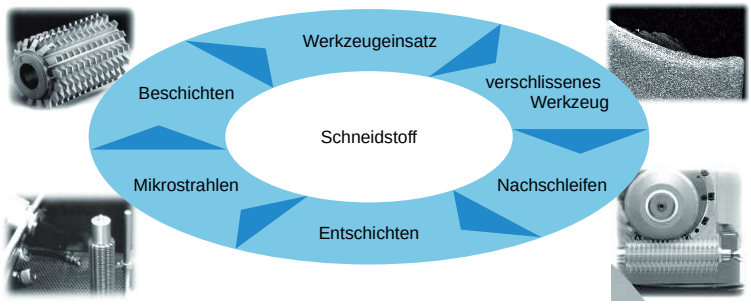

Bild 4.17 Aufbereitung von Verzahnwerkzeugen

Das nach dem Einsatz verschlissene Werkzeug wird in einem ersten Schritt spanflächenseitig nachgeschliffen. Der Prozess erfolgt häufig beim Anwender der Werkzeuge. Die Entschichtung, Strahlbehandlung und Neubeschichtung sowie die weiteren Aufbereitungsschritte werden in der Regel bei einem Beschichtungshersteller durchgeführt. Die Wiederaufbereitung kann zu einer beträchtlichen Verlängerung der Werkzeuglebensdauer führen. Während für Hartmetallwerkzeuge insbesondere die Strahlbehandlung maßgeblich ist [KLEI03], sind konstant gewählte und reproduzierbar durchgeführte Prozessschritte der gesamten Aufbereitungskette von PM-HSS-Werkzeugen für ein optimales Verschleißverhalten erforderlich.

Bei Vorliegen von Kolkverschleiß ist die Tiefenwirkung des Verschleißes bei der Wahl des zu zerspanenden Aufmaßes auf der Spanfläche beim Nachschleifen zu berücksichtigen (siehe Bild 4.18). An dem dargestellten Werkzeug wurde eine Gefügeuntersuchung im Bereich unmittelbar unterhalb des aufgetretenen Kolkverschleißes durchgeführt. Das Gefüge unterhalb der geschädigten Oberfläche ist dunkel verfärbt, da der Bereich bis zu einer Tiefe von $t \approx 30\ \mu m$ eine thermische Schädigung erfahren hat. Mikrohärtemessungen in diesem geschädigten Bereich zeigen einen Härteabfall, wodurch ein möglicher Standzeiteinbruch resultieren kann, falls die geschädigte Zone in der Wiederaufbereitung nicht vollständig entfernt wird [KLOC14d].

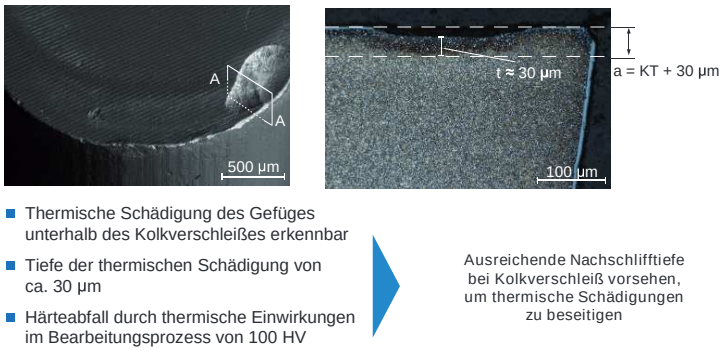

Bild 4.18 Gefügeschädigung unterhalb des Kolkverschleißes [KLOC14d]

Die Analyse mehrerer Aufbereitungszyklen unter konstanten Bearbeitungsbedingungen zeigt, dass die Standzeit des Werkzeuges nach einer Vielzahl von Wiederaufbereitungszyklen nicht beeinträchtigt wird, sofern die Vorgehensweise der Wiederaufbereitung stets konstant gehalten wird (siehe Bild 4.19) [KLOC14d]. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der Zuwachs an abrasivem Freiflächenverschleiß VB sowie der Kolktiefe KT des Neuwerkzeugs sowie des elfmalig aufbereiteten Werkzeugs nahezu gleiches Verhalten aufweist. Einen negativen Einfluss auf die Neigung zu Kolkverschleiß konnte bei dem elfmalig aufbereiteten Werkzeug ebenfalls nicht festgestellt werden. So versagte das Neuwerkzeug nach einer Standlänge von L = 11 m und das aufbereitete nach L = 16 m an Kolkverschleiß.

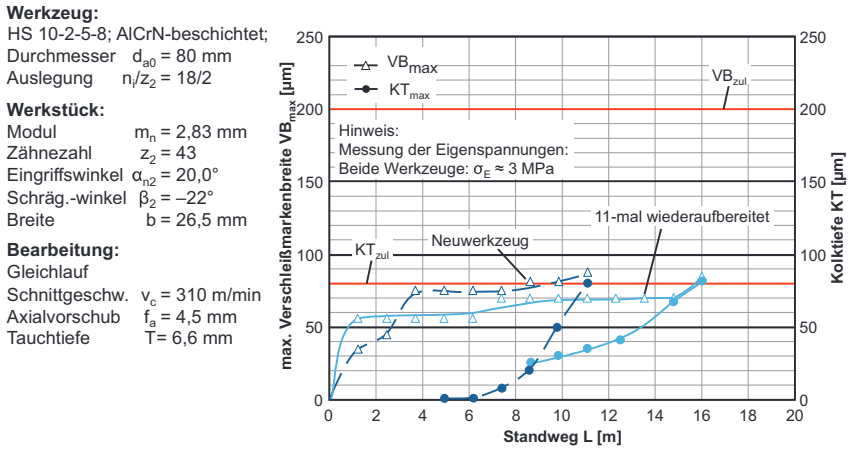

Bild 4.19 Werkzeugverschleißverlauf in Abhängigkeit von der Wiederaufbereitung [KLOC14d]

Zur Stabilisierung der Schneidkante kann eine gezielte Schneidkantenpräparation eingesetzt werden, um Schneidkantenausbrüche sowie plötzliche Verschleißanstiege zu vermeiden. Eine Schneidkantenpräparation beinhaltet eine definierte Verrundung der Schneidkante, wie es bei konventionellen Dreh- und Fräswerkzeugen häufig zum Einsatz kommt [DENK03a, DENK03b, SHAF00]. Die Werkzeugstandzeit beim Wälzfräsen kann ebenfalls durch gezielte Schneidkantenverrundungen erhöht werden. In [WINK05b] wird die erzielbare Werkzeugstandzeit für Hartmetallwälzfräser in Abhängigkeit von dem Schneidkantenradius untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass ein Schneidkantenradius von $\rho_s = 10 - 15\ \mu m$ zu einer Standzeiterhöhung von mehr als 120 % führen kann. Zur Präparation der Schneidkante von Werkzeugen kommen heute standardmäßig das Strahlen oder das Bürsten zum Einsatz [DENK03a, DENK03b].

