

1

Einleitung

In allen hygienerelevanten Industriebereichen ist die reinigungsgerechte Gestaltung von Apparaten und Anlagen eine grundlegende Voraussetzung, um Produkte kontaminationsfrei und den Anforderungen des Verbraucherschutzes entsprechend produzieren zu können. Als Voraussetzung muss deshalb neben allgemein üblichen Konstruktions- und Designregeln sowohl bei der Detailkonstruktion als auch bei der Gestaltung von Bauteilen, gesamten Maschinen und Apparaten bis hin zu Anlagen einschließlich ihres Umfelds Hygienic Design realisiert werden, um hygienische und leicht reinigbare Verhältnisse zu schaffen. Grundlagen über Einflüsse, Problembereiche sowie Werkstoffe und Gestaltungsmaßnahmen sind in [1] ausführlich dargelegt.

In der Praxis werden Hygieneanforderungen meist auf Prozessbereiche bezogen. Aus diesem Grund hat die „European Hygienic Engineering and Design Group“, früher „European Hygienic Equipment Design Group“ (EHEDG) eine Unterscheidung getroffen, nach der Prozesse als „geschlossen“ [2] bzw. „offen“ [3] bezeichnet werden. Bei einem geschlossenen Prozess findet die Produktverarbeitung gemäß Abb. 1.1 im Inneren eines Apparats oder einer Anlage statt. Produkte und Produktionshilfsmittel werden in die Anlage ein- bzw. ausgeschleust, indem das gleiche Hygieneniveau hergestellt wird. In der Biotechnik wird der Begriff „geschlossenes System“ in [4] definiert. Es wird als System bezeichnet, „*in dem eine Schranke Mikroorganismen bzw. Organismen von der Umgebung trennt*“. Als Schranke dienen dabei die Innenwände der gesamten Anlage, die zudem dicht sein müssen.

Einem offenen Prozess ist entsprechend der Prinzipdarstellung nach Abb. 1.2 ein Apparat oder eine Anlage zugeordnet, die während der Produktherstellung und der Reinigung zur Umgebung hin offen ist. In der Biotechnologie bezeichnet ein offenes System [4] „*eine Anlage oder ein Gerät, bei dem es keine Schranke zwischen den zu bearbeitenden Mikroorganismen und der Umgebung gibt*“. Damit ist eine Kreuzkontamination aus dem Prozessumfeld oder in umgekehrter Richtung entweder während der Produktion oder während und nach der Reinigung möglich, wenn nicht von vornherein gleiche Hygienestufen innerhalb der Prozessanlage und im Einflussbereich des Umfelds vorliegen. Dies wiederum hat zur Folge, dass sowohl die Prozessanlage als auch der relevante Bereich der Umgebung als Produktbereich zu definieren und entsprechend hygienegerecht zu gestalten sind.

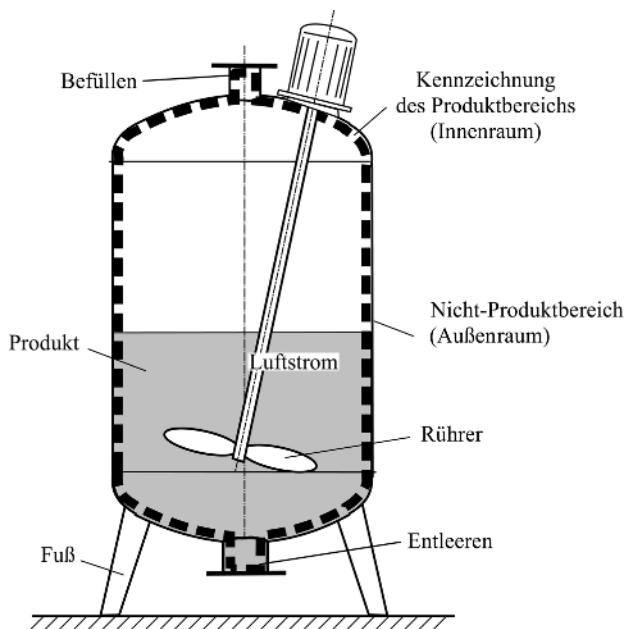


Abb. 1.1 Hygienerelevanter Konstruktionsbereich bei einem geschlossenen Prozess (Beispiel: geschlossener Behälter).

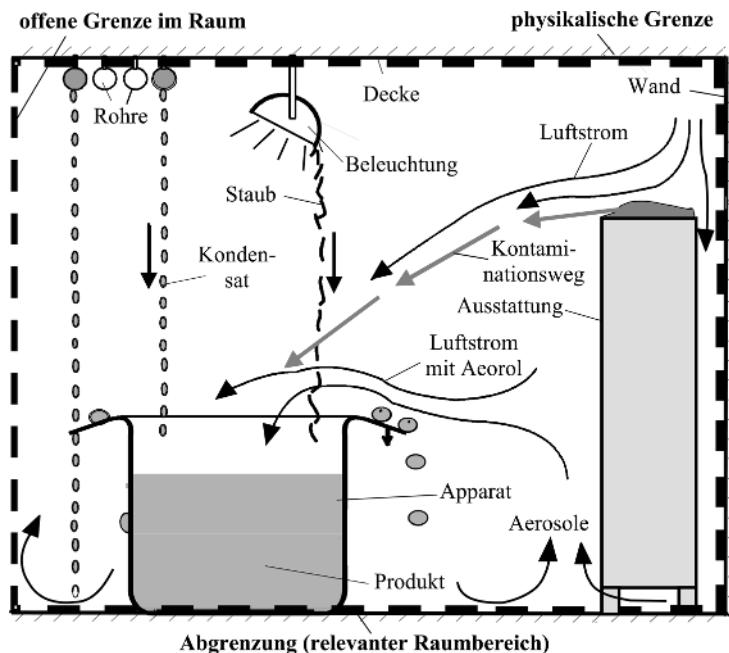


Abb. 1.2 Prinzip, Kontrollbereich und Kontaminationsrisiken eines offenen Prozesses.

Auch wenn verschiedentlich zwischen „direkt“ und „indirekt“ produktberührten Flächen und Bereichen gesprochen wird, sind sie nach denselben hygienischen Prinzipien und Aspekten zu gestalten, wenn sie ein Kontaminationsrisiko bedeuten. Deshalb sollte grundsätzlich die prinzipielle Abgrenzung des Produktbereichs entsprechend der EHEDG-Definition nach [3] vorgenommen werden, die konkret durch eine Risikoanalyse, Qualifizierung bzw. Validierung verifiziert wird.

Neben der Definition der Prozessart stellt das Risiko durch die Art des Schmutzes, der durch Reinigung zu entfernen ist, einen entscheidenden Hygieneaspekt dar. In *Trockenbereichen*, wo das Wachstum von Mikroorganismen ausgeschlossen werden kann, ist es erheblich geringer als in *nassen Zonen*, wo Wachstum und Vermehrung von Mikroorganismen sowie Entstehung von Biofilmen eine starke Belastung bedeuten.

Als weiterer Einfluss ist die Gewichtung des Hygienerisikos aufgrund der konstruktiven Gestaltung zu berücksichtigen, die im Rahmen eines Hygienekonzepts für den gesamten Anlagenbereich vorzunehmen ist. Beispielsweise ergeben sich im Detailbereich erfahrungsgemäß durch nicht reinigbare Spalte, unzugängliche Ecken, Totzonen, nicht entleerbare Bereiche und andere Problemzonen häufig wesentlich höhere Risikopotenziale als an durchgehenden, meist ausreichend glatt hergestellten, großen Oberflächen.

Im Folgenden sollen zunächst Aspekte der Detailgestaltung diskutiert werden, die die Grundlagen aller Apparate und Anlagen bilden. Dabei wird lediglich im Überblick auf wesentliche Gestaltungsaspekte eingegangen. Eine ausführliche Darstellung der elementaren Konstruktionselemente wird in [1] gegeben. Die weiteren Bereiche dieses Buches umfassen Komponenten von geschlossenen Prozessen, Beispiele von offenen Prozessen, Einflüsse durch die Prozessumgebung bis hin zum Design von Gesamtanlagen und deren Umfeld.

Dabei soll vor allem auf hygienische Problemstellen hingewiesen und vorhandene Lösungen als Stand der Technik aufgezeigt werden. Wie Erfahrung und Entwicklung zeigen, entstehen unterschiedliche innovative Konstruktionen, wenn Konstrukteure die Anforderungen an Hygienic Design verinnerlicht haben und in die Praxis umsetzen. Außerdem zieht der Anstoß neuer Gestaltungsmaßnahmen eines Teilbereichs oder ganzer Apparategruppen weitere Neukonstruktionen nach sich.

1.1 Oberflächen

Im Rahmen der Detailkonstruktion sollte zunächst zusammen mit der Werkstoffwahl die Oberflächenqualität als grundlegendes Element von Hygienic Design diskutiert werden. Dabei sind besondere Anforderungen an das Verschmutzungsverhalten, die Reinigbarkeit und das Risiko von Rekontaminationen *produktberührter Oberflächen* zu stellen. Aber auch der sogenannte *Nicht-Produktbereich* ist in Betrieben mit Hygieneanforderungen gut reinigbar zu gestalten und sauber zu halten, obwohl er aufgrund geringerer Hygienerelevanz nicht den gleichen konstruktiven Status erreichen muss.

1.1.1

Produktberührte Oberflächen

Sowohl Korrosionsbeständigkeit, Haftvermögen von Mikroorganismen, Anhaftungen von Produktresten und -belägen, Aufbau von Krusten sowie Entstehung von Biofilmen als auch das Reinigungsverhalten in Bezug auf das Ablösen und Entfernen von Verschmutzungen hängen von den Eigenschaften des Werkstoffs und dessen Oberflächenqualität ab. Problematisch ist, dass diese meist nur einen Anfangs- oder Ausgangszustand darstellt, der sich im Lauf der Zeit während der Produktion durch mechanischen Verschleiß, chemischen Angriff, Alterungsprozesse – vor allem bei Kunststoffen – und andere Effekte verändert und zwar meist verschlechtert. Grundsätzlich bestimmen Vorgaben durch gesetzliche Anforderungen, Leitlinien, Normen oder betriebsinterne Erfahrungen die zu realisierende Oberflächenqualität. Dabei wird ihr häufig in der Praxis ein zu hoher Stellenwert zugeschrieben, der erst dann zu rechtlfertigen ist, wenn andere Konstruktionselemente mit höheren Kontaminationsrisiken hygienegerecht gestaltet sind.

1.1.1.1 Feinstruktur von produktberührten Oberflächen

Grundsätzlich ist die Wahl der Oberflächenqualität sowohl ein Aspekt der Hygiene als auch ein entscheidender wirtschaftlicher Aspekt. Sowohl die Minimierung der Verschmutzung als auch die Optimierung des Reinigungsvorgangs spielen für beide Gesichtspunkte eine wesentliche Rolle. An der Oberfläche anhaftende, schwer entfernbare Substanzen sind ganz allgemein organische und anorganische Substanzen in Submikrongröße, wie z. B. Mikroorganismen, Proteine, Fettbeläge, zelluläre Reststücke aus Produkten, krustenbildende Stoffe sowie Kalk- oder Steinablagerungen. In trockenen Prozessen stellen feinste Partikel aus Pulvern den Schmutzanteil, die sowohl organischer als auch anorganischer Natur sein können. Die geforderte leichte Reinigbarkeit und eventuell Sterilisierbarkeit von Oberflächen lässt sich nur dann erreichen, wenn Materialkenngrößen zur Verfügung stehen, die die Reaktionen an den Grenzflächen beim Verschmutzen und Reinigen ausreichend wiedergeben [5–7].

Als Beurteilungsmaßstab wird zurzeit meist nur der Mittenrauwert R_a gemäß

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1)$$

nach DIN EN ISO 4287, Teil 1 [8], mit der Messlänge l und dem Rauheitsprofil $Z(x)$ für eine geeignete Tastschnittmessung der Oberfläche herangezogen. Ausgehend von Edelstahloberflächen wird z. B. ein Höchstwert von $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ gefordert [9]. Ein entscheidender Grund ist, dass bei Wahl solcher Rauheitsverhältnisse die Abmessungen von Mikroorganismen, von denen die größte Kontaminationsgefahr ausgeht, in der gleichen Größenordnung wie die Rauheiten selbst liegen. Sie sind damit einem chemischen Angriff durch Reinigungsmittel gemäß Abb. 1.3 direkt zugänglich und nicht in enge Rauheitstälern eingebettet. Ein zweite

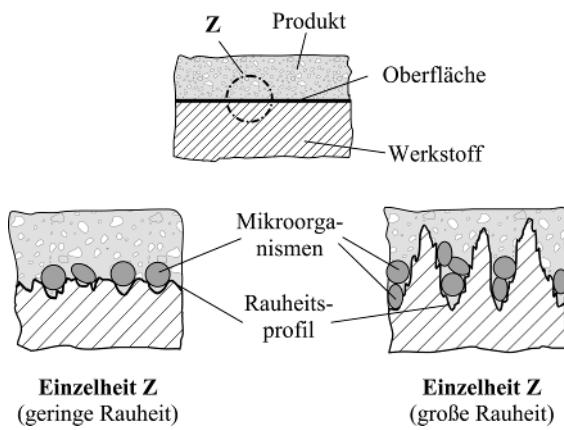


Abb. 1.3 Prinzipielle Darstellung der Größenordnung von Rauheiten und Mikroorganismen bezüglich der Relevanz für die Reinigbarkeit.

Begründung betrifft die Tatsache, dass kaltgewalzte Edelstahlbleche und -bänder als Hauptkonstruktionselemente des Apparatebaus diese Rauheitsanforderungen erfüllen und sich in der Praxis als leicht reinigbar erweisen. Bezeichnung von Oberflächen für Fertigerzeugnisse aus rostfreiem Edelstahl, wie Bleche, Bänder, nahtlose und geschweißte Rohre sind nach DIN EN 10 088-2 [10] festgelegt.

Für die Milchindustrie waren für produktberührte Oberflächen und Schweißnähte abgestufte Werte nach DIN 11 480 gemäß Tabelle 1.1 [11] festgelegt. Die Norm soll allerdings im Mai 2008 zurückgezogen werden. In der Steriltechnik sowie in der Pharmaindustrie werden oft noch kleinere Rauheitswerte im Bereich von $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ bis $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ – häufig verbunden mit einer Behandlung durch Elektropolieren – gefordert. Grundlage dafür ist zum einen das zurückgezogene VDMA-Einheitsblatt 24432 [12] sowie die Empfehlungen nach DIN 11 866 [13] gemäß Tabelle 1.2.

Wichtige Erkenntnisse in Bezug auf das Reinigungsverhalten von Oberflächen, die durch Einzelpartikel verschmutzt sind, werden durch Untersuchungen in [14] deutlich. Einflussgrößen sind neben den verwendeten Partikeln (Größe, Mate-

Tabelle 1.1 Oberflächen mit Produktkontakt von milchwirtschaftlichen Tanks und Apparaten [11].

Anforderungsstufe	Arithmetischer Mittenerauwert R_a (μm)	Anwendungsbeispiel
A	< 1,0	Produktbehandlung
B	< 0,6	Produktlagerung Prozessbehälter
C	< 0,2	Besondere mikrobiologische Anforderungen

Tabelle 1.2 Rauheitsempfehlungen nach DIN 11 866 [13] für Rohre aus nichtrostendem Stahl für die Bereiche Aseptik, Chemie und Pharmazie.

Hygieneklasse	H1	H2	H3	H4	H5
Innere Oberfläche R_a in μm	< 1,60	< 0,80	< 0,80	< 0,40	< 0,25
Äußere Oberfläche	gebeizt oder blankgeglüht ohne besondere R_a -Vorgaben oder $R_a < 0,80 \mu\text{m}$ geschliffen				

rial), die Werkstoffoberflächen (Rauheit R_a , Material bzw. Oberflächenenergie, Anisotropien) und das Reinigungsmittel (pH-Wert, Temperatur, Reinigungszeit, Tensidzugabe). Eine wesentliche Erkenntnis aus den Untersuchungen ist, dass kein Einfluss der Rauheit in dem Bereich von $R_a = 0,15 \mu\text{m}$ bis $R_a = 2 \mu\text{m}$ auf den Reinigungserfolg von Edelstahl gefunden wurde, wenn der Partikeldurchmesser d entsprechend obigem Hinweis $d \geq R_a$ gewählt wurde. Der Vergleich der verschiedenen Einflussgrößen zeigt, dass der Reinigungserfolg am stärksten durch das Reinigungsmedium zu beeinflussen ist. Wie zu erwarten, verbessert die Zugabe von Tensiden zusätzlich das Ergebnis, während deutliche Verschlechterungen durch scharfkantige Vertiefungen (Kratzer, Spalte, Risse) in der Oberfläche auftreten.

