

Bereiche (Punkte) 1 und 2 können jedoch nicht über der Traktionsgrenze

$$Z_{max} = \frac{M_{Rad,max}}{r_{stat}} \quad (12)$$

liegen, da in diesem Fall die erforderliche Zugkraft zum Befahren der entsprechenden Steigung bzw. zum Erreichen der maximalen Beschleunigung zwar durch den Antrieb bereitgestellt werden könnte, allerdings die Reifen die Haftung verlieren würden.

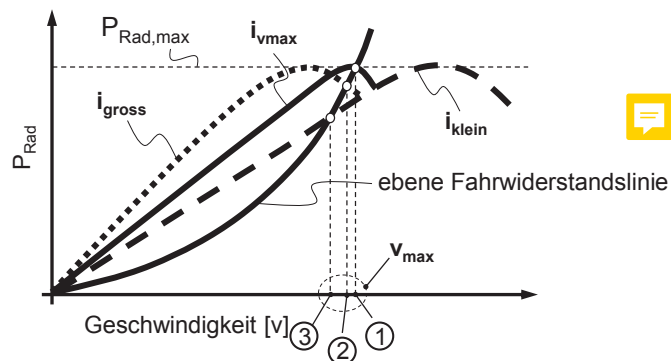
Der Bereich 3 in Abb. 2 zeigt ein weiteres Kriterium für die Wahl der größten Getriebeübersetzung, die *Kriechgeschwindigkeit*:

$$v_{kriech} = n_{LL} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{1}{i_1} \cdot r_{dyn} \quad (13)$$

Die Kriechgeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs im ersten Gang bei geschlossener Kupplung und Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors. Die Kriechgeschwindigkeit darf nicht zu hoch werden, da ansonsten die subjektive Bewertung des Fahrverhaltens beispielsweise in Stausituationen, durch das ständige Auflaufen des Fahrzeugs auf den vorausfahrenden Verkehr, schlecht ausfällt. Die Kriechgeschwindigkeit sollte in der Praxis unterhalb von 7 km/h liegen. Sie ist antiproportional zur Übersetzung des ersten Ganges. Bei Elektrofahrzeugen ist dieses Kriterium nicht relevant zur Auslegung der größten Übersetzungen, da Elektromotoren keine Leerlaufdrehzahl aufweisen, [3].

### 8.3.2 Auslegung der Übersetzung zum Erreichen der Höchstgeschwindigkeit

In modernen Fahrzeugen wird die *Höchstgeschwindigkeit* oftmals nicht im höchsten Gang, sondern bereits in einem niedrigeren Gang erreicht. Der Höchstgeschwin-



**Abb. 3** Beschreibung der Kriterien zur Auslegung der Getriebeübersetzung zum Erreichen der Höchstgeschwindigkeit anhand von Verläufen der Radleistung  $P_{Rad}$  und der ebenen Fahrwiderstandslinie über der Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Übersetzungen, 1:  $v_{max}$ -optimale Auslegung  $i = i_{vmax}$ , 2: überdrehende Auslegung  $i = i_{gross}$  (üblich für den  $v_{max}$ -Gang), 3: unterdrehende Auslegung  $i = i_{klein}$  (üblich für den oder die Overdrive-Gänge)

digkeitsgang muss also nicht zwingend der höchste Gang sein. Die Gänge oberhalb des Höchstgeschwindigkeitsganges werden als Overdrive-Gänge bezeichnet. Ihre Auslegung wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Die ebene Fahrwiderstandslinie beschreibt die benötigte Zugkraft in der Ebene bei Windstille für eine konstante Geschwindigkeit. Das Produkt aus Zugkraft und Geschwindigkeit ergibt die benötigte Radleistung in der Ebene über der Geschwindigkeit. Diese ist in Abb. 3 dargestellt. Die gestrichelte horizontale Linie beschreibt die maximale Radleistung

$$P_{Rad,max} = P_{VM,max} \cdot \eta_{Triebstrang} \quad (14)$$

Diese hängt von der maximalen Motorleistung und dem Antriebsstrangwirkungsgrad in dem entsprechenden Betriebspunkt ab. Sie kann folglich nur bei einer einzigen Motordrehzahl, der Nenndrehzahl, und somit bei einer einzigen Fahrzeuggeschwindigkeit in jedem Gang, erreicht werden. Die dargestellte Kurvenschar zeigt die verfügbare Radleistung bei verschiedenen Übersetzungen.