4.2.3 Wälzverfahren

In wälzenden Fertigungsverfahren wird das Zahnprofil durch ein Abwälzen des Werkzeugs am Werkstück erzeugt (vgl. Abschnitt 2.1.2). Zur wälzenden Herstellung evolventischer Verzahnungen werden bevorzugt geradflankige Bezugsprofile eingesetzt, da sie effizient herstellbar und messbar sind. Das Abwälzen des Bezugsprofils am Werkstück führt zur Erzeugung der evolventischen Zahnflanke. Die Abwälzkinematik der relevantesten Verfahren zum Vorverzahnen ist in Bild 4.20 dargestellt und wird nachfolgend erläutert.

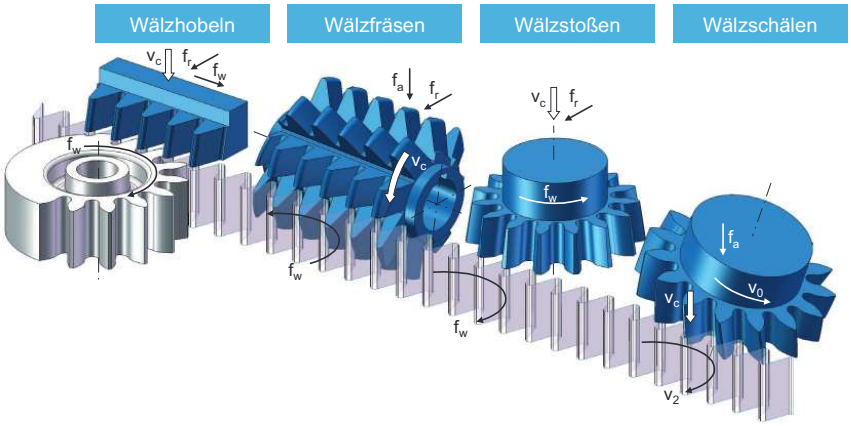

Bild 4.20 Wälzverfahren (das kinematisch erzeugte Bezugsprofil wälzt mit dem Werkstück ab)

4.2.3.1 Wälzhobeln

Das Wälzhobeln ist ein Verfahren zur Fertigung außenverzahnter Stirnräder. Entgegen der Benennung handelt es sich bei diesem Verfahren um einen Stoßprozess, bei dem die Schnittbewegung vom Werkzeug ausgeführt wird. Die Schneide des Hobelkamms hat die Form des Werkzeugbezugsprofils (vgl. Bild 4.14), sodass sich das Erzeugungsprinzip der Evolvente in diesem Prozess unmittelbar abbildet. Der Freiwinkel am Werkzeug wird so ausgeführt, dass verschlissene Werkzeuge durch ein Nachschleifen der Spanflächen aufbereitet werden können. Die resultierende Schneidkante ist im Anschluss an den Nachschliff gegenüber der ursprünglichen Schneide nach hinten versetzt. Dieser Versatz muss durch die Hobelmaschine nachgeführt werden.

Die Schnittgeschwindigkeit im Wälzhobelprozess wird durch eine geradlinige Bewegung parallel zur Zahnradmittelachse erzeugt (Bild 4.21), die als Arbeitshub bezeichnet wird. Nach dem Arbeitshub wird das Werkzeug radial vom Werkstück abgehoben und in seine Ausgangslage zurückgeführt. Zur Fertigung einer evolventischen Verzahnung wird neben der Hubbewegung eine Wälzbewegung durchgeführt (vgl. Abschnitt 2.2.1.5). Der Drehung des Werkstücks wird eine lineare Bewegung des Werkzeugs überlagert, indem abhängig vom eingesetzten Maschinenkonzept das Werkstück oder das Werkzeug verschoben wird [NN85]. Die sich aus Rotation und Translation ergebende Wälzbewegung wird durch eine Kopplung der Achsen synchronisiert. Da der Hobel-

kamm in der Regel über weniger Zähne als das Werkstück verfügt, muss dieser nach dem Durchwälzen in seine Ausgangslage zurückgeführt werden. Die Bewegung wird als Teilen oder auch Reversieren bezeichnet.

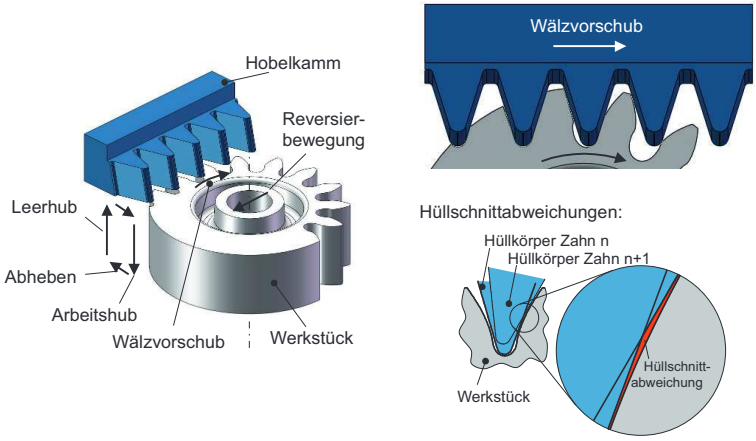

Bild 4.21 Herstellung evolventischer Verzahnungen durch Wälzhobeln

Im Wälzhobelprozess wird das evolventische Zahnflankenprofil durch Hüllschnitte angenähert. Die hieraus entstehenden Abweichungen von der idealen Zahnflanke werden als Hüllschnittabweichungen bezeichnet. Die Größe dieser Abweichungen wird durch den Wälzvorschub im Prozess bestimmt. Während der Prozess durch einen steigenden Wälzvorschub an Produktivität gewinnt, steigt gleichzeitig der Betrag der Hüllschnittabweichungen.

Das Werkzeug für das Wälzhobeln ist im Vergleich zu den Werkzeugen anderer Verfahren einfacher herzustellen. Dennoch wird das Wälzhobeln heute aufgrund seiner geringen Produktivität im Vergleich zu den Verfahren Wälzfräsen und Wälzstoßen nur noch in Sonderfällen angewendet. Da mit dem Verfahren sehr zähe sowie harte Werkstoffe verzahnt werden können, zählen zu diesen Sonderfällen große, auf einen hohen Festigkeitswert behandelte Zahnräder in der Einzel- und Kleinserienfertigung.

4.2.3.2 Wälzfräsen

Das Wälzfräsen ist aufgrund seiner hohen Produktivität das dominierende Verfahren für die Vorverzahnung von Stirnrädern. Es bietet neben der Herstellung zylindrischer Stirnräder die Möglichkeit der Fertigung von Beveloidverzahnungen und Schneckenrädern.