Ergebnisse neuer Untersuchungen über den Einfluss kontinuierlicher Beläge sind in Kürze zu erwarten. Diese legen sich zunächst über die Rauheitsstruktur und bilden anfangs eine „neue“ Oberfläche. Lösliche Schichten werden in erster Linie durch Diffusion des Reinigungsmittels in der laminaren Unterschicht entfernt. Neben dem Einfluss des Reinigungsmittels ist der Reinigungsvorgang hauptsächlich zeitabhängig. Bei viskosen Belägen wirkt die Wandschubspannung ablösend, wobei zum Teil Inseln aus der Schicht entfernt werden, die den Ausgangspunkt für den Fortschritt der Reinigung durch Scherbeanspruchung bilden.

Aufgrund praktischer und theoretischer Erkenntnisse lässt sich die Reinigbarkeit einer Oberfläche aber nicht allein durch R_a -Werte erfassen. Eine gut reinigbare Oberfläche zeichnet sich z. B. zusätzlich durch weite Abstände der Rauheitsberge und -täler sowie abgerundete Profilformen aus, was z. B. die Pharmaindustrie durch die bevorzugte Verwendung von elektropolierten Oberflächen nutzt. Der zusätzliche Vorteil des Elektropolierens, nämlich dass dabei inhomogene Oberflächenschichten bis zu Tiefen von etwa $40 \mu\text{m}$ entfernt und stabilere, dichtere *Passivschichten* erzeugt werden, wird als Vorteil oft nicht mit betrachtet.

Ein weiteres wesentliches Merkmal aus hygienischer Sicht stellt die Porigkeit von Oberflächen dar, die als regelmäßige oder unregelmäßige örtliche Unterbrechung der Oberflächenstruktur durch Löcher, Poren, Risse oder andere Oberflächenfehler charakterisiert werden kann. Bei entsprechender Größe können vor allem Mikroorganismen in solche Fehlstellen eindringen und zum Ausgangspunkt für das Wachstum von Biofilmen werden. Porenfreiheit ist daher eine wesentliche zusätzliche Voraussetzung für eine hygienegerechte Oberflächenqualität.

1.1.1.2 Hygienerelevante Bearbeitungsverfahren

Bei Edelstahl beruht die Beständigkeit gegen Korrosionsangriff auf einer komplexen, chromreichen „passiven“ Oxidschicht auf der Oberfläche. Sie stellt den normalen mit Passivität bezeichneten Oberflächenzustand dar. Das enthaltene Chrom bildet ab etwa 12 % Massenanteil eine Chromoxidschicht, wodurch weitere Oxidation verhindert wird. Wird diese Oxidschicht beschädigt und gelangt blankes Metall in Kontakt mit einer sauerstoffreichen Umgebung (Atmosphäre, Wasser), so bildet sich automatisch eine neue passivierende Schicht, d. h. die Oberfläche ist selbstheilend. Der Vorgang läuft spontan und automatisch ab, wobei die Dicke der Schicht mit der Zeit weiter zunehmen kann. Die Ausbildung der Schicht sowie weitere Oberflächeneigenschaften wie Rauheit, Textur und Oberflächenenergie lassen sich durch chemische, elektrochemische oder mechanische Bearbeitungsverfahren stark beeinflussen.

Bei der mechanischen Bearbeitung von Edelstahl muss eine strenge Abtrennung von rostenden Stahlwerkstoffen erfolgen, um Korrosion durch Fremdrost zu vermeiden. Auf Maschinen zur Bearbeitung von Edelstahl darf deshalb kein rostender Stahl bearbeitet werden. Generell ist die mechanische, chemische oder elektrochemische Oberflächenbearbeitung immer dann erforderlich, wenn Beschädigungen der Oberfläche entstehen oder durch die Vorbehandlung die Korrosionsbeständigkeit z. B. durch Zunder, Fremdeisenpartikel oder Anlauffarben vermindert wurde.

Bei den mechanischen Bearbeitungsverfahren ist vor allem darauf zu achten, dass im Mikrobereich keine Verletzungen durch eine vorausgehende Grobbearbeitung, umgebogene Grate oder Eindrücke und Rückstände durch Schleifmittel zurückbleiben, wo sich Mikroorganismen ansiedeln können.

Beim Schleifen ist zu starker Andruck zu vermeiden, da aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit und damit verbundener örtlicher Erwärmung von austenitischen Edelstählen gegenüber unlegiertem Stahl das Material anlaufen oder sich verwerfen kann. Um Fremdrost zu vermeiden, dürfen für Schleifscheiben, -bänder oder -korn nur eisenoxidfreie Mittel verwendet werden. Für Fertigschliff sind die Kornabstufungen 80 – 120 – 180 – 240 bis eventuell 400 in Trocken- oder Nassschliff üblich. Beim mechanischen Polieren eines hochlegierten Stahls wird praktisch kaum Material abgetragen, da infolge einer leichten plastischen Verfor-

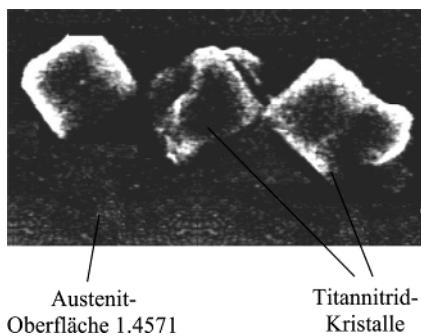


Abb. 1.4 Polierte Oberfläche mit harten Titannitrid-Kristallen.

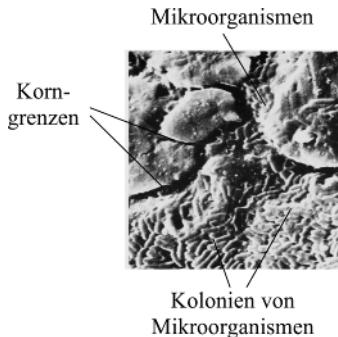


Abb. 1.5 Besiedlung durch Mikroorganismen auf einer Edelstahloberfläche.

mung einer sehr dünnen Schicht eine Art beweglicher Film ähnlich einer zähen Flüssigkeit aufgrund der Oberflächenkräfte eine möglichst plane Struktur erzeugt (s. auch [1]). Grundsätzlich kann ein zu grober Schliff nicht geglättet werden. Die Oberfläche muss zudem frei von Kratzern und Beschädigungen sein, da ansonsten Vertiefungen zugeschmiert werden und später Hygieneprobleme bereiten. Hochglanzpolitur lässt sich nur auf unstabilisierten Stählen erreichen, da härtere Gefügebestandteile, wie Karbide gemäß Abb. 1.4, Titan oder Martensite, geringer geglättet werden als weichere wie z. B. Ferrit oder Austenit. Auch können solche Oberflächenabweichungen die Ausbildung einer geschlossenen Passivschicht verhindern und Ausgangspunkt für eine Koloniebildung von Mikroorganismen entsprechend Abb. 1.5 sein. Hier ist vor allem Biofouling [15] und Biokorrosion von Bedeutung [16, 17].

Im Gegensatz zur chemischen Abtragung sind bei der mechanischen Bearbeitung je nach Bearbeitungsgüte außer der Bearbeitungsrichtung häufig scharfe Kanten an den Profilspitzen, Riefen in den Tälern oder überhängende Grate erkennbar, unter denen Mikroorganismen Schutz finden. Beim Schleifen entstehen gemäß Abb. 1.6 je nach verwendeter Körnung deutlich gerichtete Spuren, wobei je nach Korngröße zum Teil Löcher in die Oberfläche gerissen werden. Für die fachgerechte mechanische Oberflächenbearbeitung werden in der Literatur [18] Empfehlungen gegeben. Bei gerichteten Riefen in der Oberfläche lässt sich außerdem die Problematik der Richtungsabhängigkeit von R_a -Messungen erkennen.

Durch mechanisches Strahlen z. B. mit Glasperlen lassen sich matte, nicht richtungsorientierte Oberflächenstrukturen herstellen. Nach eigenen Untersuchungen entstehen jedoch entsprechend Abb. 1.7 z. B. an ungünstigen Stellen stets schuppenartige Aufwerfungen und Ablösungen der Oberfläche, obwohl Tastschnittmessungen häufig die notwendigen Anforderungen an die R_a -Werte erfüllen. Unter den Schuppen anhaftende Produktreste und Mikroorganismen lassen sich bei der Reinigung nicht entfernen. In produktberührten Bereichen sollte deshalb dieses Bearbeitungsverfahren auf keinen Fall eingesetzt werden. Auch bei Anwendungen im Nicht-Produktbereich ist auf die Problematik zu achten. Wenn das Verfahren dort eingesetzt wird, sind Reste anderer Strahlmittel vor dem Strahlen von Edelstahl sorgfältig aus den Strahleinrichtungen zu entfernen, um Fremdrost zu vermeiden.

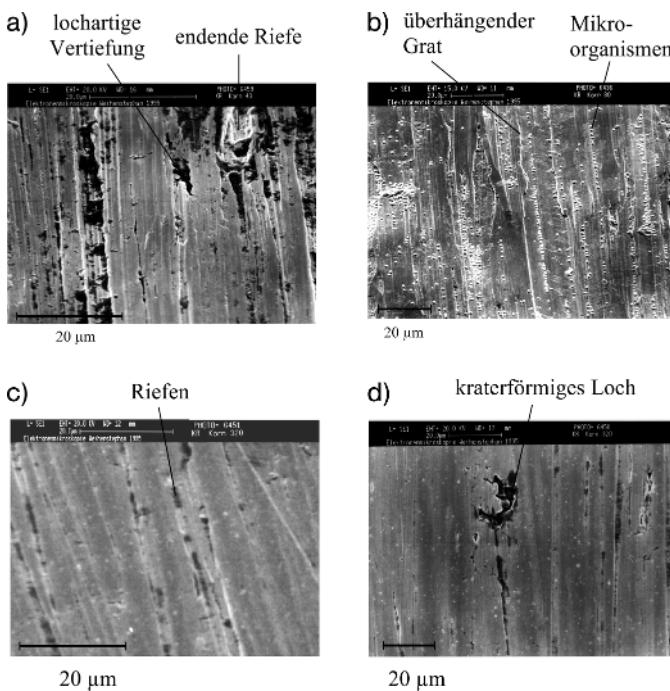


Abb. 1.6 Vergleich von geschliffenen Edelstahloberflächen:
(a) Korn 40, (b) Korn 80, (c) Korn 320, (d) Korn 320 mit Beschädigung aus Vorbearbeitung.

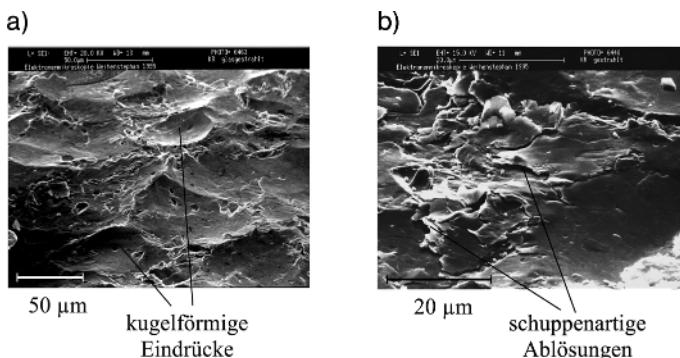


Abb. 1.7 Glasperlengestrahlte Edelstahloberflächen in unterschiedlicher Vergrößerung.

Als chemische bzw. elektrochemische Behandlungsverfahren von Edelstahl werden in erster Linie das Passivieren, Beizen und Elektropolieren angewendet.

Durch *Passivieren* beschleunigt man die Bildung der Passivschicht auf einer Edelstahloberfläche, die durch Sauerstoffeinwirkung die Beständigkeit der rostfreien Edelstähle bewirkt [19]. Es wird in erster Linie angewendet, wenn keine Anlauffarben vorliegen, aber nicht sichergestellt ist, dass nach der Fertigung alle Bereiche sauber und durch eine ausreichende Passivschicht geschützt sind.

Die Behandlung umfasst eine alkalische Heißreinigung, anschließendes Spülen mit Wasser, gefolgt vom Einwirken einer hochprozentigen oxidierenden Säure wie Salpetersäure bei erhöhter Temperatur. Dabei wird die Oberfläche praktisch nicht angegriffen, der Aufbau der Passivschicht jedoch erheblich unterstützt. Nach [20] wird ein Repassivieren von Apparaten und Anlagen in vorgegebenen Zeitabständen (z. B. nach 1–2 Jahren) empfohlen, um veränderte oder beschädigte Oberflächenbereiche mit einer neuen Passivschicht zu versehen.

Das *Beizen* von nicht rostenden Stählen ist zwingend notwendig, wenn Zunderschichten oder Anlauffarben zu beseitigen sind, um eine metallisch blanke Oberfläche herzustellen sowie die erforderliche Passivschicht zu erzeugen. Für das Beizen ist die Entfernung aller störenden Substanzen in wässrigen Lösungsmitteln mit elektrolytischen Verfahren oder mit Ultraschall erforderlich. Als Beizmittel werden Säuren wie Schwefel-, Fluss- oder Salpetersäure in verschiedener Zusammensetzung bzw. Mischungen verwendet. Der Abtrag muss alle unerwünschten Schichten beseitigen, die die Passivität beeinflussen. Gebeizt wird in Beizbädern, durch Besprühen oder mit Beizpasten. Letztere sind hauptsächlich zum örtlichen Entfernen von Anlauffarben und Zunder – z. B. an Schweißnähten – von Bedeutung. Zum Abschluss jeder Beizbehandlung müssen alle Beizmittel mit Wasser unter eventuell Zugabe von Netzmitteln und möglichst unter Druck völlig entfernt werden. Wenn aufgrund hoher Ansprüche Wasserpunkte Probleme bereiten, muss mit deionisiertem Wasser gespült und anschließend bei Raumtemperatur getrocknet werden. Eine typische Oberflächenstruktur eines gebeizten Edelstahlblechs stellt Abb. 1.8 dar. Reinigungstests zeigen, dass die Oberfläche mit relativ weiten Tälern und abgerundeten Erhebungen, die in Relation zur Größe von Bakterien dargestellt sind, gut zu reinigen ist.

Nach dem Beizen muss nicht zusätzlich passiviert werden, da sich die Oberfläche unter Einwirkung von Luftsauerstoff selbst passiviert. Dieser Vorgang nimmt jedoch bis zum vollständigen Aufbau einer Passivschicht längere Zeit in Anspruch. Ist die Oberfläche vor restlosem Aufbau der Passivschicht bereits wieder korrodierenden Bedingungen ausgesetzt, empfiehlt sich jedoch ein Passivieren mit einer Lösung, die ein so hohes Oxidationspotenzial hat, dass die Passivschicht bereits in wenigen Minuten ausgebildet wird.

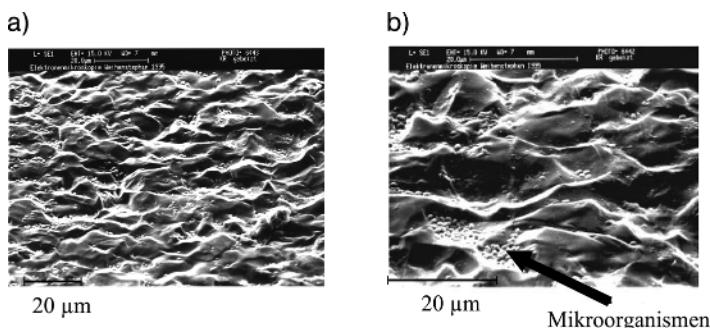


Abb. 1.8 Gebeizte Edelstahloberflächen in verschiedener Vergrößerung mit Mikroorganismen.

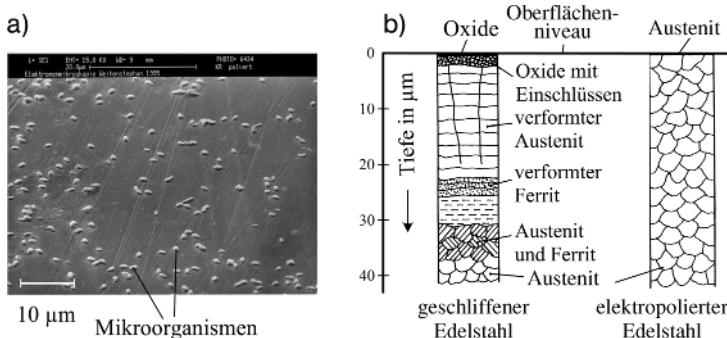


Abb. 1.9 Elektropolierter Edelstahl:

- (a) mikroskopische Aufnahme der Oberfläche mit Mikroorganismen,
- (b) Vergleich der Gefügestruktur mit geschliffenem Material [23].

