzählung

Analog zu den einparametrischen Verfahren werden die Wertebereiche der beiden Signale zunächst in äquidistante Klassen unterteilt [23]. Nun lassen sich Klassenpaare bilden, die durch die Klasse i des ersten Signals und die Klasse j des zweiten Signals definiert werden.

Mit Hilfe der zweiparametrischen Verweildauerzählung (Z-VDZ) wird anschließend erfasst, wie lange sich die erste Funktion in der Klasse i befindet, während sich die zweite Funktion gleichzeitig in der Klasse j aufhält [23]. Das in **Bild 2.15** eingeführte Drehmomentsignal wird um ein ebenfalls fiktives Drehzahlsignal erweitert, **Bild 2.17**.

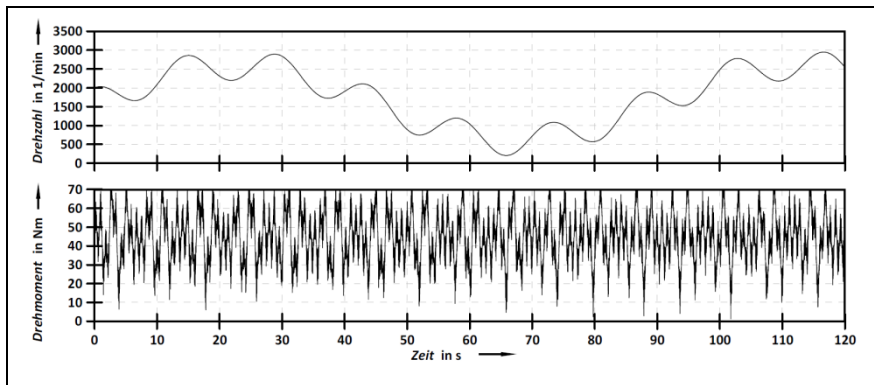


Bild 2.17: Beispielsignale für Drehzahl und Drehmoment über der Zeit

Angewandt auf diese Signale führt die Z-VDZ zu den in **Bild 2.18** gezeigten Ergebnissen.

Die Ergebnisse von Zählverfahren dienen als Grundlage für die Lebensdauerberechnung. Das folgende Kapitel beschäftigt sich daher mit dieser Thematik.



Die Forderung, dass ein Bauteil „halten“ muss, ist zwar verständlich, aber ungenau. Eine sinnvolle Erfüllung dieses Anspruches wird erst durch die Beantwortung der folgenden drei Fragen möglich: Was wird die Komponente ertragen müssen? Was soll sie ertragen können? Was kann sie tatsächlich ertragen?

Die zweite Frage berührt den Aspekt der geforderten Lebensdauer. Es ist ein Unterschied, ob ein Bauteil eine Belastung dauerhaft oder nur für eine bestimmte Zeit ertragen können muss. Die Auslegung hat erheblichen Einfluss auf das Gewicht, den Kraftstoffverbrauch sowie die Herstellungs- und Be-

triebskosten. Eine vernünftige Wahl für die angestrebte Lebensdauer hilft daher, eine Überdimensionierung des Bauteils zu vermeiden.

Die dritte Frage schließlich umfasst die Belastbarkeit des Bauteils. Hier gilt es neben dem Werkstoff auch die Geometrie sowie die Beschaffenheit von Oberflächen zu beachten.

2.4.1 Belastbarkeit und Wöhlerkurven

Auskunft über die Belastbarkeit einer Komponente gibt die Wöhlerkurve. Allerdings sind bei ihrer Verwendung einige Einschränkungen zu berücksichtigen [27].

Es wird zwischen spannungs- und dehnungskontrollierten Wöhlerkurven unterschieden [27]. Die erste Variante stellt den Zusammenhang zwischen der ertragbaren Lastspielzahl und der Spannungsamplitude dar, wenn die Dehnung konstant ist.

Die zweite Variante hingegen veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der ertragbaren Lastspielzahl und der Dehnungsamplitude bei konstanter Spannung [27].

Berücksichtigt werden muss, dass eine Wöhlerkurve nur für die Belastung gilt, bei der sie ermittelt wurde. So hat eine unter Zugbelastung generierte Kurve keine Gültigkeit für eine Torsionsbelastung [28].

Bei der spannungskontrollierten Wöhlerkurve können drei Bereiche unterschieden werden. Der erste Bereich beschreibt die quasistatische Festigkeit. Er umfasst etwa 10^1 bis 10^3 Schwingspiele. Daran schließt sich die Betriebsfestigkeit an. Sie wird auch als Zeitfestigkeit bezeichnet und geht bis zur Ecklastspielzahl, die bei ca. 10^6 bis 10^7 liegt. Oberhalb der Ecklastspielzahl ist der dauerfeste Bereich zu finden, wobei auch Werkstoffe ohne eine ausgeprägte Dauerfestigkeit bekannt sind [27].