4.2.3.2.1 Prozesskinematik

Die Kinematik des Verfahrens kann durch das Abwälzen einer Schnecke an einem Schneckenrad beschrieben werden (vgl. Bild 4.22). Die Schnecke entspricht dem Werkzeug und das Schneckenrad dem Werkstück. Die Rotation von Werkzeug und Werkstück wird entsprechend dem Verhält-

nis der Zähnezahl des Werkstücks und der Anzahl der Schneckengänge auf dem Werkzeug synchronisiert. Hieraus ergibt sich ein festes Verhältnis der Schnittgeschwindigkeit v_c zur Werkstückdrehzahl n_2. Die abwälzende Bewegung wird im Prozess mit einer Vorschubbewegung überlagert.

$$v_c = n_0 \cdot \pi \cdot d_{a0} \tag{4.3}$$

und

$$n_0 = n_2 \cdot \frac{z_2}{z_0} \tag{4.4}$$

Bei der Betrachtung des Werkzeugeingriffs werden die Parallelen des Wälzfräsens zum Wälzhobeln sichtbar. Die Schneiden des Wälzfräsers sind vergleichbar zum Hobelkamm entsprechend dem Werkzeugbezugsprofil gestaltet (siehe Abschnitt 2.2.3.3). Die für die Erzeugung der Evolvente erforderliche Wälzbewegung wird beim Wälzfräsen aus der Kopplung der Werkzeuggeometrie und Rotation von Werkzeug und Werkstück realisiert.

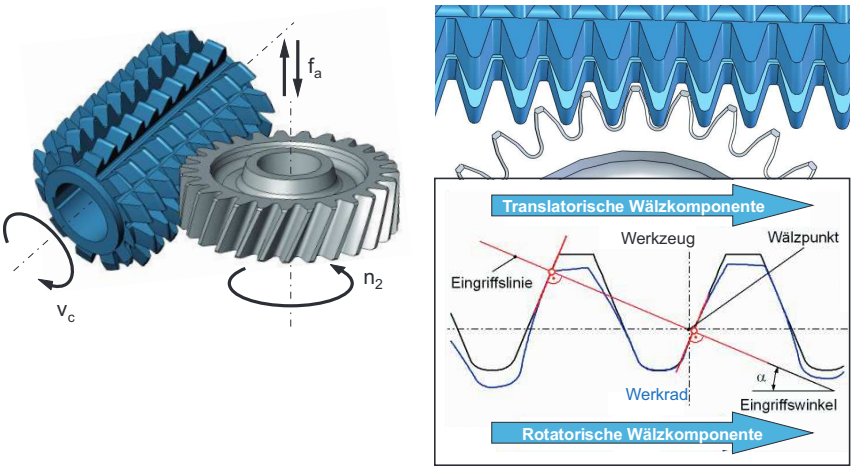

Bild 4.22 Herstellung evolventischer Zahnflanken durch Axialwälzfräsen

Im Prozess ist das Werkzeug um den Schwenkwinkel η gegen das Werkstück geneigt (Bild 4.23). Der Schwenkwinkel η entspricht bei einer gleichsinnigen Steigung von Schnecke und Verzahnung der Differenz aus dem Schrägungswinkel des Werkrads β_2 und dem Steigungswinkel des Werkzeugs γ_0. Bei einer gegensinnigen Ausrichtung entspricht der Schwenkwinkel der Summe der beiden Winkel (siehe Formel (4.5)).

$$\eta = \beta_2 \pm \gamma_0 \tag{4.5}$$

Das dominierende Wälzfräsverfahren ist das Axialwälzfräsen. In diesem Verfahren wird die Vorschubbewegung parallel zur Werkzeugmittelachse ausgeführt. Die Strecke, die während einer Werkstückumdrehung zurückgelegt wird, wird als Axialvorschub f_a bezeichnet. Im Axialwälzfräsprozess werden drei Prozessphasen unterschieden (Bild 4.23 rechts). Zu Prozessbeginn wird der Eintritts- oder Einlaufbereich durchfahren. In diesem Bereich bildet das Werkzeug zunehmend große Späne, bis sich der Arbeitsbereich des Werkzeugs vollständig im Werkstück befindet. Ab diesem Zeitpunkt werden bei jeder Werkzeugumdrehung Späne mit identischen Spanungsgeometrien erzeugt. Folglich befindet sich der Wälzfräser im Bereich des sogenannten Vollschnitts. Sobald der Eingriffsbereich des Werkzeugs die Werkstückoberkante erreicht, nimmt die Größe der erzeugten Späne kontinuierlich ab. Für diese Prozessphase wird vom Austritts- oder Auslaufbereich des Fräsers gesprochen. Neben einer axialen Vorschubstrategie werden ebenfalls radiale oder radial-tangentiale Vorschubstrategien realisiert, um Störkonturen in der Werkzeugbahn auszuweichen. Wird im Falle von Störkonturen ein radialer Anschnitt gewählt, können die Prozessparameter wie Schnittgeschwindigkeit und Vorschub angepasst werden, sodass keine erhöhte Belastung am Werkzeug hervorgerufen wird. Um die maximalen Spanungsdicken beim radialen Anschnitt zum axialen Anschnitt gleich zu halten, können verringerte Vorschübe um bis zu 50 % notwendig sein [NN76].

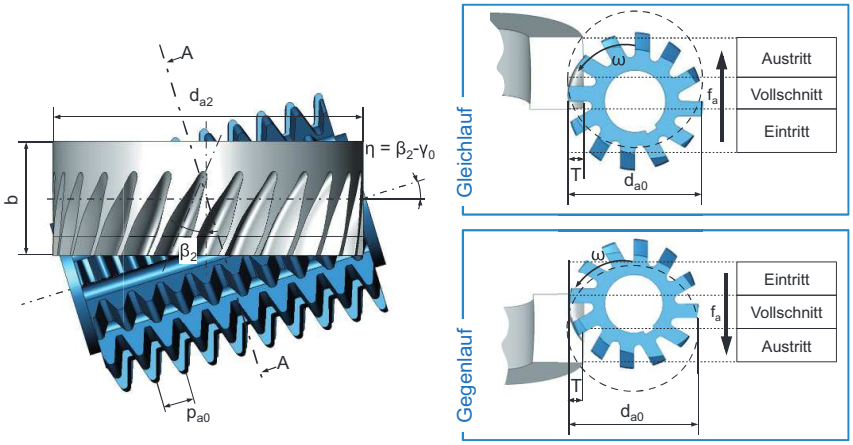

Bild 4.23 Bezeichnungen an der Paarung Wälzfräser – Werkrad

Liegt die Richtung des Axialvorschubs entgegen der Schnittrichtung, so wird von Gleichlauffräsen gesprochen. Sind die Richtung des Axialvorschubs und die Schnittrichtung gleich orientiert, so wird von Gegenlauffräsen gesprochen (siehe Bild 4.23 rechts). Die Bezeichnungen stammen vom Stirnumfangsfräsen auf Universalfräsmaschinen und werden auch für das Wälzfräsen genutzt. Während die Werkzeugschneide beim Gleichlauf den Schnitt am maximalen Spanquerschnitt initiiert, findet der Schnittbeginn beim Gegenlauffräsen am dünnen Spanende statt. Wird der Span am dicken Ende angeschnitten, so kann der Schnitt sofort initiiert werden. Der Span wird dann zum Schnittende hin dünner. Beim Gegenlauffräsen hingegen beginnt der Schnitt zunächst mit einem Gleiten, bis die geforderte Mindestspanungsdicke überschritten wird und die