Beim *Elektropolieren* erfolgt eine elektrochemische Abtragung [21], die zur Enebnung der Oberfläche dient. Im Gegensatz zur mechanischen Bearbeitung oder zu chemischen Beizvorgängen werden dadurch gemäß Abb. 1.9a die Oberflächenprofile im Mikrobereich geglättet, wobei der Angriff bevorzugt an Profilspitzen erfolgt [22]. Bei längerer Behandlungsdauer werden aber auch Makrorauheiten abgebaut. Insgesamt entsteht im Vergleich zu einem geschliffenen Blech eine riss- und porenfreie Oberfläche, die bei Austeniten durch das ursprüngliche austenitische Kristallgefüge ohne höhere Fremd- und Ferritanteile gekennzeichnet ist (Abb. 1.9b) und entsprechend [23] eine optimale Passivschicht aus hauptsächlich Chromoxid aufweist. Diese beeinflusst zum einen die Kontaktverhältnisse zum Produkt hin und erhöht zum anderen die Korrosionsbeständigkeit, sodass die zeitabhängige Verschlechterung der Oberflächenstrukturen und -eigenschaften vermindert wird. Die starke Einebnung im Mikrobereich ergibt außerdem einen geringeren Reibungskoeffizienten, der einen Bruchteil von mechanisch polierten Oberflächen betragen kann. Je nach Zusammensetzung des Elektrolyten kann mit dem Elektropolieren ein Glanzeffekt an der Oberfläche erzielt werden, der auch als elektrolytisches Glänzen bezeichnet wird.

Als Elektrolyten werden hochkonzentrierte Gemische von Phosphor- und Schwefelsäure verwendet, die im stromlosen Zustand die Oberfläche nicht angreifen. Voraussetzung ist ein möglichst feines, gleichmäßiges und homogenes Gefüge ohne nichtmetallische Einschlüsse, gleiches Auflösungsvermögen der verschiedenen Legierungsbestandteile und gute elektrische Leitfähigkeit. Der Abtrag liegt in einem Bereich zwischen 10 und 40 µm. Da sich bei titan- und niobstabilisierten Stählen die Kristallstrukturen dieser Legierungselemente wesentlich schwächer angreifen lassen, sind solche Werkstoffe nur bedingt für das Elektropolieren geeignet. Mikroskopische Oberflächenaufnahmen zeigen, dass diese nicht glättbaren Kristallstrukturen aus der Grundmatrix des Werkstoffs herausragen. Auch nichtmetallische Einschlüsse und in die Oberfläche eingedrückt Partikel des Schleifmittels werden durch eine Elektropolierbehandlung sichtbar.

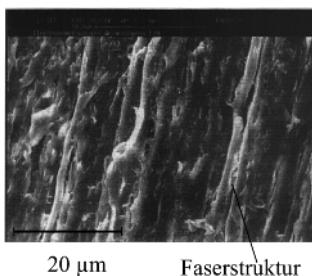


Abb. 1.10 Struktur von PTFE nach zerspanender Bearbeitung.

Bauteile aus Kunststoff werden entweder in endgültiger Form durch Gießen, Spritzen oder Extrudieren oder durch mechanische Bearbeitung aus Halbzeugen und Formteilen gefertigt. Im erwärmten Zustand können vor allem Thermoplaste mit geringem Kraftaufwand geprägt oder durch Tiefziehen umgeformt, sowie auf speziellen Vorrichtungen gebogen und gerichtet werden. Bei Verwendung von Formen erhalten die Kunststoffteile die negative Oberflächenstruktur der Form, die meist aus Metall gefertigt ist. Das erforderliche Rauheitsprofil ist daher bei Erstellung der Form zu beachten. Das fertige Bauteil hat vom Kontakt mit der Form meist eine porenfreie dichte „Oberflächenhaut“. Bei der mechanischen Bearbeitung wird diese Haut entfernt, ein neues Mikroprofil geschaffen und die innere Struktur des Materials freigelegt, wie Abb. 1.10 aufzeigt. Der Bearbeitungsvorgang muss deshalb zu einer Mikrostruktur führen, die den Anforderungen entspricht. Zum anderen muss der Kunststoff in seinem Inneren durch Füllstoffe ein porenfreies Gefüge besitzen.

Für die maschinelle Bearbeitung ist es daher wichtig, nur harte, gut gefüllte Kunststoffe zu verwenden. Da Kunststoffe eine wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeit als Metalle besitzen, leiten sie die bei der Bearbeitung entstehende Wärme sehr viel schlechter ab, sodass es zu lokalen Überhitzungen kommen kann. Durch hohe Arbeitsgeschwindigkeiten und geringen Vorschub wird ein hoher Wärmeeintrag vermieden. Bei den Werkzeugen ist auf die erforderliche Schnittgeometrie zu achten. Obwohl mithilfe scharfer Werkzeugschneiden eine gute Wärmeabfuhr über den Span erreichbar ist, sollte durch Wasser (Bohrwasser) bzw. durch Pressluft für zusätzliche Kühlung gesorgt werden. Um Deformationen zu vermeiden, sollte bei der Bearbeitung mit niedrigem Spanndruck gearbeitet werden. Zum Erreichen enger Toleranzen müssen bereits vor der Bearbeitung die zu erwartenden Maßabweichungen berücksichtigt werden.

Bei *Elastomeren*, die hauptsächlich für Dichtungen verwendet werden, ist ebenfalls die Struktur der zum Extrudieren verwendeten Form für die Oberflächenqualität entscheidend. In Abb. 1.11a sind Ausschnitte aus der Oberfläche einer Silikondichtung dargestellt, die die Bearbeitungsriefen der Form aufzeigt. Ihre Größe kann das Dichtverhalten bei Kontakt mit der Gegenfläche beeinflussen, gegenüber der abzudichten ist. Zusätzlich weist die Oberfläche zahlreiche lochartige Vertiefungen und Löcher auf, die eine Tiefe und einen Durchmesser von bis zu 50 μm aufweisen können, wodurch ein erhebliches Kontaminationsrisiko entsteht. Sie röhren z. B. von nicht ausreichender Auskleidung der Extrudier-

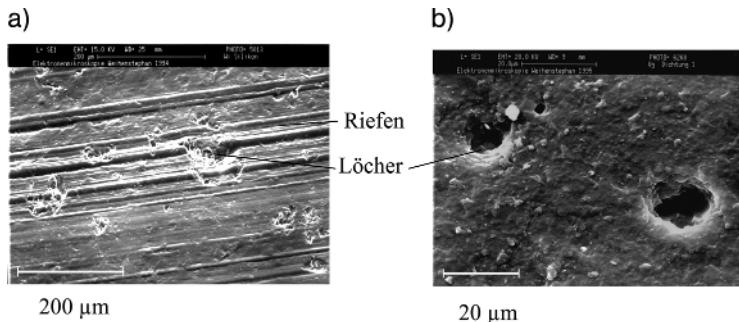


Abb. 1.11 Beispiele von Oberflächenfehlern an Dichtungen:

- (a) Silikondichtung mit wulstartiger Längsstruktur durch Riefen in der Form sowie muldenartige Löcher durch fehlendes Trennmittel,
- (b) EPDM-Dichtung mit lochartigen Vertiefungen.

oder Gießform mit Trennmittel her, sodass beim Entfernen der Dichtung aus der Form Material aus der Dichtungsoberfläche herausgerissen wird. Andere Beschädigungen von Dichtungen treten bei unsachgemäßer Herstellung bzw. Lagerung und mechanischer Verletzung bei Montage auf.

Die EPDM-Dichtung nach Abb. 1.11b lässt praktisch keine Riefen erkennen. Dagegen sind relativ häufig Beschädigungen der Oberfläche in Form von Löchern bzw. Poren zu sehen, die bei Vergrößerung eine erhebliche Tiefe erkennen lassen.

Im Bereich von *Keramik* sind bei technischen Anwendungen unterschiedliche Oberflächenqualitäten festzustellen. Die Abb. 1.12a zeigt eine zerklüftete bzw. poröse Oberfläche des Sintermaterials, das Mikroorganismen ausreichenden Schutz vor der Reinigung bieten kann. Der nicht völlig an der Oberfläche verschmolzene Werkstoff ist für hygienische Einsatzbereiche nicht geeignet. Eine gut reinigbare Oberflächenstruktur entsprechend Abb. 1.12b besitzt dagegen einen hohen Verschmelzungsgrad an der produktberührten Schicht, der zu einer glatten Oberfläche mit relativ geringen Vertiefungen führt.

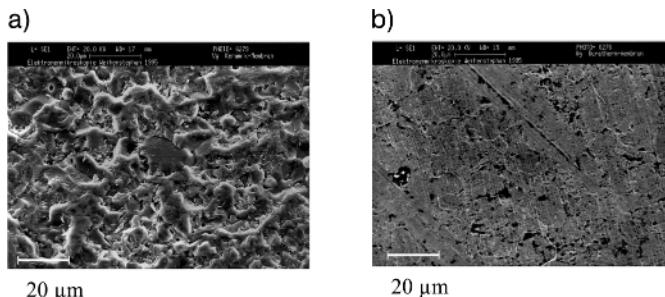


Abb. 1.12 Keramikoberflächen:

- (a) raue gesinterte Struktur, (b) glatte Keramikmembran.

1.1.1.3 Strukturen und Effekte an gegenseitigen Berührflächen von Materialien im Produktbereich

Kontaktflächen von zwei oder mehreren Bauteilen oder Konstruktionselementen werden bei ausreichend glatter Oberfläche im Allgemeinen als spaltfrei angesehen. Aus mikroskopischer Sicht sind jedoch, wie die Prinzipdarstellungen nach Abb. 1.13a und b zeigen und in [1] im Einzelnen ausgeführt ist, sowohl wegen geometrischer Formfehler als auch wegen der Rauheitsprofile Spalte und räumliche Kanäle vorhanden, in die feine Schmutzsubstanzen und vor allem Mikroorganismen eindringen können. Bei flüssigen Produkten wird dies durch die Kapillarwirkung der engen Spalte zusätzlich begünstigt, wenn gasförmige Umgebung z. B. beim Befüllen von Apparaten vorliegt. Eine Reinigung solcher Stellen ist nur bei Demontage der Teile möglich. Infolge von Isoliereffekten in gefüllten Spalten kann im montierten Zustand je nach Werkstoff der Kontaktflächen auch eine thermische Desinfektion wirkungslos sein. Deshalb sind nicht abgedichtete, metallische Kontaktflächen in Nassbereichen bei Anwendung von CIP-Verfahren zu vermeiden.

Ausnahmen können bei Apparaten für Trockenprodukte gemacht werden [24], wenn Produkt- und Luftfeuchte ein Wachstum von Mikroorganismen nicht zulassen und die Partikelgröße ausreichend groß ist. Zusätzliche Bedingung ist, dass jeweils eine trockene Reinigung durch Absaugen, Ausblasen oder Strahlen mit körnigen Substanzen (z. B. Trockeneis) durchgeführt wird. Ein Eindringen von staubförmigen Anteilen in die engen Spalte zwischen Kontaktflächen ist dabei nicht auszuschließen. Sie gefährden den Produktionsprozess aus hygienischer Sicht und unter Qualitätsgesichtspunkten jedoch kaum, solange jeweils das gleiche Produkt hergestellt wird und keine Alterung stattfinden kann. Eine Kontaminationsgefahr nach Chargenwechsel hängt von den Qualitätsanforderungen und Nachweisgrenzen ab.

Bei Kontaktflächen zwischen Kunststoffen (Abb. 1.14a) oder Edelstahl und Elastomeren (Abb. 1.14b), wie sie z. B. bei Dichtungen gebildet werden, vermindert die meist hohe Verformbarkeit der elastischen Werkstoffe die Gefahr der Spaltbildung erheblich. Trotzdem ist nur durch hygienegerechte Gestaltung der

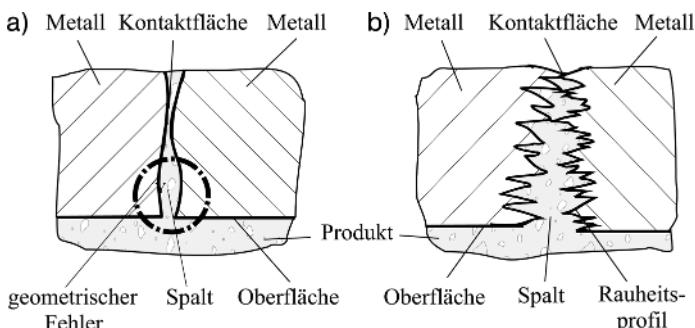


Abb. 1.13 Prinzipielle Probleme der Berührflächen von Edelstahl:

(a) Grobstruktur (Formfehler), (b) Feinstruktur (Rauheitsprofil; Vergrößerung von (a)).

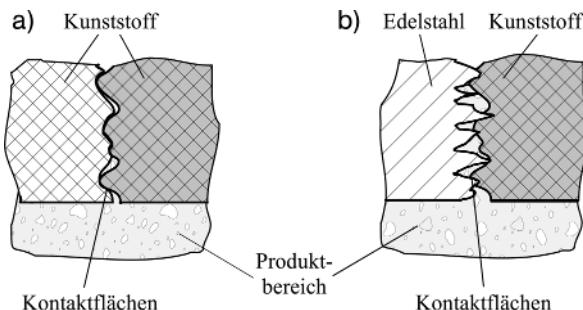


Abb. 1.14 Feinstruktur im Kontaktflächenbereich.
Abdichtung räumlicher Kanäle durch Verformung
(a) zwischen Kunststoffen, (b) zwischen Metall und Elastomer.

Berührflächen und Dichtheit unmittelbar an der produktberührten Oberfläche ein Kontaminationsrisiko zu vermeiden.

1.1.1.4 Oberflächengeometrie und konstruktive Ausführung von Oberflächen

Neben der Feinstruktur ist die Geometrie von produktberührten Oberflächen von entscheidender Bedeutung für die Reinigbarkeit. Grundlegende Anforderungen dazu sind in der Maschinenrichtlinie, Anhang 2, zu finden [25]. Die zur Erfüllung dieser grundlegenden Anforderungen entwickelte Norm DIN EN 1672-2 [26] ist als allgemeine Norm zur Definition von Begriffen und generellen konstruktiven Gefahrenquellen gedacht. Gleichermaßen gilt für die international entwickelte und ähnlich abgefasste DIN EN ISO 14 159 [27]. Die Empfehlungen beider Normen beruhen zum großen Teil auf Leitlinien und Beispielen der EHEDG, wobei in deren Publikationen z. B. auch Größenangaben für bestimmte Gestaltungsvorschläge gemacht werden, um Anhaltswerte für die Behandlung von Problemzonen zu geben.

In allen Empfehlungen wird ausgeführt, dass Oberflächen wegen der erforderlichen Reinigbarkeit glatt, kontinuierlich durchgehend oder abgedichtet sein müssen. Innere rechte Winkel und Ecken müssen nach Stand der Technik gemäß Abb. 1.15a stets ausgerundet werden. Spitzwinkel ($\leq 90^\circ$) entsprechend Abb. 1.15b sollten vermieden werden, da sie trotz Ausrundung ein Hygienerisiko darstellen. Sie sind lediglich bei sehr großen Rundungsradien akzeptabel. Bei stumpfen Winkeln kommt es im Allgemeinen auf die Größe an, ob die Reinigbarkeit vermindert wird. Die EHEDG empfiehlt, Ecken vorzugsweise mit einem Radius von $r = 6$ mm oder mehr auszurunden [3, 9]. Als Mindestradius sieht sie, wie DIN 1672-2, $r = 3$ mm an. Falls spitzwinkel nicht zu vermeiden sind oder der Radius eines Winkels aus technischen Gründen kleiner als 3 mm sein muss, ist die Konstruktion durch einen Reinigbarkeitstest zu überprüfen, wobei verminderte Reinigbarkeit durch andere Maßnahmen wie z. B. höhere Reinigungsgeschwindigkeit oder längere Reinigungszeit zu kompensieren ist. Bei stumpfen Winkeln sollte auch die Möglichkeit des abgestuften Abwinkelns nach Abb. 1.15c in Erwägung gezogen werden.