Im Bereich der Betriebsfestigkeit entspricht die maximal ertragbare Lastspielzahl der Anzahl an Schwingspielen, die bei einer definierten Lastamplitude durchschnittlich ertragen werden können, bevor ein bestimmter Prozentsatz der im Einsatz befindlichen Teile versagt [27]. Aus diesem

Grund gibt es Wöhlerkurven für verschiedene Ausfallwahrscheinlichkeiten. Typische Werte liegen bei 1, 10, 50 und 90 Prozent. Zwischen der ertragbaren Schwingenspielzahl und der Belastung lässt sich folgende Beziehung herstellen:

$$N_i = N_D \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^{-k} \quad \text{Gl. 2.1}$$

mit: N_i ertragbare Schwingenspielzahl bei
Lastamplitude i
 N_D Ecklastspielzahl
 σ_i Lastamplitude i
 σ_D Ecklast
 k Lebensdauerexponent

Der Lebensdauerexponent dient der Berücksichtigung von unterschiedlichen Schadensfällen sowie verschiedenen Verfahren zur Oberflächenbehandlung [4]. Bei Zahnrädern können hier z. B. „Bruch“ oder „Grübchen“ bzw. „einsatzgehärtet“ oder „nitriert“ genannt werden. Die Darstellung der Gleichung 2.1 in einem doppellogarithmischen Diagramm führt im Bereich der Zeitfestigkeit zu einer Geraden, **Bild 2.19**.

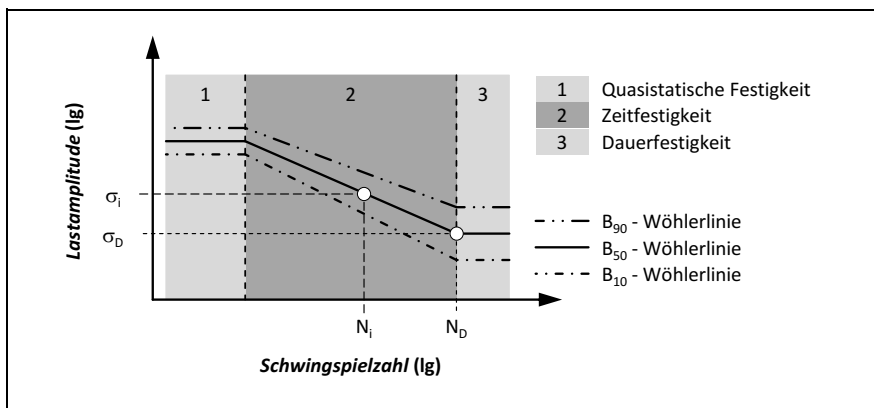


Bild 2.19: Spannungskontrollierte Wöhlerkurve (schematisch)

nach [27]

2.4.2 Die Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner

Wird ein Bauteil einer ausreichend hohen schwingenden Belastung ausgesetzt, dann wird es durch diese geschädigt [27]. In der Fachliteratur sind verschiedene Ansätze zu finden, wie die Auswirkungen einer Teilschädigung auf die Lebensdauer erfasst werden können.

Der bekannteste Ansatz ist die unter dem Begriff Palmgren-Miner-Regel bekannt gewordene Annahme, dass sich die einzelnen Teilschädigungen addieren. Erreicht die Summe schließlich einen Grenzwert, versagt das Bauteil [27]. Diese Hypothese ist vergleichsweise einfach und wurde bereits im Jahre 1945 vorgestellt. Seitdem wurden in zahlreichen Veröffentlichungen Alternativen und Weiterentwicklungen vorgestellt.

Die Einfachheit der Palmgren-Miner-Regel führt einerseits zu einigen Einschränkungen in der Aussagekraft [29]. Andererseits ermöglicht sie kurze Rechenzeiten. Aus diesem Grund findet sie häufig in Simulationsrechnungen Anwendung.

Da sie die Grundlage für viele andere Hypothesen bildet, soll sie im Folgenden vorgestellt werden.

Die durch eine Belastung hervorgerufene Teilschädigung entspricht dem Verhältnis aus der bei dieser Lastamplitude erreichten Schwingspielzahl und der erreichbaren Schwingspielzahl:

$$S_i = \frac{n_i}{N_i} \quad \text{Gl. 2.2}$$

$$S_i = \frac{n_i}{N_D} \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^k \quad \sigma_D \leq \sigma_i \leq \sigma_{max} \quad \text{Gl. 2.3}$$

mit: S_i Teilschädigung i
 n_i erreichte Schwingspielzahl bei
 Lastamplitude i

Die Einschränkung bei der Gleichung 2.3 verdeutlicht eine der Schwächen der Palmgren-Miner-Regel: unterhalb der Ecklast wird keine Schädigung angenommen.

Das Addieren aller Einzelschädigungen liefert die Gesamtschädigung:

$$S = \sum_i \left[\frac{n_i}{N_D} \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^k \right] \quad \sigma_D \leq \sigma_i \leq \sigma_{max} \quad \text{Gl. 2.4}$$

mit: S Gesamtschädigung

Erreicht die Gesamtschädigung den Wert 1, fällt das Bauteil – statistisch gesehen – aus. Bei dem in **Bild 2.20** gezeigten Beispiel wird dieser Wert während der sechsten Teilbelastung nach insgesamt N_F Schwingspielen erreicht.