Spanbildung einsetzt. Während des Schnittes nimmt die Spanungsdicke beim Gegenlauffräsen kontinuierlich zu. Das zu Schnittbeginn auftretende Reiben kann Schädigungen an der Werkzeugschneide und auf der Bauteiloberfläche hervorrufen. Durch den Anschnitt im Gegenlauf wird jedoch der Eingriffsstoß, wie er beim Gleichlauffräsen verstärkt auftreten kann, verringert [NN76].

Die resultierende Hauptzeit beim Wälzfräsen kann mithilfe der Prozess- und Geometriedaten nach Formel (4.6) berechnet werden [NN15a].

$$t_h = \frac{z_2 \cdot d_{a0} \cdot \pi \cdot (E + b + A)}{z_0 \cdot f_a \cdot v_c \cdot 100} \tag{4.6}$$

mit

$$E = \tan\eta \cdot \sqrt{T \cdot \left(\frac{d_{a0}}{\sin^2 \eta} + d_{a2} - T\right)} \tag{4.7}$$

und

$$A = l_{P0} \cdot \tan\beta_2 \tag{4.8}$$

4.2.3.2.2 Achsen und Aufbau einer Wälzfräsmaschine

Bild 4.24 zeigt die Gesamtansicht einer 6-Achsen-CNC-Walzfräsmaschine mit von der Werkzeugachse entkoppeltem Direktantrieb des Werkstücktisches. Die Realisierung der Wälzkopplung mit einem mechanisch gekoppelten Differenzialgetriebe hat in aktuellen Bauformen keine Bedeutung mehr. Eingezeichnet sind alle zum Wälzfräsen erforderlichen Maschinenachsen. Die Tauchtiefe des Fräsers wird durch die Radialvorschubachse X_1 vorgegeben, die Schrägstellung des Werkzeuges erfolgt über die Fräserschwenkachse A_1. Die Tangentialvorschubachse V_1 ermöglicht die Shift-Bewegung, d. h. die Verschiebung der Frässpindel auf dem Frässchlitten. Die eigentliche Wälzbewegung erfolgt durch Kopplung der Achsen von Fräserdrehung B_1, Tischdrehung C_1 und Axialvorschub Z_1. Die rechts in Bild 4.24 dargestellte Walzfräsmaschine ist für eine Nass- und Trockenbearbeitung geeignet. Die vertikale, ortsfeste Anordnung des Maschinentisches ist Voraussetzung für den geringen Platzbedarf der Maschinen. Der Antrieb der Tischdrehung C_1 kann über zwei verschiedene Bauformen realisiert werden. Zum einen kann ein geteiltes, zweistufiges Stirnradgetriebe mit einer spielfreien Vorspannung durch axiales Verschieben einer Zwischenwelle verwendet werden. Zum anderen werden Werkstücktische mit Direktantrieb eingesetzt. Für beide Bauformen kann zusätzlich ein Gegenhalter (Z_2-Achse) zur Abstützung von Wellen vorgesehen werden, welcher gleichzeitig das automatisierte Werkstückhandling ermöglicht, indem um den Ständer des Gegenhalters ein Werkstückwechsler rotiert [WECK05, NN85, NN76, NN14].

In Bild 4.24 ist rechts eine Wälzfräsmaschine dargestellt, die die Fertigung von Verzahnungen sowohl mit Schnellarbeitsstahl unter Öl als auch mit hochharten Schneidstoffen im Trockenschnitt ermöglicht. Der Fräskopf (B-Achse) und die Werkstückspindel (C-Achse) sind mit direktgetriebenen Antrieben versehen. Durch die vertikale Werkstückspindelanordnung fallen die Späne ungehindert auf den Späneförderer. Kurze Werkstücke können fliegend, das heißt ohne Gegenhalter aufgenommen werden. Lange Werkstücke werden zwischen Spitzen unter Zuhilfenahme der Z_2-Achse fixiert [NN14].

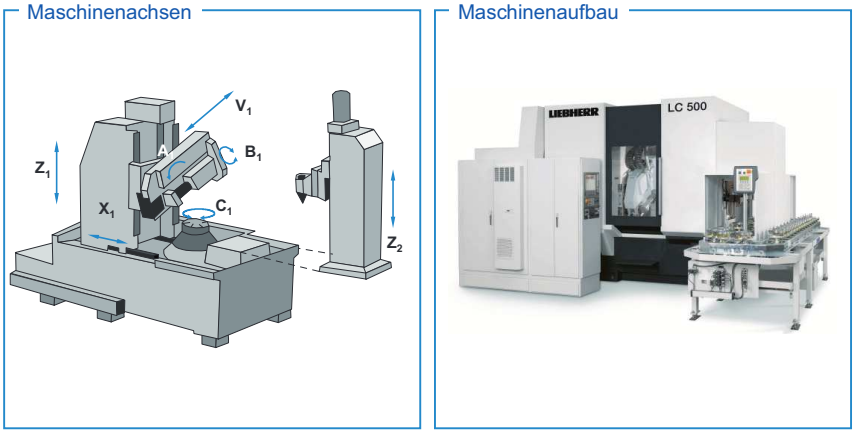

Bild 4.24 Aufbau einer Wälzfräsmaschine (exemplarisch nach Liebherr)

4.2.3.2.3 Werkzeuggeometrie und -gestaltung

Der Wälzfräser entspricht einer Schnecke, die durch Spannuten (Stollen) in einzelne Schneiden aufgeteilt ist (Bild 4.25). Die Anzahl der Schneckengänge wird als Gangzahl oder Werkzeugzähnezahl z_0 bezeichnet. Aus der Axialteilung des Werkzeugs p_{a0}, der Gangzahl und dem Fräser-Bezugsdurchmesser d_0 ergibt sich der Steigungswinkel des Werkzeugs γ_0 (siehe Formel (4.9)).