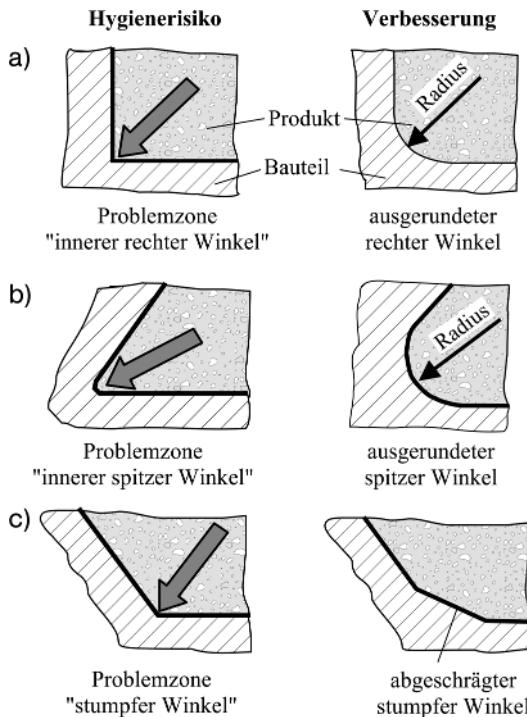


Abb. 1.15 Beispiele der Gestaltung innerer Ecken:
 (a) rechte Winkel, (b) spitze Winkel, (c) stumpfe Winkel.

Nach der Maschinenrichtlinie [25] dürfen Flächen keine Vertiefungen aufweisen, in denen sich organische Stoffe festsetzen können. Verbindungen müssen so gestaltet werden, dass vorstehende Teile, Leisten und versteckte Ecken auf ein Mindestmaß beschränkt werden. Auch in Normen und Empfehlungen wird in verschiedenen Zusammenhängen darauf hingewiesen, dass stufenartige Rücksprünge oder Vertiefungen zu vermeiden sind, in denen sich organische Stoffe festsetzen können. Entsprechend Abb. 1.16a sind sie z. B. in Form von Rillen oder Nuten in horizontalen Flächen mit entsprechenden Ausrundungen akzeptabel, wenn sie in Längsrichtung der Vertiefung gereinigt werden können. Bei Queranströmung müssen Vertiefungen ausreichend breit und mit ausgerundeten Ecken gestaltet werden, wobei die Tiefe so gering wie möglich auszuführen ist.

Außerdem ist bei horizontaler Anordnung auf die Entleerbarkeit zu beachten.

Horizontale vorstehende Teile wie z. B. Leisten oder andere stufenartigen Erhöhungen (Abb. 1.16b) sind auf ein Mindestmaß zu beschränken. Leisten sind während der Reinigung möglichst in Längsrichtung anzuströmen. Bei Queranströmung ist die Höhe so gering wie möglich zu halten. Die Übergänge sind entsprechend großzügig auszurunden. Stufen infolge nichtfluchtender Bauteile [2] sind generell zu vermeiden.

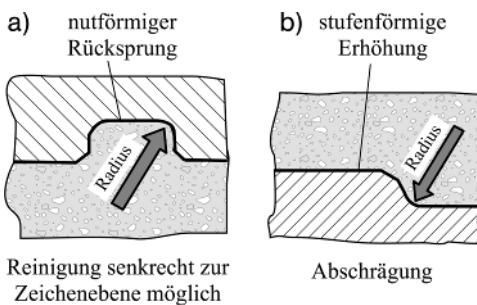


Abb. 1.16 Beispiele für Rück- und Vorsprünge in glatten Oberflächen:
(a) nutförmige Vertiefung (Gefahr der Luftansammlung), (b) Stufe.

Ein wesentliches Problem ist durch großräumige Totwasserbereiche und nicht reinigbare tote Enden gegeben, deren Auswirkung auf Produktkontaminationen enorm sein kann. Sie entstehen häufig aus Unachtsamkeit bei Konstruktion oder Montage von Anlagen.

Untersuchungen über die Problematik der Reinigung von Toträumen in Rohrleitungen werden z. B. in [28] kurz zusammengefasst, wo unterschiedliche Einbausituationen von T-Stücken gemäß Abb. 1.17a diskutiert werden. Den äußerst geringen Strömungsanteil im Totraum in Abhängigkeit der Totraumtiefe für die ungünstigste Reinigungsposition eines T-Stücks zeigt das beispielhafte Ergebnis nach Abb. 1.17b, das als Ausgleichskurve von Messwerten wiedergegeben ist. In diesem Fall können zusätzlich Lufteinschlüsse im Totraum das Wachstum von Mikroorganismen und Biofilmen fördern.

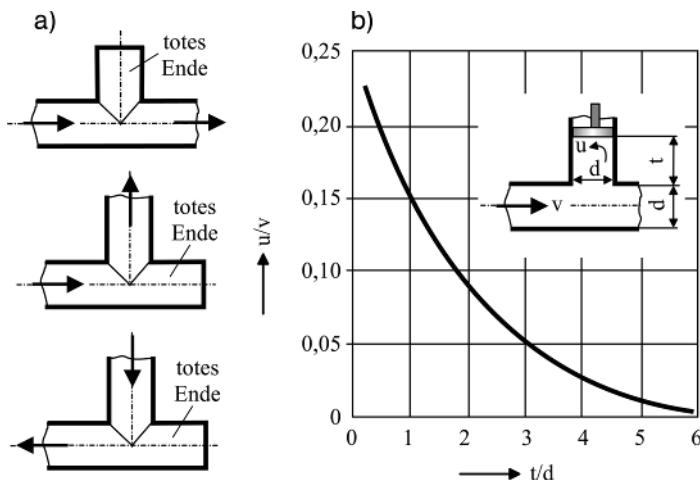


Abb. 1.17 Tote Enden von T-Stücken nach [28]:
(a) mögliche Lage und Anströmung, (b) Beispiel mit Ausgleichskurve für Versuchsergebnisse ($d = 60 \text{ mm}$, t und v variiert).

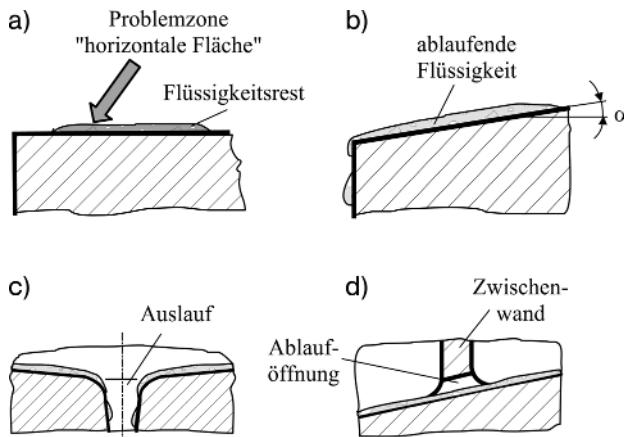


Abb. 1.18 Selbstablaufen von Oberflächen:
 (a) nicht ablaufende horizontale Fläche, (b) geneigte Fläche,
 (c) Auslaufstelle, (d) Durchbruch in Zwischenwand.

Unvermeidbare tote Enden von T-Stücken werden bei Verhältnissen $t/d < 1$ als reinigbar angesehen, wenn sie in Richtung des Totraums angeströmt werden. Reinigungsströmung in umgekehrter Richtung führt zu nahezu keiner Wirkung. Ausrundungen der toten Enden verbessern die Reinigbarkeit. Toträume bzw. Strömungsschatten können auch hinter angeströmten Bauelementen wie Stangen, Spindeln, Speichen oder Rippen entstehen.

Schließlich ist zu beachten, dass gesetzlich nach [25] von Lebensmitteln, kosmetischen und pharmazeutischen Erzeugnissen sowie von Reinigungs-, Desinfektions- und Spülmitteln stammende Flüssigkeiten, Gase und Aerosole vollständig aus der Maschine ableitbar sein müssen, z. B. möglichst in Reinigungsstellung. Nach [26, 27] ist vorzugsweise selbsttätiges Ablaufen (Selfdraining), eventuell auch in einer „Reinigungs“-Stellung, sicherzustellen. Das selbsttätige Ablaufen wird auch nach [9] gefordert wird. Dies bedingt z. B. auch, dass horizontale Flächen zu einer Seite hin mit einem Neigungswinkel versehen werden müssen (Abb. 1.18). Ausgehend von wasserähnlichen Flüssigkeiten wird in [2] für Rohrleitungen und geschlossene Apparate ein Neigungswinkel von $\alpha > 3^\circ$ empfohlen (Abb. 1.18b). Beispiele für selbsttätiges Ablaufen zeigen Abb. 1.18c für einen Behälterauslauf bzw. Abb. 1.18d für einen Durchlass durch ein vertikales Wandelement. Ist in Sonderfällen ein selbsttätiges Ablaufen nicht möglich, so ist dafür zu sorgen, dass es durch andere Maßnahmen wie z. B. Trocknen durch Strahlung oder Heißluft erreicht werden kann. Dabei ist ein Auskristallisieren aus Flüssigkeiten (z. B. durch Kalkbildung) zu vermeiden.

Häufig müssen durchgehende horizontale Profile aus Edelstahl z. B. als Trag- oder Versteifungselemente im Außenbereich von Apparaten bzw. zu Heiz- oder Kühlzwecken im Produktbereich verwendet werden. Dabei ist bei offenen Prozessen z. B. im Reinraum auch der Außenbereich der Konstruktion als Produktbereich anzusehen. Auf oben freien Quadratrohren mit horizontalen

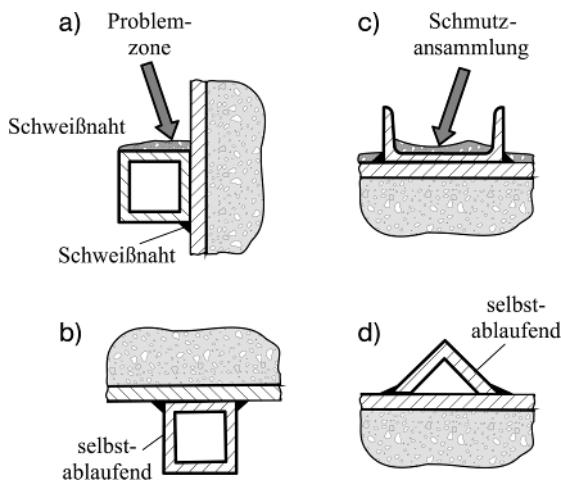


Abb. 1.19 Profile zur Versteifung oder als Heizflächen:
 (a) Quadratrohr mit horizontaler, nicht ablaufender Oberfläche,
 (b) selbstablaufende Position eines Quadratrohrs,
 (c) nach oben offenes U-Profil, (d) selbstablaufendes Winkelprofil.

Flächen gemäß Abb. 1.19a ist das selbstdrieffende Abfließen von Flüssigkeiten nicht gewährleistet, während die Befestigung unter horizontalen Wänden gemäß Abb. 1.19b dieses Problem vermeidet. In beiden Fällen ist jedoch auf die inneren rechten Winkel als zusätzliche Problemstelle zu achten, die z. B. durch Kehlnähte verhindert werden kann. Bei offenen Profilen entsprechend Abb. 1.19c wird die Schmutzablagerung gefördert. Gleichzeitig ist die Reinigung behindert und praktisch nur von Hand durchführbar. Besonders geeignet ist die Verwendung von Winkel- oder Rundprofilen nach Abb. 1.19d, die in den verschiedensten Lagen selbstdrieffig ablaufen.

Es muss noch erwähnt werden, dass geschlossene Hohlprofile als „hollow bodies“ von manchen Anwendern abgelehnt werden. Ursache dafür ist, dass in der Praxis Risse in Hohlkörpern gemäß Abb. 1.20 zu Kontamination im Produktbereich geführt haben. Vermeiden lassen sich solche Probleme nur durch konsequenter Einsatz von offenen Profilen, was sich allerdings nicht überall, wie z. B. an Heiz- oder Kühelementen, durchführen lässt.

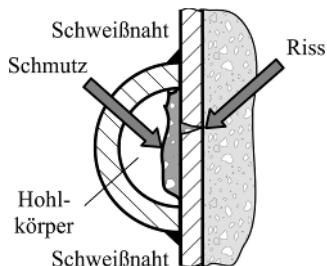


Abb. 1.20 Problematik des Kontaminationsrisikos durch Rissbildung geschlossener, undichter oder seitlich offener Hohlelemente.

1.1.2

Nicht produktberührte Oberflächen

Nach [26] und [27] sollen auch nicht produktberührte Oberflächen und Beschichtungen die allgemeinen Anforderungen erfüllen: haltbar, reinigbar und eventuell desinfizierbar zu sein. Sie sind aus korrosionsbeständigen Werkstoffen herzustellen oder z. B. mit festhaftenden Beschichtungen oder Farbauftag zu behandeln. Bei bestimmungsgemäßer Verwendung dürfen sie keine Brüche aufweisen, müssen widerstandsfähig gegen Brechen, Splittern, Abblättern, Korrosion sowie Abrieb sein und das Eindringen unerwünschter Substanzen verhindern. Die Oberflächen müssen nichtabsorbierend ausgeführt werden, ausgenommen wenn es technisch oder technologisch unvermeidbar ist. Sie dürfen Produkte weder nachteilig beeinflussen noch kontaminieren. Einrichtungssteile sind so zu gestalten und herzustellen, dass Ansammlungen von Feuchtigkeit und das Festsetzen von Verschmutzungen und Schädlingen verhindert werden. Außerdem müssen Überwachung, Wartung, Instandhaltung, Reinigung und gegebenenfalls Desinfektion möglich sein. Hohle Rahmenelemente müssen vollständig geschlossen oder wirksam abgedichtet werden.

1.2

Schweißverbindungen

Nach Stand der Technik und wenn technisch möglich sollten Schweißverbindungen lösbaren Verbindungen als Verbindungselemente grundsätzlich vorgezogen werden. Sie bieten bei hygienegerechter Ausführung bei allen schweißbaren Werkstoffen eine optimale technische und mikrobiologische Sicherheit. Bei dem am häufigsten eingesetzten Werkstoff Edelstahl können bei Schutzgasschweißung unter Inertgas vor allem in Verbindung mit automatisierten Schweißverfahren porenfreie Nähte ohne merklichen Wulst garantiert werden, die allen hygienischen Anforderungen gewachsen sind [29]. Gleiches gilt für das Schweißen von Kunststoffen, das bei entsprechender Erfahrung mit Nahtvorbereitung, Temperatur, Zusatzwerkstoff und Schweißgeschwindigkeit hohe Nahtqualitäten erlaubt.

1.2.1

Nicht rostender Edelstahl

Die am häufigsten verwendeten austenitischen Edelstähle können mit den meisten für unlegierte Stähle üblichen Verfahren und Maschinen des Schmelz- und Widerstandsschweißens geschweißt werden. Zu berücksichtigen ist, dass nicht rostende Edelstähle gegenüber unlegierten Stählen nur etwa ein Drittel der Wärmeleitfähigkeit, aber einen um etwa 50 % höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten haben. Dies ist für die Vorbereitung der Bauteile zum Schweißen wichtig, indem der Abstand an der Nahtwurzel höher zu wählen ist. Um Verzug und Verzunderung gering zu halten, sollte möglichst wenig Wärme beim Schweißen

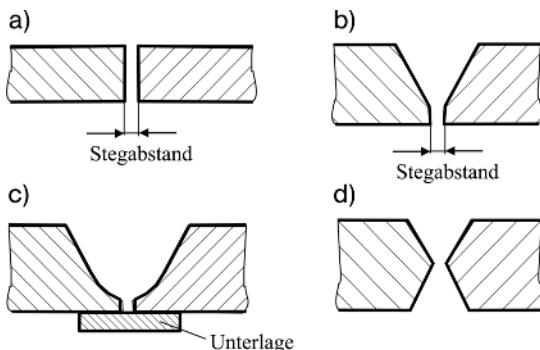


Abb. 1.21 Beispiele für die Vorbereitung von Blechen für das Schweißen bei verschiedenen Stumpfstößen:

(a) I-Naht dünner Bleche, (b) V-Naht, (c) U-Naht mit Unterlage, (d) X-Naht.

eingebracht werden. Als Folge werden schmale Schweißnähte mit engen Bereichen von Anlauffarben erreicht, die weniger Nacharbeit erfordern. Außerdem vermindern eine dichte Folge von Heftschweißungen mit allseitigem Inertgasschutz [30] oder Einspannungen, die auch beim Abkühlen der geschweißten Bleche aufrechterhalten bleiben sollten, das Verziehen. Bei den austenitischen Stählen besteht keine Gefahr der Aufhärtung.

Bei der Vorbereitung der Stoßstellen ist auf fettfreie, saubere und glatte Schnittkanten zu achten. Bei größeren Wandstärken müssen Bauteile durch spanende Bearbeitung entsprechend vorbereitet werden. Art und Abmessungen der Nahtvorbereitung gemäß den Beispielen nach Abb. 1.21 hängen wesentlich vom gewählten Schweißverfahren ab.