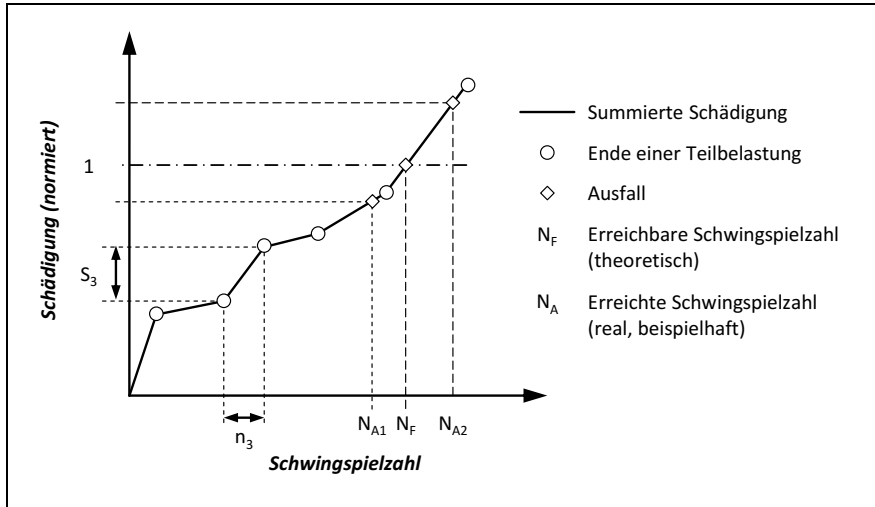


Bild 2.20: Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner (schematisch)

In der Praxis hat sich gezeigt, dass Bauteile nicht immer bei Erreichen der Schadenssumme 1 ausfallen [4]. **Bild 2.20** enthält dazu zwei beispielhafte

Szenarien, bei denen die theoretische Lebensdauer einmal unter- und einmal überschritten wird.

Auf Grund dieser Schwankungen bietet es sich bei Neuentwicklungen an, eine auf realen Lebensdauerversuchen basierte Korrektur vorzunehmen.

Beispielhaft sei angenommen, dass eine Komponente nach 440.000 Schwingspielen versagt hat, obwohl rein rechnerisch 500.000 Schwingspiele erreichbar gewesen wären. Dann wird zunächst die tatsächliche Schadenssumme gemäß nachstehender Gleichung gebildet:

$$\begin{aligned}
 S_{real} &= \frac{N_{F,real}}{N_{F,rechn}} && \text{Gl. 2.5} \\
 &= \frac{440.000}{500.000} \\
 S_{real} &= \mathbf{0,88}
 \end{aligned}$$

Damit kann die ertragbare Schwingspielzahl korrigiert werden. Auf diese Weise fließen in die Berechnung der erreichbaren Lebensdauer auch Erfahrungen aus Vorgängerprojekten ein.

2.4.3 Überrollungs- und Wechsellastschädigung

Für viele rotierende Maschinenelemente, wie beispielsweise Lager, stellt eine Umdrehung ein Lastschwingspiel dar [30]. Daher ist die Anzahl der Umdrehungen bei einem bestimmten Drehmoment eine wichtige Kenngröße. Mit Hilfe der Drehzahl und der Zeit kann die Anzahl der Überrollungen bestimmt werden.

Die Überrollungsschädigung, die dadurch hervorgerufen wird, kann unter Verwendung der Gleichung 2.4 ermittelt werden:

$$SUK = \sum_i \left[\frac{UBR_i}{N_D} \cdot \left(\frac{M_i}{\sigma_D} \right)^k \right] \quad \text{Gl. 2.6}$$

mit: SUK Überrollungsschädigung
 UBR_i Überrollungen in der Klasse i
 M_i Drehmoment in der Klasse i

Eine weitere Belastungsform, die es zu berücksichtigen gilt, ist die Wechsel-
last. Innerhalb eines Antriebsstranges wird sie beispielsweise dadurch her-
vorgerufen, dass das Fahrpedal abwechselnd betätigt und nicht betätigt wird.
Dadurch werden erst positive, dann negative und dann wieder positive Mo-
ment erzeugt. Bei Hybridantrieben kommt erschwerend hinzu, dass das
Bremsmoment der EM dem Betrage nach deutlich über dem Schleppmoment
des VM liegen kann.

Auch für die Wechsellast lässt sich Gleichung 2.4 anpassen:

$$SWK = \sum_i \left[\frac{n_i}{N_D} \cdot \left(\frac{\hat{M}_i^*}{\sigma_D} \right)^k \right] \quad \text{Gl. 2.7}$$

mit: SWK Wechsellastschädigung
 n_i Anzahl geschlossener Schwingspiele in
der Klasse i
 $\hat{M}_i^*$ Doppelte Amplitude des Schwingspiels in
der Klasse i

Ein methodischer Ansatz zur Erstellung von
Hybrid-Betriebsstrategien für die simulative Ermittlung
von Lastkollektiven

Keilhoff, D.

2016, XXX, 195 S. 98 Abb., 49 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-16540-6