$$\tan \gamma_0 = \frac{p_{a0} \cdot z_0}{d_0 \cdot \pi} \tag{4.9}$$

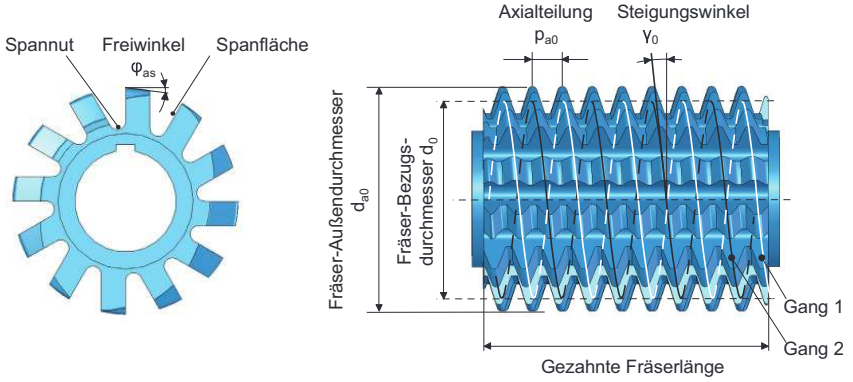

Bild 4.25 Geometrische Größen am Wälzfräser

Der Steigungswinkel ist zur Erzeugung der translatorischen Wälzkomponente erforderlich. Die Spannuten verlaufen entweder in Längsrichtung des Fräsers oder, bei Werkzeugen mit großen Steigungswinkeln, spiralförmig entlang des Fräsers. Die Anzahl der Spannuten wird als Stollenzahl oder Spannutenzahl n_i bezeichnet. Der Freiwinkel φ_{as} wird durch Hinterschleifen oder Hinterdrehen erzeugt. Es wird eine radiale Zustellung eines profilierten Werkzeugs einer Drehung des Wälzfräsers überlagert. Daraus resultiert eine Spiralform der Freiflächen. Dadurch bleibt das Bezugsprofil des Werkzeugs bei einem spanflächenseitigen Abschliff konstant. Lediglich der Werkzeugaußendurchmesser erfährt eine Veränderung. Aus diesem Zusammenhang werden eine wirtschaftliche Aufbereitung und der erneute Einsatz bereits verschlissener Werkzeuge ermöglicht.

Wälzfräser werden in verschiedenen Bauformen hergestellt. Diese können als Block-, Räumzahn- und Wendeschneidplattenwälzfräser ausgeführt werden (Bild 4.26). Die Blockwälzfräser werden vollständig aus dem eingesetzten Schneidstoff hergestellt. Die häufig aus Schnellarbeitsstahl oder Hartmetall gefertigten Blockzahnwälzfräser werden bevorzugt im kleinen und mittleren Modulbereich eingesetzt, da in dieser Baugröße diese Art der Fertigung am wirtschaftlichsten ist.

Bild 4.26 Bauarten von Wälzfräsern [NN15a]

Der Zahnkopfbereich des Werkzeugs wird im Wälzfräsprozess stärker belastet als der Flankenbereich, woraus ein lokaler Verschleiß in diesem Bereich resultiert. Um das Potenzial des Schneidstoffs über dem ganzen Werkzeugprofil gleichmäßiger ausnutzen zu können, wurden Räumzahnwälzfräser entwickelt. Räumzahnwälzfräser verfügen neben den Profilschneiden über zusätzliche Kopfschneiden. Da die Spannuten der Kopfschneiden flacher ausgeführt werden, sind in dieser Bauform größere Stollenzahlen möglich als bei einem konventionellen Blockwälzfräser. Dadurch kann bei einer vergleichbaren Werkzeugbelastung deutlich produktiver zerspant werden. Räumzahnwälzfräser sind bei großen zerspanten Volumina wirtschaftlich und werden meist für Verzahnungen ab einem Modul von etwa $m_n = 6$ mm eingesetzt und aus Schnellarbeitsstahl hergestellt.

Eine neuere Entwicklung stellen Wendeschneidplattenwälzfräser dar. Sie bestehen aus einem Stahlgrundkörper und aufgeschraubten Hartmetall-Wendeschneidplatten. Diese Bauform ermöglicht den wirtschaftlichen Einsatz von Hartmetall bei großen Werkzeugdurchmessern, ohne den Schneidenträger aus Hartmetall ausführen zu müssen. Der Einsatz von Hartmetall erlaubt das Wälzfräsen bei hohen Schnittgeschwindigkeiten. Das Lückenprofil wird auf mehrere Schneidplatten aufgeteilt. Die Aufbereitung verschlissener Werkzeuge erfolgt bei diesen Werkzeugen über einen Wechsel der Schneidplatten, was in der Regel direkt beim Anwender der Werkzeuge erfolgen kann. Für die Erzielung einer guten Vorverzahnqualität ist eine auf den Anwendungsfall abgestimmte Montagestrategie der Schneidplatten von Bedeutung.

Insbesondere für das Vorverzahnen von Großverzahnungen ist das Wälzfräsen mit einem Wendeschneidplattenwälzfräser eine wirtschaftliche Alternative. Standzeitbegrenzend ist aufgrund der erhöhten Belastung in der Regel die Kopfplatte. Eine geeignete Schnittaufteilung sowie ein für den Spanfluss optimierter Spanraum sind entscheidend für den erfolgreichen Einsatz dieses Werkzeugkonzepts [KLOC15d].

Die Genauigkeit der Geometrie von Wälzfräsern wird nach DIN 3968 in verschiedene Güteklassen unterteilt. Diese Güteklassen lassen sich heute in AA, A, B, C und D unterteilen, wobei AA die geringsten und D die größten Toleranzen zulässt. Die Toleranzen beziehen sich auf nahezu alle messbaren geometrischen Größen an einem Wälzfräser. In Abhängigkeit von der gewählten Güteklasse und dem Modul sind vorgegebene Toleranzen einzuhalten [DIN60]. Verschiedene Werkzeughersteller bieten heute Wälzfräser an, die mit der Güteklasse AAA versehen sind [NN15a]. Die Klasse AAA weist einen nochmals verkleinerten Toleranzbereich auf. Die nochmals verringerten Toleranzbereiche sind heute in keiner Norm hinterlegt.