Eine wesentliche Rolle spielt der Schutz der Schmelze vor Veränderungen, die sich auf die Oberflächenqualität oder die Zusammensetzung des Gefüges auswirken. Um z. B. einen C-Anstieg in der Schmelze zu vermeiden, müssen Pulver von Unterpulver-Schweißverfahren frei von C-abgebenden Bestandteilen sein. Flussmittel im Pulver müssen unerwünschte Oxide in der Schmelze ausreichend benetzen und lösen können. Sauerstoffzutritt zur Schmelze wird durch ausreichend reines Schutzgas wie z. B. Schweißargon 99,95 % verhindert. Der Schutz muss sowohl auf der Schweißseite als auch auf der Seite der Nahtwurzel erfolgen. Glatte Raupenoberflächen können beim maschinellen WIG-Schweißen für austenitische Stähle durch Argon-Wasserstoff-Mischgase erreicht werden. Bei Montagearbeiten im Freien sollten Schirme gegen Zugluft aufgestellt werden.

1.2.1.1 Nahtgefüge und -umgebung

Die Art der verwendeten nicht rostenden Edelstähle und das angewendete Verfahren bestimmen vor allem das Gefüge an der Nahtoberfläche sowie in der Wärmeeinflusszone der Nahtumgebung (Abb. 1.22), wodurch die Korrosionsbeständigkeit beeinflusst werden kann.

Voraussetzung für eine hohe Beständigkeit ist der Chromgehalt, der ein edles elektrochemisches Potenzial bewirkt [31]. Beim Schweißen, insbesondere mit

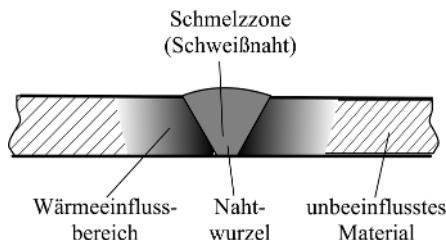


Abb. 1.22 Wärmeeinflusszone im Schweißnahtbereich.

Zusatz, sollte darauf geachtet werden, dass dieses möglichst hoch und gleichmäßig über die gesamte Oberfläche im Schweißbereich erhalten bleibt. Im Idealfall sollte beim Übergang vom Grundwerkstoff zur Schweißnaht als auch über den Nahtbereich hinweg keine Änderung des elektrochemischen Potenzials erfolgen, wie es Abb. 1.23a dem Prinzip nach zeigt. Vor allem mit unedlem Zusatzmaterial entsteht gemäß Abb. 1.23b ein Potenzialabfall, der Korrosionsprobleme verursachen kann.

Besonders bei den austenitischen Qualitäten kann sich in einem Temperaturbereich zwischen 500 und 850 °C Kohlenstoff mit Chrom zu Karbiden verbinden und diese an den Korngrenzen des Gefüges ausscheiden, was zu Chromverarmung im Bereich der Korngrenzen führt. Von Einfluss ist vor allem die Höhe der C- und N-Anteile im Werkstoff sowie die Verweilzeit im kritischen Temperaturbereich. Da während des Schweißens in einer bestimmten Entfernung von der Schweißnaht immer dieser Temperaturbereich vorliegt, ist die Gefahr der Chromkarbidbildung grundsätzlich gegeben. Bei anschließender chemischer Beanspruchung der Verbindung wird daher meist nicht die Naht selbst, sondern nur eine bestimmte Zone im angrenzenden Bereich angegriffen, wo gemäß Abb. 1.24 ein Potenzialabfall aufgrund der Chromverarmung entsteht.

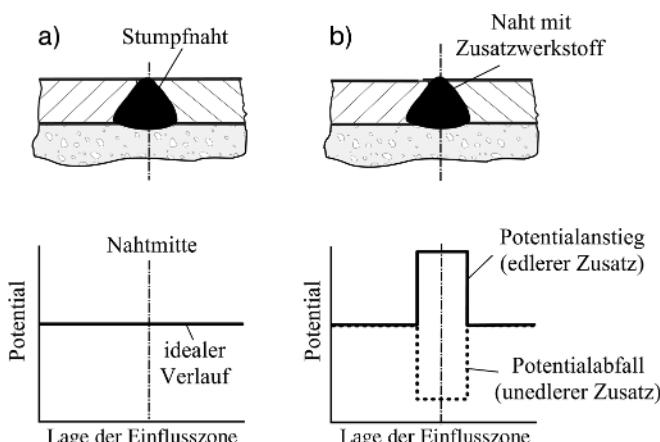


Abb. 1.23 Potenzialverlauf im Schweißnahtbereich:
(a) idealer Verlauf, (b) Potenzialanstieg bzw. -abfall in Abhängigkeit der Art des Zusatzwerkstoffes.

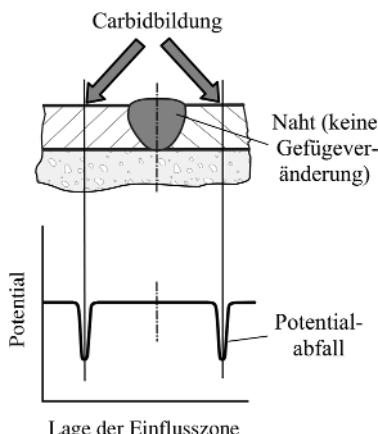


Abb. 1.24 Potenzialabfall neben der Naht aufgrund von Karbidbildung im Bereich der Wärmeeinflusszone.

Der im Apparatebau am häufigsten eingesetzte unstabilisierte Werkstoff 4301 mit einem Kohlenstoffgehalt von maximal 0,07 % nach [32] ist nur bei geringen Dicken wegen der meist ausreichenden Abkühlungsgeschwindigkeit als sicher gegen Ausscheidung von Chromkarbid und damit Kornzerfall anzusehen. Um Kornzerfall generell zu vermeiden, sind entweder Werkstoffe mit niedrigerem Kohlenstoffgehalt (low carbon steels) im Bereich von maximal 0,03 % anzustreben oder es muss eine Stabilisierung mit Titan oder Niob stattfinden, die Kohlenstoff weitgehend zu unlöslichen Titan- oder Niobkarbiden abbinden. Für eine ausreichende Stabilisierung austenitischer Stähle wird z. B. Titan mit einem 5-mal so hohen Gehalt wie an Kohlenstoff verwendet. Zu bemerken ist, dass stabilisierte Qualitäten wegen der harten Karbide in der weichen austenitischen Grundmasse nicht auf Hochglanzpolitur gebracht werden können.

Ti-Karbide in stabilisierten austenitischen Edelstählen gehen allerdings bei Temperaturen oberhalb 1150 °C zunehmend doch in Lösung. Wird von dieser Temperatur sehr schnell abgekühlt, ist der Werkstoff an Kohlenstoff übersättigt. Bei einer nachfolgenden Erwärmung scheidet sich wegen der rascheren Diffusion des Chroms im Vergleich zu dem Stabilisierungselement ein hochchromhaltiges Karbid aus, wodurch der Stahl in diesem Bereich interkristallin anfällig wird. Da beim Schweißen unmittelbar neben der Schweißnaht der Grundwerkstoff auf diese hohen kritischen Temperaturen gebracht wird und dabei die Titankarbide in Lösung gehen, scheidet sich in diesem Bereich bei einer nachträglichen Erwärmung, wie sie z. B. durch Schweißen einer Gegenlage (z. B. Nachschweißen der Nahtwurzel) gegeben sein kann, vorübergehend das Chromkarbid aus. Als Folge kommt es zu interkristalliner Korrosionsanfälligkeit, die sich in sogenannter „Messerlinienkorrosion“ äußert. Diese Gefahr wird durch eine unzureichende Stabilisierung (z. B. zu geringer Ti-Gehalt) gefördert, während sie bei einer Überstabilisierung verhindert wird.

Zusammenfassend lassen sich zur Vermeidung der interkristallinen Korrosion und daraus folgender Hygieneprobleme bei einer kritischen Korrosionsbeanspruchung für austenitische Stähle drei Möglichkeiten anführen [33]:

- ein erneutes Lösungsglühen nach dem Schweißen mit nachfolgendem schnellen Abkühlen,
- ein Abbinden des Kohlenstoffgehaltes durch Titan- oder Niobzusatz,
- die Verwendung von austenitischen Stählen mit besonders niedrigen Kohlenstoffgehalten von max. 0,03 % (low carbon steels).

Die internationale Tendenz geht zu Stählen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt. Wenn wegen der Blechdicke notwendig, sollten zum Schweißen dieser Qualitäten auch niedrigkohlte Zusatzwerkstoffe eingesetzt werden.

In der Pharmaindustrie werden besondere Anforderungen an den Gehalt an Delta-Ferrit in nicht rostenden Edelstählen gestellt, da er meist für Korrosionsprobleme verantwortlich ist, als deren Folge verminderte Reinigbarkeit der Oberflächen auftritt. Das Grundgefüge nicht rostender austenitischer Stähle ist im Walz- und Schmiedezustand sowohl bei Raumtemperatur als auch bei hohen Temperaturen vollaustenitisch. Infolge der chemischen Zusammensetzung entstehen im Schweißgut geringe Mengen an Delta-Ferrit (δ -Ferrit) [34], wodurch die Anfälligkeit gegen die Bildung von Heißrissen sinkt. Die Entstehung von δ -Ferrit hängt vom Verhältnis der Ferritbildner Cr, Mo, Si und Nb zu den Austenitbildnern Ni, C, Mn und N ab (s. auch [1]) und lässt sich näherungsweise im Schäffler-Diagramm nach Abb. 1.25 abschätzen. Zur Verdeutlichung sind einige Werkstoffe sowie Zusatzmaterialien für das Schweißen mit ihren nominellen Legierungsbestandteilen in das Diagramm eingetragen.

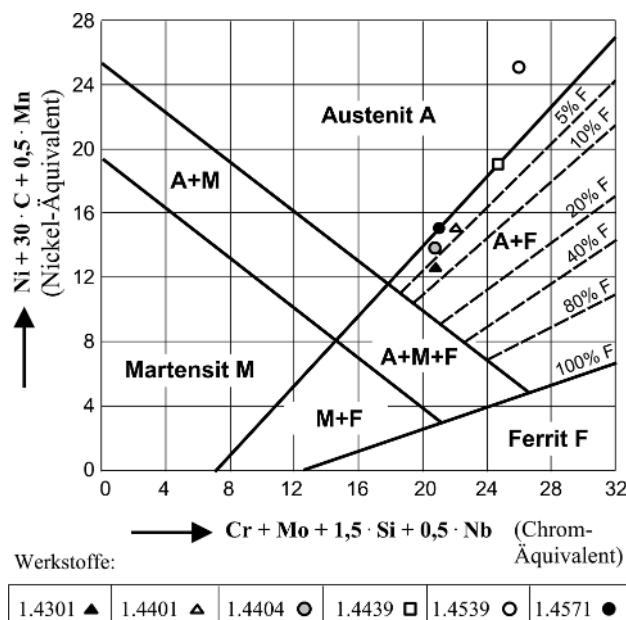


Abb. 1.25 Gefügearten von Edelstählen im Schäffler-Diagramm.

1.2.1.2 Nachbehandlung von Schweißnähten

Eine Wärmenachbehandlung ist bei austenitischen Edelstählen in der Regel nicht erforderlich. Bei unstabilisierten Werkstoffen mit normalem C-Gehalt kann z. B. bei großen Wandstärken Cr-Karbid an den Korngrenzen durch Glühen bei Temperaturen von 950–980 °C rückgängig gemacht werden. Schmiermittelreste sind vorher vollständig zu beseitigen. Die Haltezeit sollte je nach Wanddicke 30 min bis mehrere Stunden betragen. Ein Lösungsglühen bei Temperaturen von 1000–1150 °C mit nachfolgendem schnellen Abkühlen wird man bei geschweißten Bauteilen nach dem Schweißen durch Auswahl geeigneter Grund- und Zusatzwerkstoffe fast immer vermeiden können. Ein Spannungsarmglühen der austenitischen Stähle kann bei Temperaturen bis maximal 550 °C erfolgen.

Oxidhäute und Anlauffarben auf und neben der Naht, die eine Unterbrechung der passiven Werkstoffoberfläche ergeben, können bei Schutzgasschweißverfahren durch einen hinter dem Lichtbogen herlaufenden Schutzgasstrom wirksam vermieden werden. Entscheidend ist, dass der Sauerstoffgehalt in der Nahtumgebung im Bereich von $n < 40$ ppm liegt (s. auch [30]).

Flussmittel, Zunder und Anlauffarben lassen sich durch Schleifen oder Bürsten mit nicht rostenden Stahlbürsten mechanisch entfernen. Das Strahlen mit Glasperlen ist wegen der nicht reinigbaren Oberflächenstruktur zu vermeiden (s. auch Abschnitt 1.1.1). Trockenschleifen kann bei zu hohem Anpressdruck wegen der schlechteren Wärmeableitung die Oberfläche oxidieren, die mit Feuchtigkeit eine gelbbraune Farbe annimmt.

Es ist schwierig, Schweißnähte auf genau die gleiche Oberflächengüte des benachbarten Werkstoffes nachzuarbeiten. Mit einiger Erfahrung lassen sich aber gute Ergebnisse erzielen. Nach einem größeren Vorschleifen benutzt man zum Fertigschleifen Körnungen bis 240 vorzugsweise in Kautschukbindung. Dabei ist darauf zu achten, dass die geschliffenen Bereiche nicht tiefer als die Oberfläche des umgebenden Metalls liegen.

Beim Polieren kann nach den Empfehlungen der Tabelle 1.3 verfahren werden. Der letzte Strich sollte immer so ausgeführt werden, dass die Riefen zu denen des benachbarten Metalls parallel gerichtet sind. Manchmal gelingt es besser, die Schweißnaht auf die Oberflächengüte des benachbarten Metalls nachzuarbeiten, indem man zunächst auf eine feinere Oberflächengüte vorbearbeitet und erst zum Schluss mit der richtigen, größeren Körnung nachschleift.

Tabelle 1.3 Erreichbare Rauheitswerte R_t bei mechanischem Polieren bei einer Ausgangsrauheit von $R_t = 1,2 \mu\text{m}$.

Rauheit R_t in μm	bis 0,9	etwa 0,7	etwa 0,6	etwa 0,5	etwa 0,35	etwa 0,25
Polierpaste	besonders griffig und fett			hochglanz, trocken		
Polierhilfsmittel	Fiberbürste	Sisalkordelscheibe	Sisalscheibe imprägniert	Baumwollscheibe hart	Baumwollscheibe hart	Baumwollscheibe weich

Zur chemischen Behandlung von Schweißnähten werden Beizlösungen oder -pasten eingesetzt. Nach dem Fertigbeizen müssen sämtliche Teile gründlich gewässert werden, weil sonst Säurereste zurückbleiben, die gelbbraune Flecken hervorrufen.

1.2.1.3 Schweißverfahren

Bis auf Gasschmelzverfahren können nicht rostende Edelstähle mit denselben Verfahren und Schweißgeräten gefügt werden wie sie bei unlegierten oder niedrig legierten Stählen eingesetzt werden. Für hohe Nahtqualitäten sind allerdings spezielle Vorgaben zu beachten (s. auch [1]).

Beim Schweißen sollte nach Stand der Technik wegen der erforderlichen hohen Qualität soweit wie möglich automatisch geschweißt werden. In vielen Fällen lassen sich allerdings bei Fertigung und Installation Handschweißungen nicht vermeiden. Gut ausgebildete, geübte und geprüfte Schweißer erreichen jedoch ebenfalls ausgezeichnete Nahtqualitäten.

Blank Stabelektronen können beim Schweißen von Edelstählen nicht verwendet werden, da der Lichtbogen instabil ist und das Schweißgut nicht die notwendige Zusammensetzung erhält. Beim Schweißen mit *umhüllten Stabelektronen* werden Stab und Umhüllung abgeschmolzen. Schutzgasbildner aus der Umhüllung bilden einen Schutzgasmantel aus CO₂ um den Lichtbogen. Die entstehende Schlacke schützt in erster Linie die von der Elektrode abschmelzenden Tropfen sowie das Schweißbad vor dem Zutritt von Luft. Sie soll sich nach dem Erkalten leicht von der Schweißraupe abheben lassen. Bei Feuchtigkeit in der Elektrodenumhüllung entstehen offene Poren in der Naht und bei empfindlichen Stählen Kaltrisse. Außerdem muss bei den hochlegierten Elektroden für Edelstähle mit niedrigerer Stromstärke und kürzerem Lichtbogenabstand als bei üblichen Elektroden geschweißt werden.