Der Grundgedanke bei der Auslegung der Übersetzung des Höchstgeschwindigkeitsgangs ist nun, dass die Übersetzung so gewählt wird, dass die Nenndrehzahl exakt bei der Höchstgeschwindigkeit erreicht wird. Jede der drei Radleistungskurven in Abb. 3, die sich aufgrund verschiedener Getriebeübersetzungen  $i_{\text{klein}}$ ,  $i_{v_{\text{max}}}$  und  $i_{\text{groß}}$  ergeben, schneidet die ebene Fahrwiderstandslinie in genau einem Punkt. Lotet man diese Punkte auf die Abszisse, so lässt sich direkt ablesen, welche Fahrzeuggeschwindigkeit maximal erreicht werden kann. Diese ist je nach Übersetzung des Gangs verschieden.

Zur Auslegung der Übersetzung des Höchstgeschwindigkeitsgangs gibt es drei Varianten:

1. Die höchstgeschwindigkeitsoptimale Auslegung mit der Übersetzung  $i_{v_{\text{max}}}$  ermöglicht die größte Maximalgeschwindigkeit, da diese exakt im Punkt maximaler Motorleistung erreicht wird. Nachteil an dieser Variante ist, dass schon ein geringfügiger Anstieg der Fahrwiderstandslinie, etwa durch eine leichte Steigung oder geringen Gegenwind, zu einem signifikanten Geschwindigkeitsverlust führen würde.
2. Die überdrehende Auslegung mit der Übersetzung  $i_{\text{groß}}$  erreicht eine nur etwas geringere Höchstgeschwindigkeit als die  $v_{\text{max}}$ -optimale Auslegung, allerdings bei einer höheren Motordrehzahl. Der Vorteil dieser Variante ist die große Leistungsreserve im Geschwindigkeitsbereich unmittelbar vor der Höchstgeschwindigkeit, welche direkt am vertikalen Abstand zwischen ebener Fahrwiderstandslinie und Leistungsangebot dieser Auslegungsvariante zu erkennen ist. Aufgrund dieser Leistungsreserve wird die Auslegungsvariante auch als  $v_{\text{max}}$ -stabile Auslegung bezeichnet. Denn eine Veränderung der Fahrwiderstandslinie führt nur zu einer kleinen Verringerung der Höchstgeschwindigkeit.

3. Die unterdrehende Auslegung mit der Übersetzung  $i_{\text{klein}}$  hat eine kleinere Übersetzung als die anderen beiden Varianten, was dazu führt, dass sich die ebene Fahrwiderstandslinie und die Linie der verfügbaren Leistung bereits bei einer deutlich geringeren Motordrehzahl schneiden. Das Resultat ist eine – verglichen mit den anderen Varianten – geringe Höchstgeschwindigkeit bei niedriger Motordrehzahl.

In der Praxis wird für die Auslegung des Höchstgeschwindigkeitsgangs die überdrehende Auslegung bevorzugt, da diese relativ stabil auf Änderungen des Fahrwiderstands reagiert. Aber auch die unterdrehende Auslegung findet in der Praxis Anwendung, jedoch nicht zum Erreichen der Höchstgeschwindigkeit, sondern bei den Overdrive-Gängen.

### 8.3.3 Auslegung der Overdrive-Übersetzungen

Als *Overdrive* werden alle Gänge beziehungsweise Übersetzungen bezeichnet, die dazu führen, dass das Leistungsmaximum des Verbrennungsmotors erst nach der tatsächlichen Höchstgeschwindigkeit erreicht werden würde. In modernen, insbesondere automatisch schaltenden Fahrzeuggetrieben mit hohen Ganganzahlen finden sich oft mehrere Overdrive-Gänge. Diese Gänge haben folglich eine relativ kleine Übersetzung und somit bei gleicher Geschwindigkeit eine geringere Motordrehzahl als der Höchstgeschwindigkeitsgang. Die maximale Radleistung kann in der Ebene in diesen Gängen nicht erreicht werden, daher liegt auch die maximal erreichbare Geschwindigkeit in den Overdrive-Gängen signifikant unter der Höchstgeschwindigkeit.