4.2.3.2.4 Spangeometrie und Bauteilabweichungen

Durch die abwälzende Kinematik entstehen im Wälzfräsprozess abhängig von der Axialposition der Schneide auf dem Fräser verschiedene Spanformen. Für einen Beispielprozess sind die charakteristischen Spanformen sowie die aktiven Schneidenbereiche in Bild 4.27 dargestellt. Der Bereich des Fräsers, in dem Späne gebildet werden, wird als Arbeitsbereich l_{A0} bezeichnet, der in einen Profilierungsbereich l_{P0} und einen Vorschneidbereich l_{AZ} unterteilt wird. Während im Profilierungsbereich die eigentliche Form der Zahnflanke im abschließenden Schnitt erzeugt wird, wird im Vorschneidbereich der Großteil des Lückenvolumens zerspant [WINK05b]. Die Späne werden häufig an mehreren Werkzeugflanken gleichzeitig gebildet. In diesem Fall sind große Verformungen der Späne festzustellen, die auf Spanablaufbehinderungen im Bereich der Schneidenecken zurückgeführt werden [BOUZ81].

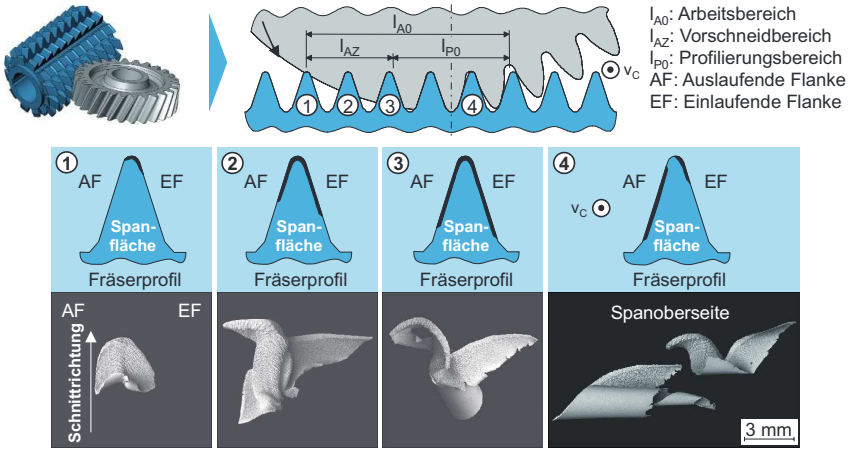

Bild 4.27 Charakteristische Spanformen beim Wälzfräsen [WINK05b]

Die Auslegung des Wälzfräsprozesses unterliegt verschiedenen Restriktionen. Beispielsweise muss gewährleistet sein, dass das eingesetzte Werkzeug die notwendige Standzeit erzielt. Die Standzeit hängt von den auf den Wälzfräser wirkenden Belastungen ab. Um eine Abschätzung der in dem Prozess auftretenden Belastungen geben zu können, wurden von [HOFF70] Näherungsformeln für die Berechnung der maximalen Spanungsdicke (Formel (4.10)) sowie der Schnittbogenlänge (Formel (4.11)) entwickelt. Auf Grundlage der Kenntnis der auf die Fräserschneide erwarteten Belastung aus Spanungsdicke und -länge muss ein geeignetes Schneidstoff-Schicht-System gewählt werden, wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert wird.

Maximale Spanungsdicke:

$$h_{cu,max} = 4{,}9 \cdot m_n \cdot z_2^{(9{,}25\cdot10^{-5}\cdot\beta_0 - 0{,}542)} \cdot e^{(-0{,}015\cdot\beta_0)} \cdot e^{(-0{,}015\cdot x_p)} \cdot \left(\frac{d_{a0}}{2\cdot m_n}\right)^{(-8{,}25\cdot10^{-3}\cdot\beta_0 - 0{,}225)} \cdot \left(\frac{n_{i0}}{z_0}\right)^{-0{,}877} \cdot \left(\frac{f_a}{m_n}\right)^{0{,}511} \cdot \left(\frac{T}{m_n}\right)^{0{,}319} \tag{4.10}$$

Maximale Schnittbogenlänge:

$$l_{cu,max} = 3{,}081 \cdot m_n \cdot e^{(-0{,}032\cdot\beta_0)} \cdot \left(\frac{d_{a0}}{2\cdot m_n}\right)^{0{,}336} \cdot n_{i0}^{-0{,}036} \cdot \left(\frac{f_a}{m_n}\right)^{(-4{,}25\cdot10^{-4}\cdot\beta_2^2 + 0{,}026\cdot\beta_0 - 0{,}04)} \cdot \left(\frac{T}{m_n}\right)^{0{,}262} \tag{4.11}$$

Neben den geometrischen Größen lassen sich die Spanbildung und -geometrie durch die Prozessparameter beeinflussen. Die Haupteinstellgrößen sind die Schnittgeschwindigkeit und der Axialvorschub. Zur Festlegung der beiden Größen muss das eingesetzte Schneidstoff-Werkstoff-System bekannt sein. Zur Bearbeitung üblicher Einsatzstähle kommen PM-HSS sowie Hartmetall-Werkzeuge zum Einsatz, bei denen die Wahl der Prozessparameter unterschiedlich erfolgt. Der Schnittgeschwindigkeitsbereich, bei dem im industriellen Umfeld Werkzeuge aus PM-HSS eingesetzt werden, liegt bei $v_c = 120 - 300$ m/min [HIPK12]. Die maximalen Spanungsdicken bei diesem Schneidstoff-Werkstoff-System können bis zu $h_{cu,max} = 250$ µm betragen, was über den Axialvorschub eingestellt werden kann [HOFF70]. Bei dem Einsatz von Hartmetallwerkzeugen zum Wälzfräsen von Verzahnungen aus Einsatzstählen liegt mit $v_c = 250 - 400$ m/min der übliche Schnittgeschwindigkeitsbereich höher. Aufgrund der höheren Sprödigkeit des Schneidstoffes sollten dabei maximale Spanungsdicken um $h_{cu,max} = 150$ µm nicht überstiegen werden. Bei der Zerspanung von höherfesten Stählen müssen die Prozessparameter entsprechend der zu erwarteten Belastung verringert werden, um einen frühzeitigen Werkzeugausfall zu vermeiden.

Zudem ist eine definierte Bauteilqualität sicherzustellen. Zum einen kann in die zulässige Geometrieabweichung und zum anderen die Oberflächenbeschaffenheit unterteilt werden. Bedingt durch das Werkzeug und die Kinematik weichen die im Wälzfräs- sowie im Fertigwälzfräsprozess erzeugten Oberflächen von der idealen Form ab (vgl. Abschnitt 2.1.3). Eine Unterteilung wird nach Vorschubmarkierungstiefe δ_x und Hüllschnittabweichungstiefe δ_y vorgenommen (siehe Bild 4.28). Vorschubmarkierungen entstehen aufgrund der Vorschubbewegung des Werkzeuges in Axialrichtung des Werkstücks. Der Axialvorschub f_a entspricht dem Weg, den der Wälzfräser während einer Umdrehung des Werkstücks in axialer Richtung des Bauteils zurücklegt. Diese Vorschubmarkierungstiefe δ_x tritt in Zahnflankenrichtung auf und kann nach Formel (4.12) berechnet werden.