Beim *Unterpulverschweißen* (UP) brennt der Lichtbogen zwischen der blanken Drahtelektrode und dem Werkstück verdeckt unter dem lose aufgeschütteten Pulver, das den Schutz der Naht bewirkt und die Schlacke bildet. Bei falscher Zusammensetzung können durch Zu- bzw. Abbrand von Legierungselementen unerwünschte Gefügeänderungen entstehen. Das Verfahren benötigt kein Schutzgas, kann aber ohne Vorkehrungen nur in horizontaler Position angewandt werden [35]. Von Vorteil ist die hohe Schweißgeschwindigkeit bei großen Blechdicken, wie z. B. bei Druckbehältern ohne Nahtvorbereitung. Die Schlacke deckt dabei die Schmelze recht zuverlässig ab. Der metallische Zusatzanteil ist mit bis zu 30 % im Pulver enthalten. Von Nachteil ist die Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeit. Außerdem muss sich die Schlacke gut von der Schmelze trennen und später abschlagen lassen.

Beim am häufigsten eingesetzten Wofram-Inertgas-Schweißen (WIG) enthält das Schweißgerät gemäß Abb. 1.26 eine Wolframelektrode, die von einem Schutzgasstrom hoher Reinheit umspült wird und den Schweißbereich vor Luftpzutritt schützt [36]. Bei maschinellen Verfahren werden zur Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit auch Argon-Wasserstoff-Gemische wie z. B. R1 [37] verwendet. Das Schweißen erfolgt mit Gleichstrom, wobei die nicht abschmelzende Wolframelektrode mit dem Minuspol verbunden wird.

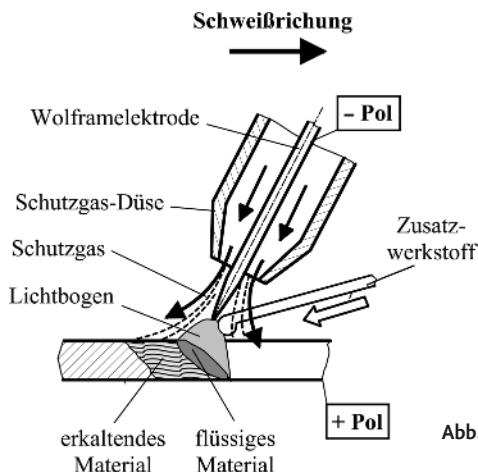


Abb. 1.26 Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG).

Das WIG-Schweißen ist für alle Positionen und besonders für dünne Bleche und Wurzelschweißungen geeignet. Es ermöglicht saubere, glatte, krater- und porenfreie Nähte, vor allem bei Wurzellagen, die nicht gegengeschweißt werden können. Um höchste Schweißnahtqualitäten zu erreichen, können Fehlstellen durch den Einsatz von Zündblechen oder die Überlagerung des Zündstroms mit Hochfrequenz ausgeschaltet werden. Um beim Zünden des Lichtbogens einen besseren Einbrand zu erzielen und beim Löschen starke Endkrater und Endkraterrisse zu vermeiden, kann die Stromstärke beim Zünden erhöht und beim Löschen vermindert werden. Die Endkrater sind vor dem Weiterschweißen zu entfernen. Um glatte Nahtunterseiten zu erhalten, kann man beim Mehrlagenschweißen nur die Wurzelseite mit WIG schweißen. Für die Folgelagen lässt sich dann z. B. das Metall-Inert-Gas-Verfahren (MIG) anwenden.

Die austenitischen Werkstoffe 1.4301, 1.4541, 1.4401 und 1.4571 lassen sich bis etwa 3 mm Blechdicke ohne Schweißzusatz fügen. Bei Stählen 1.4435, 1.4439, 1.4539 und 1.4462 werden vorwiegend Schweißzusätze verwendet.

Das *Orbitalschweißen* von Rohren, eine teilmechanisierte Anwendung des WIG-Schweißens, ist im Hinblick auf Hygienic Design Stand der Technik. Dabei wird der Lichtbogen gemäß Abb. 1.27 um die feststehenden Rohrenden geführt [38]. Das Verfahren wird heute bei hohen Qualitätsansprüchen an Schweißnähte überall eingesetzt. Von Vorteil ist die flache, gleichmäßige und mit geringer Rauheit erzielbare Wurzel, die häufig nicht mehr nachbehandelt werden muss. Die Nahtgüte hängt dabei wesentlich von der Nahtvorbereitung sowie der Minimierung der Toleranzen ab, die für jeden Anwendungsbereich individuell erprobt und festgelegt werden müssen. Für entstehende Anlauffarben ist hauptsächlich der Sauerstoffgehalt beim Schweißen verantwortlich. Nach [30] werden bei Anteilen von $n < 40$ ppm Sauerstoff akzeptable Nähte nahezu ohne Anlauffarben erzielt, sodass eine Nachbehandlung entfallen kann.

Dem beim *Plasmaschweißen* (WPL) verwendeten ionisiertem einatomigem Gas, das den Lichtbogen bildet, können beim Schweißen von austenitischen Edelstäh-

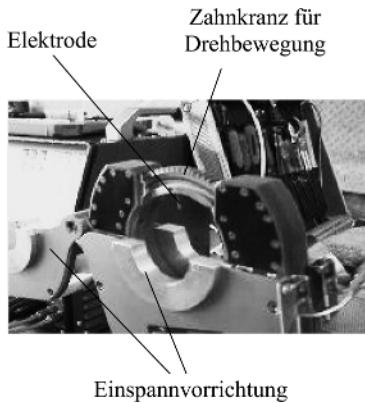


Abb. 1.27 Orbitalschweißgerät.

len geringe Anteile an Wasserstoff zugesetzt werden. Der Lichtbogen brennt unter einer inerten Schutzgasatmosphäre von der nicht abschmelzenden Elektrode zum Werkstück. Durch eine wassergekühlte Düse mit geringem Durchmesser wird der Lichtbogen eingeschnürt und scharf gebündelt, sodass eine erheblich höhere Energiedichte als beim WIG-Schweißen erreicht wird (Abb. 1.28). Häufig kann ohne Schweißzusatz gearbeitet werden. Ansonsten wird er extern zugeführt. Wesentliche Vorteile des Verfahrens liegen in der hohen Schweißgeschwindigkeit bei schmaler Raupe und schmaler Wärmeeinflusszone. Aufgrund des schmalen Nahtbereichs ist eine genaue Nahtvorbereitung nötig. Von Vorteil ist die qualitativ hochwertige Nahtoberfläche ohne Gefahr von Bindefehlern oder Problemen beim Durchschweißen sowie die geringe Empfindlichkeit gegen Toleranzen und kleine Abweichungen.

Zum Ausschneiden komplizierter Formen aus Blechen wird häufig das *Plasmuschneiden* eingesetzt, bei dem der metallische Werkstoff durch den Plasmastrahl geschmolzen und aus der Schnittfuge ausgeblasen wird. Mit dem Verfahren lassen sich nahezu alle metallischen und nicht metallischen Werkstoffe schneiden.

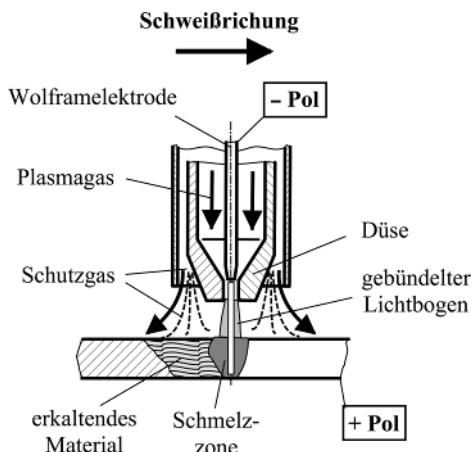


Abb. 1.28 Plasmaschweißen.

Das *Elektronenstrahlschweißen* ist das qualitativ hochwertigste Schmelzschweißverfahren. Dabei werden gebündelte Elektronen durch hohe Gleichspannung im Vakuum beschleunigt. Das Schweißteil befindet sich ebenfalls in einem evakuierten Raum. Das Verfahren erlaubt Schweißarbeiten mit schmaler Wärmeeinflusszone und großer Tiefenwirkung. Es können Bleche bis zu 150 mm Stärke mit hoher Präzision und ausgezeichneter Qualität der Nähte geschweißt werden. Aufgrund des gezielten Wärmeeintrags entstehen schlanken und damit verzugsarme, fast schrumpfungsfreie Nähte. Auch bei dickeren Blechen bis z. B. 100 mm ist keine Vorbehandlung erforderlich. Die Verbindung verschiedener Werkstoffe ist ebenfalls bei größter Reinheit der Naht möglich. Hochpräzise Trennflächen können bei Anwendung des Verfahrens zum Trennen erreicht werden.

Beim *Laserstrahlschweißen* wird aufgrund der Fokussierung des Strahls der Werkstoff lokal sehr eng begrenzt aufgeschmolzen. Dabei entsteht eine Dampfkapillare (keyhole), die einen Tiefschweißeffekt erzeugt. Aufgrund der konzentrierten Wärmeeinbringung und der schnellen Wärmeabfuhr lassen sich schmale Nähte mit einem großen Verhältnis von Tiefe zu Breite erzeugen [39]. Wesentliche Merkmale und Vorteile sind hohe Leistungsdichte, kleiner Strahl-durchmesser, hohe Schweißgeschwindigkeiten, berührungsloses Werkzeug und das Schweißen ohne Zusatzwerkstoff. Die geringe Wärmeeinflusszone äußert sich in minimaler thermischer Belastung und geringem Verzug. Außerdem ist das Schweißen fertig bearbeiteter Bauteile sowie unterschiedlicher Werkstoffe möglich.

1.2.1.4 Hygieneanforderungen an die Nahtausführung

Schweißnähte unterscheiden sich von üblichen Edelstahloberflächen durch Gefügeveränderungen sowie eine raupenartige Nahtoberfläche mit höherer Rauheit und unterschiedlicher Struktur. Unbearbeitete, qualitativ hochwertige Schweißnähte erreichen bei guter Inertisierung Rauheitswerte von etwa $R_a = 3 \mu\text{m}$. Trotz der Höhe dieser Werte ist damit ein relativ geringes Hygienerisiko verbunden, da die Schweißnahtfläche im Verhältnis zur gesamten produktberührten Oberfläche von Apparaten klein und die Schweißraupe wellig ist. Man kann daher in vielen Hygienebereichen diese Rauheiten akzeptieren. Eine Validierung der Reinigung muss Nahtstellen einbeziehen. Bei unzugänglichen Schweißnähten ist die gefertigte Nahtqualität durch Probeschweißungen abzusichern. Nähte nach üblichen Industriestandards, bei denen die R_a -Werte im Bereich von 7–8 μm oder mehr liegen, sind aus hygienischer Sicht für Produktbereiche nicht akzeptabel [29].

Qualitativ hochwertige, z. B. automatisch geschweißte, Nähte können ohne mechanische Nachbearbeitung akzeptiert werden. Konkrete Angaben über Anforderungen an Rauheiten sind für manche Produktbereiche vorgegeben. Für milchwirtschaftliche Tanks und Apparate werden für Schweißnahtrauheiten von zugänglichen Nähten z. B. Werte nach Tabelle 1.4 nach DIN 11 480 [40] gefordert. Weiterhin wird in DIN 10 502 [41] für Transportbehälter für flüssige Lebensmittel ebenso wie bei Bearbeitung durch Schleifen bei geschweißten kaltgewalzten Blechen eine mittlere Rauheit von $R_a < 1,6 \mu\text{m}$ gefordert, während die Rauheit bei geschweißten warmgewalzten Blechen $R_a < 3,2 \mu\text{m}$ betragen soll.

Tabelle 1.4 Rauheitsanforderungen an Schweißnähte nach DIN 11 480 [40].

Anforderungsstufe	Arithmetischer Mittennauwert R_a der Schweißnaht [μm]	Anwendungsbeispiel
A	< 1,0	Produktbehandlung
B	< 1,2	Produktlagerung Prozessbehälter
C	< 0,2	besondere mikrobiologische Anforderungen

Um eine korrosionsbeständige passive Oberfläche zu erreichen, wird nach Stand der Technik das Beseitigen von Anlauffarben vorgeschrieben. Im Allgemeinen werden dafür Beizverfahren eingesetzt. Wenn die hygienerelevanten Anforderungen der Schweißnaht nicht erreicht werden, müssen an zugänglichen Oberflächen Schweißspritzer, Anlauffarben oder andere Oxidationsprodukte durch mechanische Behandlungen in Form von bürsten, schleifen oder polieren entfernt werden. Bei hohen Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit sind ein anschließendes Beizen und eventuell zusätzliches Passivieren erforderlich [19].

Beim Abtrag der Schweißraupe durch Schleifen sollte die Oberflächenqualität des nicht geschweißten Materials durch die verwendete Feinheit des Korns erreicht werden. Besondere Anforderungen können ein mechanisches Polieren oder Elektropolieren erforderlich machen.

Bei einer hygienischen Gesamtbeurteilung stellen Schweißnähte hochsensible Stellen dar, die im mikroskopischen und makroskopischen Bereich durch Poren, Spalte und Anrisse erhebliche Auswirkungen auf die Reinigbarkeit haben können. Ursachen für Werkstofffehler in der Naht wie Heiß- und Kaltrisse oder Poren sind meist falsche Einstellung der Schweißparameter wie z. B. Strom, Spannung und Schweißgeschwindigkeit. Für Bindefehler zwischen der Schmelze und dem umgebenden Material kann zu geringer örtlicher Wärmeeintrag verantwortlich sein. Nicht metallische Einschlüsse führen zum Terrassenbruch (lamellar tearing). Gase wie N_2 oder H_2 , die beim Erstarren der Schmelze nicht mehr entweichen können, ergeben Poren. Daher muss bei erkennbarem Sieden langsamer geschweißt werden, damit keine Gase in der Schmelze verbleiben. Bei Überkopfschweißen ist das Entweichen der Gase nicht möglich. Heißrisse entstehen bei der Erstarrung der Schmelze durch unterschiedliche Erstarrungstemperaturen und Schrumpfung, z. B. an den Korngrenzen zwischen erstarrtem Werkstoff und der Schmelze, weil die Schmelze dort nicht mehr nachfließen kann. Für Kaltrisse, die meist erst nach längerer Zeit (nach Stunden bis Jahren) auftreten, ist das Vorhandensein von Wasserstoff notwendig, der erst in verformte Bereiche eindiffundieren muss. Bei dicken Blechen ist wegen der höheren Ankühlgeschwindigkeit eher mit Kaltrissen zu rechnen als bei dünnen.

Um die Einsatzfähigkeit von Bauteilen nicht zu beeinträchtigen, müssen Schweißverbindungen nach DIN EN 1011-3 [36] generell frei von Unregelmäßig-

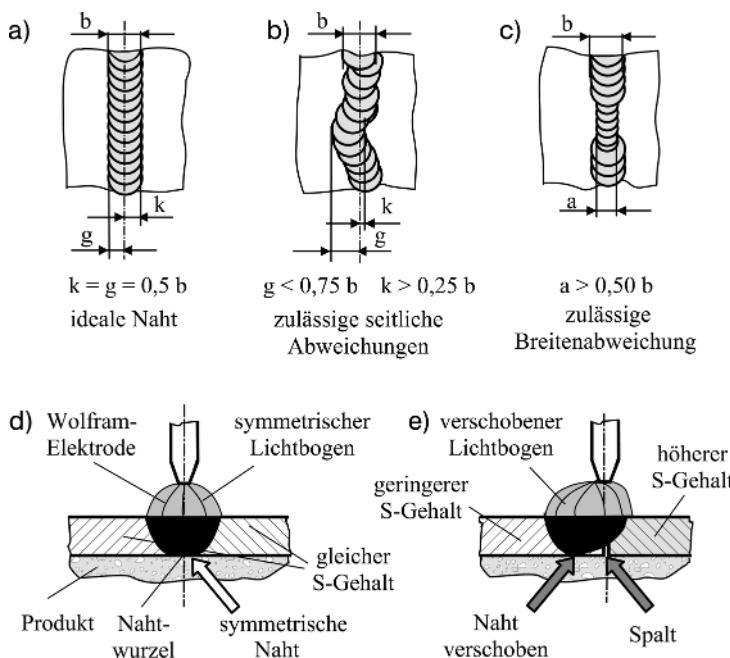


Abb. 1.29 Gleichmäßigkeit von Nähten:
 (a) ideale Naht, (b) zulässige seitliche Abweichungen,
 (c) zulässige Abweichung der Nahtbreite,
 (d) Naht bei gleichem Schwefelgehalt der zu verbindenden Teile,
 (e) Lichtbogen und Naht durch unterschiedlichen Schwefelgehalt verschoben (Hygienerico) [26].

keiten sein, was auch die hygienegerechte Ausführung unterstützt. Fehlstellen im Produktbereich können sowohl auf der Schweißseite als auch an der Nahtwurzel auftreten, je nach Lage des Produktkontakte. Generell ist es sicherer, von der Produktseite aus zu schweißen. Ist diese nicht zugänglich, so liegt die kritischere Nahtwurzel mit erhöhtem Risiko für die Nahtqualität auf der produktberührten Seite. In sichtbaren Bereichen ist eine direkt Überprüfung der Nähte möglich, während an unsichtbaren Stellen endoskopisch untersucht werden kann oder Probenähte überprüft werden müssen. Nach [30, 42] sind gemäß Abb. 1.29 sowohl zulässige Abweichungen im seitlichen Verlauf (Abb. 1.29b) auch in der Nahtbreite (Abb. 1.29c) für eine hygienegerechte Naht maßgebend. Eine zusätzliche wichtige Rolle für die Ausbildung des Lichtbogens sowie der Naht spielt der Schwefelgehalt der zu verschweißenden Werkstoffe. Grundsätzlich sollte er möglichst gleich sein, wodurch gemäß Abb. 1.29d eine symmetrische Naht entsteht. Bei ungleichem Gehalt wird der Lichtbogen zur Seite des geringeren abgelenkt (Abb. 1.29e), was zu einer verschobenen Nahtausbildung führt [30]. Bei von außen geschweißten Rohren besteht dadurch die Gefahr, dass die Wurzel nicht durchgeschweißt wird, sodass ein unzulässiger Spalt entsteht.