Die Verwendung von Overdrive-Gängen ermöglicht bei hohen Geschwindigkeiten eine Verbesserung des Komforts und der Akustik, da das Drehzahlniveau des VM abgesenkt wird. Weiterhin führt eine

Drehzahlabsenkung prinzipiell zu Verringerung des Kraftstoffverbrauchs.

### 8.3.4 Auswahl der Zwischenübersetzungen

Nach der Definition der Übersetzungen des ersten Ganges  $i_1$  und des letzten Ganges  $i_z$  eines  $z$ -Gang-Getriebes erfolgt die Festlegung der Übersetzungen für die Zwischengänge. Hierbei werden in der Regel entweder die *geometrische* oder die *progressive Übersetzungsauslegung* genutzt. Diese werden nachfolgend im Detail beschrieben. Zunächst werden einige allgemeine Parameter definiert.

Die *Getriebespreizung* eines Getriebes mit  $z$  Gängen bezeichnet das Verhältnis der Übersetzung des ersten und letzten Ganges

$$\varphi_S = \frac{i_1}{i_z}. \quad (15)$$

Der *Stufensprung* ist definiert als Quotient der Übersetzungen zweier benachbarter Gänge

$$\varphi_n = \frac{i_n}{i_{n+1}}, n = 1, \dots, z-1. \quad (16)$$

Die Spreizung lässt sich somit auch als Produkt aller Stufensprünge

$$\varphi_S = \prod_{n=1}^{z-1} \varphi_n \quad (17)$$

berechnen. Die geometrische Übersetzungsauslegung ist dadurch charakterisiert, dass die Stufensprünge zwischen allen Gängen

$$\varphi_n = \varphi = \sqrt[z-1]{\varphi_S} = \text{konst.} \quad (18)$$

konstant sind.

Das Verhältnis benachbarter Stufensprünge wird als Progressionsfaktor  $p$  bezeichnet,

$$p = \frac{\varphi_n}{\varphi_{n+1}}. \quad (19)$$

Nach Festlegung der Übersetzungen des ersten Ganges  $i_1$  und des höchsten Ganges  $i_z$  sowie des Progressionsfaktors können die Zwischenübersetzungen  $i_n$  berechnet werden:

$$i_n = i_z \cdot \left[ \frac{1}{\varphi_S^{z-1}} \cdot p^{0,5 \cdot (1-n)} \right]^{z-n}. \quad (20)$$

Die Gl. (20) ist allgemein gültig, unabhängig von geometrischer oder progressiver Auslegung.

In **Abb. 4** sind Zugkraftdiagramm (a) und das Geschwindigkeits-Drehzahl-Diagramm (b), auch Sägezahndiagramm genannt, eines geometrisch abgestuften 6-Gang-Getriebes in einem exemplarisch betrachteten Kompaktklassefahrzeug dargestellt. Für die geometrische Auslegung gilt der Progressionsfaktor  $p=1$ . Im Zugkraftdiagramm ist für jeden der Gänge die maximal mögliche Zugkraft in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt. Die Leistungshyperbel der maximalen Leistung  $P_{Rad,max}$  wird in jedem Gang nur in genau einem Punkt, bei Nenndrehzahl des Verbrennungsmotors, erreicht. Zwischen diesen Punkten ergeben sich Zugkraftlücken, welche bei der geometrischen Auslegung zwischen benachbarten Gängen in etwa gleich groß sind.

Das Sägezahndiagramm stellt den Motordrehzahlverlauf eines fiktiven Fahrmanövers dar, bei welchem der Fahrer in jedem Gang bis zur Maximaldrehzahl der VM beschleunigt und anschließend ohne Geschwindigkeitsverlust in den nächsthöheren Gang schaltet. Aufgrund der konstanten Stufensprünge ist die Drehzahldifferenz, die bei jeder Schaltung überwunden