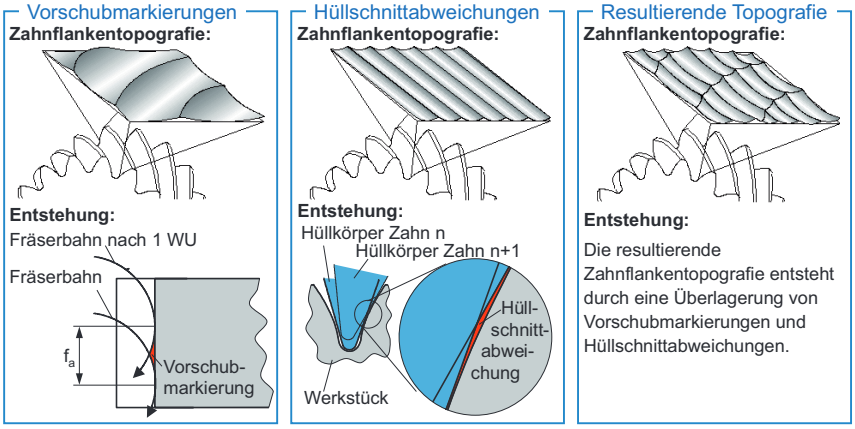

Bild 4.28 Hüllschnittabweichungen und Vorschubmarkierungen beim Wälzfräsen

$$\delta_x = \left(\frac{f_a}{\cos\beta}\right)^2 \cdot \frac{\sin\alpha_n}{4 \cdot d_{a0}} \tag{4.12}$$

Hüllschnittabweichungen resultieren aus der charakteristischen Prozessführung, dem Abwälzen der Zahnflanke mit einem durch Spannuten unterbrochenen Werkzeug. Die Evolvente wird somit durch einzelne Abschnitte angenähert. Die Tiefe der Hüllschnittabweichungen δ_y kann nach Formel (4.13) näherungsweise ermittelt werden

$$\delta_y = \frac{\pi^2 \cdot m_n \cdot {z_0}^2 \cdot \sin\alpha_n}{4 \cdot {n_i}^2 \cdot z_2} \tag{4.13}$$

Neben den prozessbedingten geometrischen Abweichungen treten beim Wälzfräsen Oberflächendefekte auf, die wie in Bild 4.29 dargestellt erscheinen können. Umfangreiche Untersuchungen zum Auftreten der Oberflächendefekte beim Wälzfräsen wurden in [STUC14] durchgeführt.

Bild 4.29 Oberflächendefekte auf Zahnflanken [STUC14]

Die Defektarten werden in Primär-, Sekundär- und Tertiärdefekte unterteilt. Dabei beschreibt das Auftreten von Primärdefekten die Schädigung der Zahnflanke, welche unmittelbar aus der Zerspanung resultiert. Zur Verringerung dieser Defektart sind nach [STUC14] die Verringerung des Spanvolumens sowie der Einsatz von Kühlschmierstoffen mögliche Maßnahmen. Der Begriff Sekundärdefekte umfasst Bereiche auf der schon fertig bearbeiteten Flanke, die durch das Auftreffen des in der Bildung befindlichen Spans geschädigt werden. Ein möglicher Ansatz zur Verringerung von Sekundärdefekten ist die Anpassung der Prozessauslegung hinsichtlich der Bildung möglichst symmetrischer Spanungsgeometrien, um das Spanablaufverhalten positiv beeinflussen zu können. Als dritte Defektart, die Tertiärdefekte, werden Späne bezeichnet, welche schon vollständig abgetrennt wurden, wieder in den Eingriff gelangen und auf einem Bereich der Bauteilflanke aufgeschweißt werden. Die letztgenannte Defektart führt infolge der größten geometrischen Abweichungen zur Zielgeometrie zu der deutlichsten Beeinflussung der Prozessstabilität nachfolgender Fertigungsschritte [STUC14].

Durch die verschiedenen Spanformen werden die Schneiden des Werkzeugs jeweils unterschiedlich belastet. Damit verbunden ist ein bevorzugter Verschleiß einzelner Schneidenbereiche gemäß der lokalen Schneidkantenbelastung. Um die Belastung der Schneiden gleichmäßiger auf das Werkzeug zu verteilen, wird der Fräser nach jedem gefertigten Bauteil entlang seiner Mittelachse verschoben. Das Verfahren wird als Shiften bezeichnet. Zur Gewährleistung möglichst hoher Standlängen der Werkzeuge sollte der Shiftbereich möglichst groß gewählt werden. Der mögliche Shiftbereich ergibt sich aus der gezahnten Fräserlänge und den Arbeitsbereichen des Fräsers (Bild 4.30).

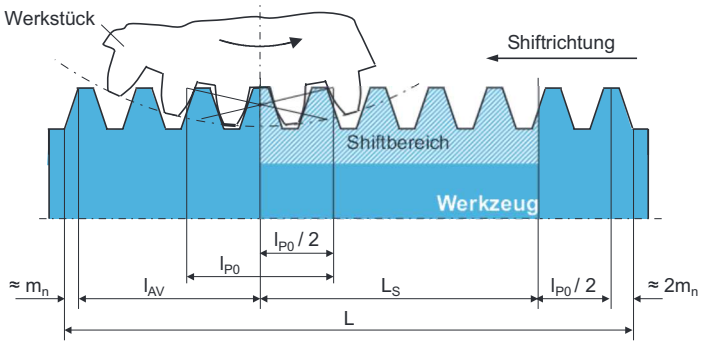

Bild 4.30 Shiftbereich am Wälzfräser [ABLE03, NN15a, NN76]

Für den Shiftvorgang werden verschiedene Strategien eingesetzt (Bild 4.31). Beim konventionellen Shiften wird das Werkzeug nach jedem gefertigten Werkstück um einen definierten Betrag versetzt. Der Versatz wird so gewählt, dass das Werkzeug nach einem Durchgang das Standzeitende erreicht und entsprechend Bild 4.31 n Werkstücke bearbeitet hat. Eine weitere Möglichkeit ist das Multizyklus-Shiften, wonach die Shiftsprünge größer gewählt werden. Hat das Werkzeug das Ende des Shiftbereichs nach n Bauteilen erreicht, erfolgt ein weiterer Shiftdurchgang, beginnend mit dem Bauteil $n+1$, mit einem versetzten Ausgangspunkt. Die erzeugte Werkstückanzahl bis zum Standzeitende des Werkzeugs gibt die Auslegung der Shiftstrategie vor. Ein Vorteil dieser

Shiftvariante ist eine gleichmäßigere Erwärmung des Werkzeugs, wodurch das Risiko einer thermischen Überlastung reduziert wird.