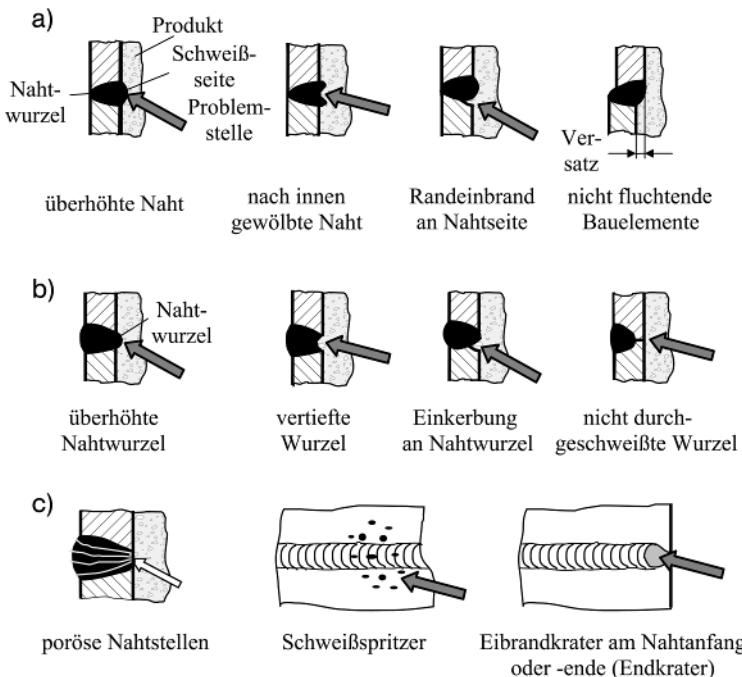


Abb. 1.30 Darstellung von Schweißnahtfehlern:

(a) auf der Schweißseite, (b) an der Nahtwurzel, (c) spezielle Fehlstellen.

Entsprechend Abb. 1.30a können auf der produktberührten Seite Problemzonen sowohl durch Nahtüberhöhungen als auch durch Vertiefungen in der Naht entstehen. Dem sogenannten Durchhängen von horizontalen Nähten infolge Schwerkraftwirkung auf die Schmelze kann durch Pulsen des Lichtbogens mit niedriger Frequenz entgegengewirkt werden. Zum Vermeiden von Versatz an Nähten ist das Fluchten eine wichtige Voraussetzung. Vor allem wenn Bleche mit unterschiedlichen Wandstärken zu verbinden sind, muss die produktberührte Seite zum Fluchten gebracht werden.

Auf der Seite der Nahtwurzel ist die Gefahr von Spalten neben der Nahtwurzel oder eine nicht völlig bzw. gleichmäßig durchgeschweißte Wurzel entsprechend Abb. 1.30b besonders zu beachten. Die Abb. 1.30c zeigt eine poröse Naht durch nicht richtig eingestellte Stromstärke oder Schweißgeschwindigkeit. Die zur Produktseite offenen Fehlstellen können Rekontamination nach der Reinigung durch überlebende Mikroorganismen nach sich ziehen. Im Nahtbereich entstehende Schweißspritzer müssen sorgfältig beseitigt werden. Bei Nahtenden ist darauf zu achten, dass die gleiche Nahtqualität erreicht wird, wie in den restlichen Nahtbereichen. Sogenannte Endkrater, die als Vertiefungen hygienische Problembereiche darstellen, sind z. B. durch Nachschweißen zu beseitigen.

Grenzwerte für Nahtfehler sind in den Unterlagen von ASME bzw. EHEDG in [30] bzw. [42] enthalten. In Anlehnung daran gibt Abb. 1.31 als Beispiele Versatz, Wurzeleinzug, Nahrückzug und -überstand wieder.

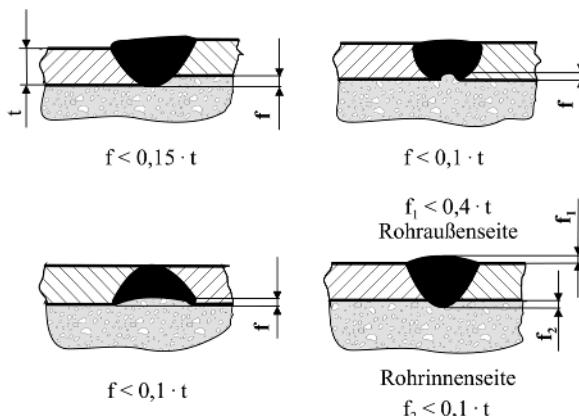


Abb. 1.31 Angaben von Toleranzen für Schweißnahtfehler nach ASME [42] bzw. EHEDG [30].

Ergänzend sind in Abb. 1.32 einige Praxisbeispiele von Edelstahlnähten dargestellt. Die Abb. 1.32a zeigt eine schlecht geschweißte Handnaht mit unregelmäßiger, stark überhöhter Raupe. Die unbehandelt Naht nach Abb. 1.32b weist neben einer Überhöhung Stellen mit geringfügigen Absätzen auf. Die völlig gleichmäßige unbehandelte Naht nach Abb. 1.32c ist maschinengeschweißt und lässt deutlich die Ausbildung der Raupe sowie die hellere Wärmeeinflusszone erkennen. Die einzelnen Raupenglieder sind bogenförmig ausgebildet und haben leicht geneigte glatte Oberflächen, die zum nächsten Glied schräg abfallen. In Abb. 1.32d ist ein fehlerhafter Endkrater einer überlappenden Naht dargestellt, der nachträglich überschweißt wurde. Die Abb. 1.32e zeigt eine automatisch geschweißte Nahtüberlappung mit zwei lochartigen Fehlstellen am Nahtende.

Beim Schweißen von Rohrleitungen ist auf ausreichende Inertisierung der Innenseite zu achten, um nach [29] eine nicht zu reinigende aufgerauta Nahtwurzel gemäß Abb. 1.33a zu vermeiden. Die Ansicht der Wurzel in Abb. 1.33b nach [42] lässt deutlich den Durchhang (Überstand) der Naht mit einer breiten Zone von Anlauffarben erkennen. Nicht inertisierte Nähte dieser Art müssen neu geschweißt werden, um hygienegerechte Verhältnisse zu erreichen.

Kurze Rohrstücke werden zur Inertisierung mit Schutzgas an den Enden mit Blindkappen verschlossen und das Inertgas an einer Seite durch eine Bohrung zugeführt. Bei längeren Rohrleitungsstrecken kann man gemäß Abb. 1.34 ballonartige Abschlussteile verwenden, die mit Druckluft aufgeblasen werden und beiderseits der Naht abdichten. Das Inertgas wird in den abgedichteten Bereich eingeleitet und tritt an der Stoßstelle aus. Nach Fertigstellung der Schweißnaht kann die Vorrichtung am offenen Ende herausgezogen werden.

Bei der Nahtvorbereitung ist auf einen rechtwinkligen, glatten Schnitt der Rohr- oder Fittingenden zu achten. Abrundungen der Schnittkanten führen zu schlechter Nahtausbildung und damit zu hygienischen Problemzonen (Abb. 1.35a). Die Rohrenden müssen fluchtend gespannt werden, da Desaxialitäten zu schlecht reinigbaren Stufen führen. Maximale Abweichungen [29] sind in Abb. 1.35b angegeben. Auch die Rundheit der Rohre spielt eine entscheidende Rolle.

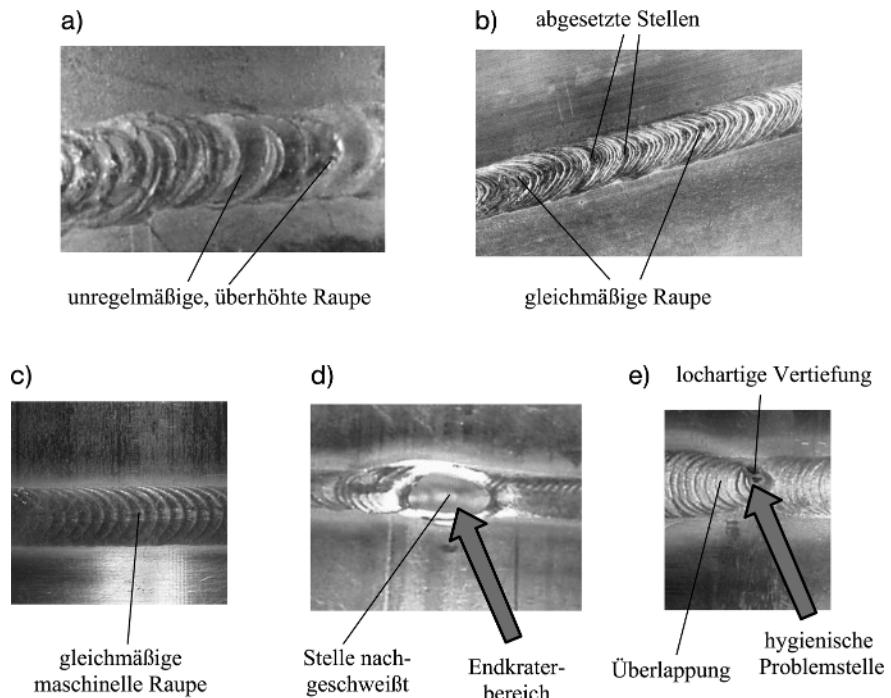


Abb. 1.32 Bilder von Schweißnähten:
(a) unregelmäßige Handschweißung mit hohem Hygienerisiko,
(b) gleichmäßige Schweißraupe mit Unterbrechungen,
(c) maschinengeschweißte, hygienegerechte Schweißnaht,
(d) überschweißter Endkrater,
(e) überlappendes Nahtende mit Fehlstelle.

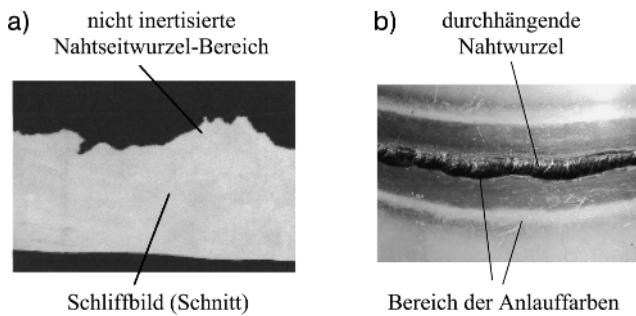


Abb. 1.33 Nicht inertisierte Innenseite einer Rohrnaht:
(a) Querschnitt (nach [29]), (b) Wurzeldurchhang und Anlauffarben (nach [43]).

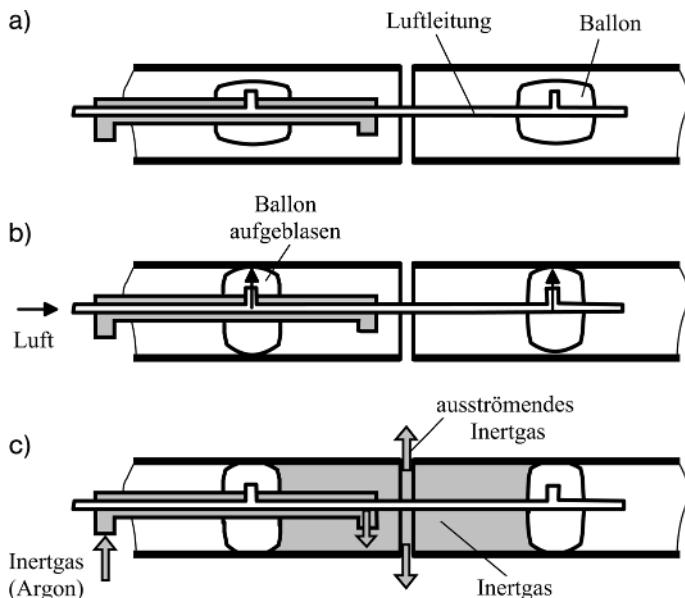


Abb. 1.34 Vorrichtung zum Inertisieren in Rohrleitungen.

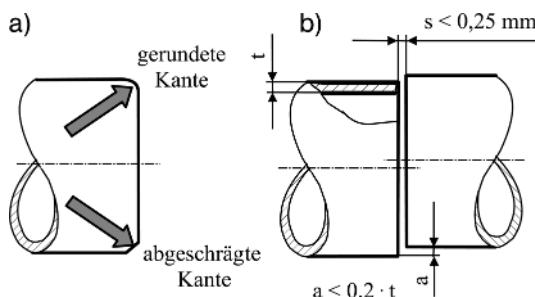


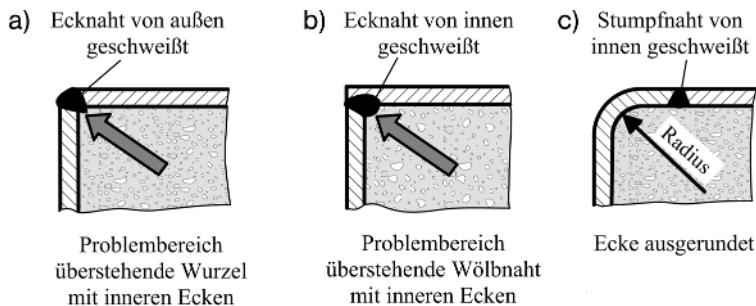
Abb. 1.35 Fehler bei der Nahtvorbereitung:

- (a) Abrunden der Kanten am Außendurchmesser,
- (b) Toleranzen für den Versatz an Rohrenden (nach [29]).

1.2.1.5 Hygienegerechte Gestaltung von Schweißverbindungen

Zunächst sind bei Schweißkonstruktionen alle grundlegenden Gestaltungsprinzipien anzuwenden und Problembereiche auszuschalten, die bereits in Abschnitt 1.1 genannt wurden (s. auch [1]). Einfache grundlegende Beispiele für Hygienerisiken bzw. Hygienic Design sollen im Folgenden als Orientierung dienen.

Schweißnähte in inneren Ecken ergeben aus hygienischer Sicht noch größere Reinigungsprobleme als Ecken ohne Nähte. Obwohl die von innen geschweißte Naht nach Abb. 1.36a eventuell in Qualität und Oberflächenstruktur während des Schweißens kontrolliert werden kann, stellen vor allem die Nahtseiten schlecht reinigbare Bezirke dar. Wegen der ungünstigen Lage ergeben von außen durch-

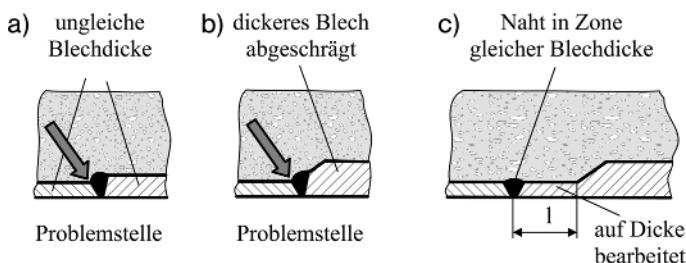
**Abb. 1.36** Schweißnähte in Ecken:

- (a) Hygieneproblem durch im Eck überstehende Nahtwurzel,
 (b) hygienische Fehlstelle durch Nahtwölbung im Eck einer von innen geschweißten Naht,
 (c) hygienegerecht gestaltete und ausgeführte Schweißung.