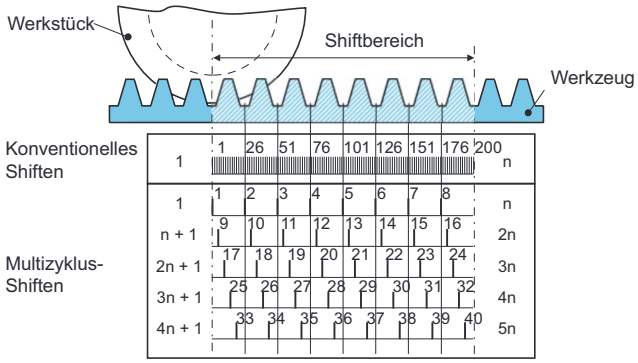

Bild 4.31 Shiftstrategien beim Wälzfräsen

4.2.3.2.5 Prozessanalyse im Modellversuch

Ein maßgebliches Kriterium für die Prozessproduktivität ist die Standzeit eines Werkzeugs. Für die Untersuchung des Standzeitverhaltens im Wälzfräsprozess wird aufgrund der hohen Schneidenanzahl und der resultierenden hohen Standzeiten der Werkzeuge eine hohe Anzahl von Werkstücken und Werkzeugen benötigt. Aus diesem Grund wurden Modellprozesse entwickelt, die eine Abbildung der Spanungsgeometrien aus dem Wälzfräsprozess an einem einzelnen Fräserzahn ermöglichen [HOFF70]. Das Analogieverfahren zum Wälzfräsprozess wird als Schlagzahnversuch bezeichnet. Durch die Reduktion des Werkzeugs auf einen Zahn reduzieren sich im Gegensatz zum Prozess mit einem vollen Wälzfräser die Untersuchungskosten deutlich.

Im Schlagzahnversuch werden alle im Wälzfräsprozess gebildeten Späne an einem einzelnen Fräserzahn erzeugt (Bild 4.32). Die Wälzkopplung zwischen Werkzeug und Werkstück wird entsprechend dem abzubildenden Wälzfräsprozess eingestellt. Der Fräser wird in eine Ausgangsposition gebracht, die entsprechend dem Anfang des Arbeitsbereichs des Wälzfräsers an seiner einlaufenden Seite festgelegt wird. Nach der Zustellung auf die Tauchtiefe im Wälzfräsprozess **(1)** wird der Schlagzahn tangential über den Arbeitsbereich des Wälzfräsers geshiftet **(2)**. In jeder Lücke bildet der Schlagzahn jeweils alle Wälzstellungen des Werkzeugs ab. Nach dem Durchlaufen des Arbeitsbereichs wird das Werkzeug wieder in seine Ausgangslage gebracht **(3)**. Im Folgenden wird das Werkzeug um den Axialvorschub entlang der Werkstückmittelachse versetzt **(4)** und der beschriebene Prozess wiederholt.

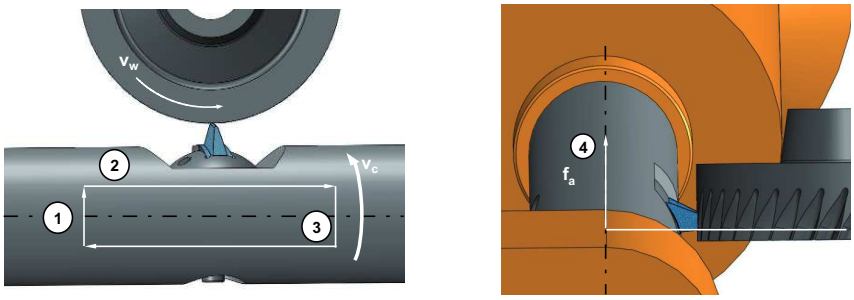

Bild 4.32 Der Schlagzahnversuch

Um eine möglichst einheitliche Grundlage der Versuchsergebnisse beim Wälzfräsen zu gewährleisten, wurde der Standard-Schlagzahnversuch definiert. Bei diesem Prozess wird der Schlagzahnversuch bei einer festgelegten Geometrie von Werkstück und Werkzeug durchgeführt. Bild 4.33 zeigt die Daten der vorgesehenen Paarung aus Werkstück und Werkzeug. Standardmäßig wird ein schräg verzahntes Stirnrad mit einem Normalmodul von $m_n = 2{,}557$ mm, abgeleitet aus dem Nutzfahrzeugbereich, verwendet. Die Zähnezahl liegt bei $z_2 = 39$ Zähnen. Weiterhin sieht die Auslegung vor, dass das Schlagzahnwerkzeug einen Wälzfräser mit einem Außendurchmesser von $d_{a0} = 80$ mm abbildet. Das zweigängige Werkzeug weist dabei eine Spannutenzahl von $n_i = 16$ auf. Mithilfe dieses Versuches können unterschiedliche Prozessauslegungen sowie Werkstoff-Schneidstoff-Kombinationen untersucht und mit umfangreichen vorhandenen Ergebnissen verglichen werden. Sofern spezielle Auslegungen eine Abwandlung der Geometrie von Werkzeug oder Werkstück verlangen, kann dies unter genauer Angabe erfolgen.

Werkstück:

Modul	$m_n = 2{,}557$ mm
Zähnezahl	$z_2 = 39$
Eingriffswinkel	$\alpha_{n2} = 17{,}5°$
Schräg.-winkel	$\beta_2 = 23°$
Breite	b = 30 mm
Durchmesser	$d_{a2} = 116{,}2$ mm

Werkzeug:

Schlagzahnwerkzeug	
Durchmesser	$d_{a0} = 80$ mm
Auslegung	$n_i/z_0 = 16/2$

Bild 4.33 Werkstück-Werkzeug-Kombination des Standard-Schlagzahnversuchs

Eine Reihe von Untersuchungen belegt die Überführbarkeit der im Schlagzahnprozess ermittelten Effekte auf den Wälzfräsprozess, sodass diese Form des Analogieprozesses in der Forschung zum Wälzfräsen etabliert ist [STUC14, WINK05b]. Bild 4.34 zeigt den Vergleich erzielter Standlängen des Schlagzahnversuchs und des realen Wälzfräsversuchs bei Einsatz eines vollständigen Werkzeuges. Während der Untersuchungen wurden das Hartmetallsubstrat sowie die maximale Spanungsdicke variiert, um eine breite Vergleichsbasis zur Verifizierung des Schlagzahnversuchs zum Wälzfräsen zu erhalten. Die Ergebnisse zeigen stets eine erhöhte Standlänge bei den Versuchen, welche im Schlagzahnprozess durchgeführt wurden. Jedoch lassen sich gleiche Trends