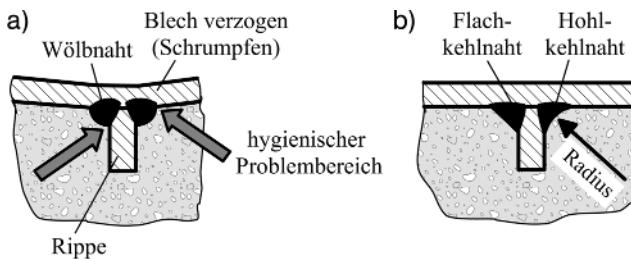
geschweißte Nahtwurzeln bei dünneren Blechen (Abb. 1.36b) ein erhebliches Hygienerisiko. Eine hygienegerechte Gestaltung setzt entsprechend Abb. 1.36c voraus, dass das Blech in dem Eckbereich mit einem ausreichenden Radius gebogen wird und die Naht in den nicht verformten Teil verlegt wird.

Beim Verschweißen unterschiedlicher Wandstärken beeinflussen geringe Unterschiede die hygienegerechte Gestaltung der Naht kaum. Bei größeren Unterschieden bilden häufig die unsymmetrisch ausgebildete Naht und deren Wölbung gemäß Abb. 1.37a hygienische Probleme. Eine Verbesserung ist durch Abschrägen der Kante des dickeren Blechs (Abb. 1.37b) möglich, was eine mechanische Vorbereitung erfordert. Um auf sichere Weise hygienegerechte Verhältnisse zu erreichen, sollte das Blechende des dickeren Blechs auf die Dicke des dünneren gebracht und in ausreichendem Abstand l zur Abschrägung gemäß Abb. 1.37c geschweißt werden. Wenn möglich, sollte eine Stufe in den Nicht-Produktbereich verlegt werden.

T-Stöße im Produktbereich sollten soweit wie möglich vermieden werden, da sie zwangsläufig gemäß Abb. 1.38a innere Ecken ergeben, die nicht ausgerundet werden können. Falls nicht vermeidbar, sind Kehl- oder Hohlkehlnähte Wölbna-

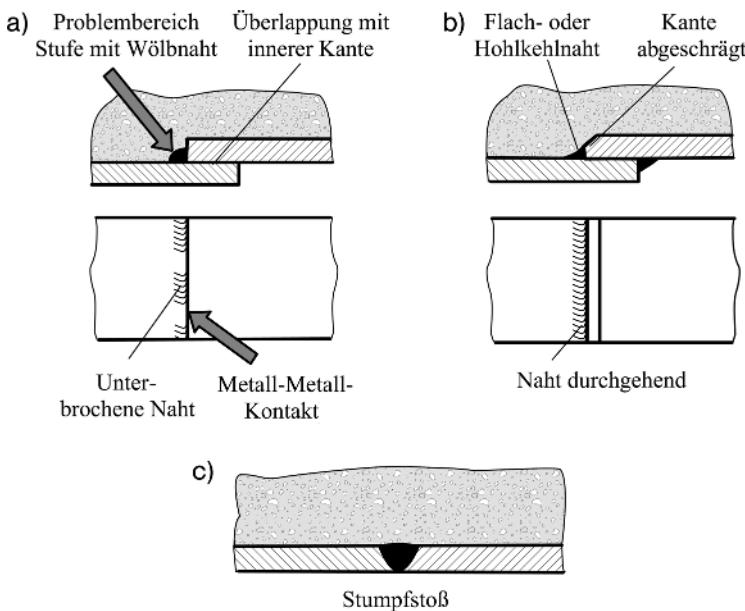
**Abb. 1.37** Schweißen unterschiedlicher Blechstärken:

- (a) Hygienerisiko durch Stufe und überstehende Naht,
 (b) verbesserte Gestaltung durch abgeschrägtes Blech, aber vorgewölbte Naht,
 (c) hygienegerechte Gestaltung durch Naht im Bereich gleicher Wandstärken.

**Abb. 1.38** T-Stoß:

- (a) Hygienerisiko durch Wölbnähte und Verziehen durch Schrumpfen,
 (b) hygienegerechte Hohlkehlnaht.

ten vorzuziehen, da sich dadurch günstiger reinigbare Eckbereiche (Abb. 1.38b) ergeben. Auch überlappende Schweißverbindungen entsprechend Abb. 1.39a oder in verbesserter Form nach Abb. 1.39b sind wegen der entstehenden Stufen möglichst zu vermeiden. Außerdem müssen aus hygienischen Gründen alle produktberührten Schweißnähte mit Ausnahme von Trockenbereichen durchgehend geschweißt werden. Unterbrochene Nähte ergeben an Stellen der direkten Werkstoffberührung eine mikroskopische Spaltbildung. Zusätzlich können sich durch

**Abb. 1.39** Blechverbindungen:

- (a) Hygienerisiko durch überlappende unterbrochene Wölbnähte,
 (b) verbesserte Gestaltung bei überlappenden Blechen durch durchgehende Flach- oder Hohlkehlnah und Abschrägung der Blechkante,
 (c) hygienegerechte Gestaltung als Stumpfstoß mit durchgehender, einwandfrei ausgeführter Naht.

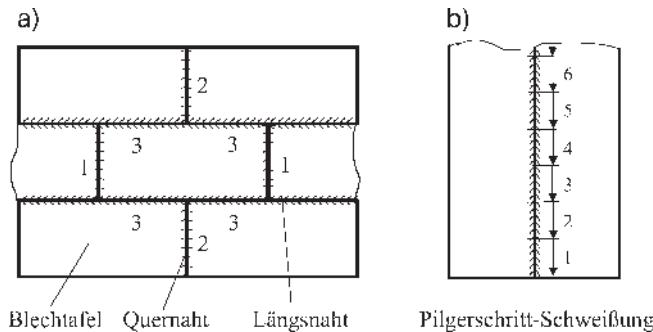


Abb. 1.40 Ausführung größerer, ebener Blechwände:
 (a) Schweißfolge um Verformungen durch Schrumpfen zu minimieren,
 (b) Pilgerschritt-Verfahren zur Verringerung des Schrumpfens.

Schrumpfen Bereiche verziehen. Mittel der Wahl sind durchgehend geschweißte Stumpfstöße unter Einhaltung der geforderten Nahtausführung (Abb. 1.39c).

Bei größeren ebenen Blechplatten, die z. B. als Böden von Behältern verwendet werden, ist das Verziehen durch Schrumpfspannungen ein besonderes Problem. Verwerfungen in horizontalen Bereichen behindern vor allem das selbstdämmige Ablaufen. Grundsätzlich sollte von innen nach außen geschweißt werden, um Dehnungen nicht zu behindern. Aus dem gleichen Grund werden gemäß Abb. 1.40a zuerst Quernähte und danach Längsnähte geschweißt. Außerdem kann dadurch der Schweißspalt jeweils konstant gehalten werden. Bei langen Längsnähten sollte vor allem beim Handschweißen abschnittsweise geschweißt werden, wie es Abb. 1.40b am Beispiel des Pilgerschrittschweißens zeigt. Dabei können die einzelnen kleineren Bereiche abkühlen, bevor ein Weiterschweißen erfolgt.

1.2.2

Kunststoffe

Beim Schweißen von Kunststoffen können bei entsprechender Erfahrung mit Nahtvorbereitung, Temperatur, Zusatzwerkstoff und Schweißgeschwindigkeit hohe Nahtqualitäten garantiert werden, die allen Anforderungen an Hygiene gerecht werden. Umgekehrt können durch nicht fachgerechtes Schweißen erhebliche hygienische Problembereiche entstehen.

Je nach Ausführung der Bauteile und Art der Kunststoffe werden unterschiedliche Verfahren verwendet, von denen einige beispielhaft beschrieben werden (siehe z. B. [44, 45]).

Kunststoffe die – wie Polymere – schmelzbar sind, können im Grenzbereich zwischen plastischem Fließen und voll aufgeschmolzenem Zustand geschweißt werden. Eine einwandfreie Schweißverbindung ist jedoch im Gegensatz zu Metallen nur möglich, wenn die erwärmten Stoßstellen mit Kraft gefügt werden. Dabei werden die Makromoleküle der Randzonen ineinander verschoben, sodass sie

sich durchdringen und verfilzen. Die beim Schweißen notwendigen Arbeitsgänge umfassen im Wesentlichen das Bearbeiten, Reinigen, Erwärmen und Zusammenpressen der Fügeflächen. Das Abkühlen erfolgt anschließend meist ebenfalls unter Anpressdruck. Die Art des Verfahrens ist gleichzeitig entscheidend für die erzielbare Oberflächenqualität der Schweißstelle.

1.2.2.1 Schweißverfahren

Beim *Heizelementschweißen* werden die Werkstücke aus thermoplastischen Kunststoffen mit Heizelementen erwärmt und unter Kraft mit oder ohne Schweißzusatz gemäß Abb. 1.41 gefügt. Durch das Anpressen entsteht im Allgemeinen ein Wulst, der als hygienische Problemstelle anzusehen ist. Bei unverstärkten Kunststoffen kann dabei die Festigkeit des Grundmaterials erreicht werden.

Spezielle Anwendung ist das mechanisierte Schweißen von Rohrleitungselementen aus Polymeren, die sich für eine Vielzahl von Anlagen und Medien bis hin zu hochreinem Wasser eignen. Für Letzteres bietet sich PVDF wegen seiner hochwertigen Oberfläche sowie des zulässigen Temperaturbereichs an. Zum Beispiel wird beim *WNF-Verfahren* [46] mittels halbschaliger Heizelemente eine definierte Wärmeenergie in die zu verschweißenden Rohrenden eingebracht. Zur Vermeidung eines Wulstes stützt ein elastischer Druckkörper die Innenseite der Schweißzone ab, die nahezu spannungsfrei ist und eine Oberflächengüte von $Ra \leq 0,25 \mu\text{m}$ erreicht. Ein Vergleich von Naht mit Wulst und WNF-Naht ist in Abb. 1.42 dargestellt. Das Verfahren erlaubt, komplexe Installationen und lange Rohrleitungsabschnitte wulst- und nutfrei reproduzierbar zu verschweißen.

Bewährte andere Werkstoffe für das Heizelementschweißen sind z. B. PMMA, PP, PVC, PE, PS, ABS, POM und bestimmte PA-Sorten. Außerdem lassen sich PMMA mit ABS, PVC und PS gut verschweißen. Anwendungsgebiete sind das Schweißen von Rohrkörpern aller Art, Sensoren, Bauteile der Medizintechnik und Gehäuse von Geräten.

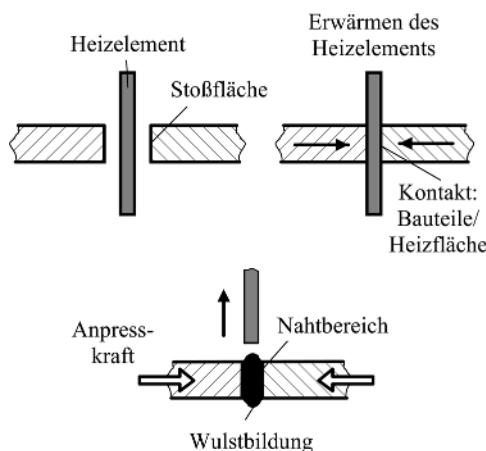


Abb. 1.41 Prinzip des Heizelementschweißens bei Kunststoffen.

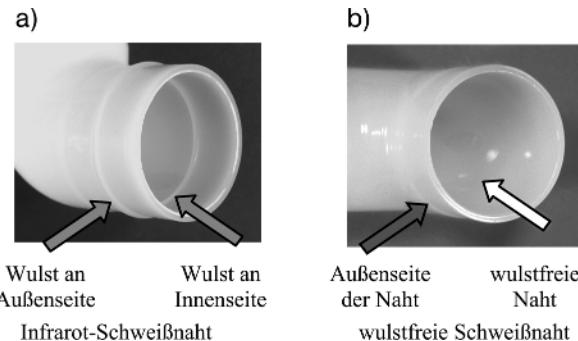


Abb. 1.42 Schweißnähte an Kunststoffrohren:
 (a) infrarotgeschweißter Rohrabschluss mit Wulst,
 (b) wulstfreie Heizelementschweißung eines Rohrs.

Beim *Warmgasschweißen* wird als Wärmequelle ein Gasstrom verwendet, der den Bauteilen über eine Düse zugeführt wird. Der erforderliche Druck wird meist durch den Schweißzusatz ausgeübt. Für Anwendungen in hygienerelevanten Bereichen sind Nahtvorbereitung, Schweißposition, Temperatur und Zusatzmaterial entscheidend. Dabei müssen die Schweißparameter über Steuerung oder Regelung von Temperatur und Gasmenge konstant gehalten werden. Typische Anwendungsbereiche sind das Schweißen von dickeren Formteilen und Rohren.

Beim *Ultraschallschweißen* von Polymeren werden die zu verbindenden Bauteile in der Fügezone durch gezieltes Umwandeln von Schallenergie in Wärme unter Druck plastifiziert. Der dabei normalerweise an der Nahtstelle entstehende Grat, der im Produktbereich eine hygienische Problemzone darstellt, kann meist durch gezielte konstruktive Maßnahmen vermieden werden.

Das *Infrarotschweißen* eignet sich gut für kleinflächige Bereiche und kann automatisiert werden. Durch geringe Tiefenwirkung und kurze Einwirkzeit der Infrarotstrahlung wird das Zersetzen des Werkstoffes vermieden.

Für das Schweißen von Rohrleitungen kann das Infrarot-Stumpfschweißen eingesetzt werden, bei dem man die erwärmten Rohrenden um einen definierten Weg (Fügeweg) zusammenfährt, wodurch sich der Anpressdruck ergibt. Dadurch lässt sich ein wesentlich kleinerer Wulst als er bei herkömmlichen Verfahren erzielen. Fast alle gebräuchlichen Thermoplaste wie PE, PP, PC und bestimmte PA-Sorten können problemlos verarbeitet werden.

Beim *Laserschweißen* von thermoplastischen Kunststoffen erfolgt die Wärmeerzeugung mit einem Laserstrahl [47]. Typisch für dieses Verfahren ist die überlappende Verbindung, wobei der obere Fügepartner für die eingesetzte Laser-Wellenlänge weitgehend transparent sein muss, während der untere sie deutlich absorbieren muss. Dies führt zum Schmelzen an der Stoßstelle. Neben der Automatisierbarkeit ist die gute Zugänglichkeit an kompliziert geformten Bauteilen ein Vorteil des Verfahrens. Es kann z. B. für Dichtschweißungen von Vorratsbehältern für Flüssigkeiten angewendet werden.

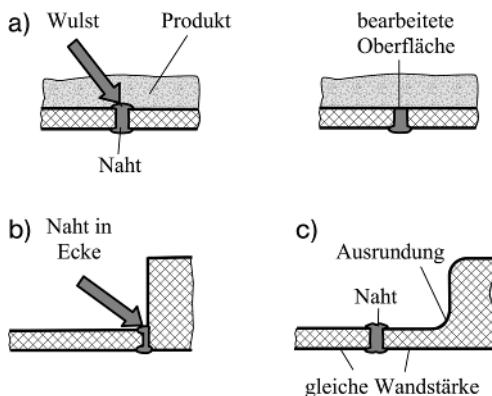


Abb. 1.43 Gestaltung von Kunststoff-Schweißverbindungen:
 (a) Stumpfstoß mit unbearbeitetem Wulst und bearbeiteter Naht,
 (b) Schweißnahtwulst in Ecke bei ungleichen Wandstärken,
 (c) Naht im Bereich gleicher Wandstärke, Ecke ausgerundet.

1.2.2.2 Hygieneanforderungen

Wie erwähnt, wird beim Schweißen von Kunststoffen durch den notwendigen Anpressdruck häufig ein überstehender Wulst erzeugt, der entsprechend Abb. 1.43a einen hygienischen Problembereich darstellt. Eine mechanische Bearbeitung zur Beseitigung des Wulstes kann zu einer aufgerauten porigen Oberfläche führen. Besonderes Augenmerk ist zusätzlich auf die Gestaltung der Bauteile im Nahtbereich zu legen, da Kunststoffbauteile stark kerbempfindlich sind, sodass an Kerbstellen Anrisse entstehen können. Die Gestaltungsmaßnahmen sind daher nicht mit denen von Metallen zu vergleichen. Vor allem müssen Schweißnähte in Ecken gemäß Abb. 1.43b vermieden und entsprechend Abb. 1.43c weit genug von Querschnittsänderungen entfernt sein, die z. B. durch Änderung der Wandstärke, durch Bohrungen oder Nuten entstehen. Besonders wichtig ist das Ausrunden von Ecken, um Kerbwirkung zu vermeiden.

1.3

Löt- und Klebeverbindungen

Löten und Kleben gehören ebenso wie das Schweißen zu den festen unlösbareren Verbindungen, die als Stoffschlussverbindungen bezeichnet werden. Sie ermöglichen ein Fügen auch nicht schweißbarer Werkstoffe, wobei ein Bindemittel zum Fügen der Bauteile benutzt wird. Aufgrund der grundlegenden Aussagen von DIN EN 1672-2 [26] und ISO 14 159 [27] ist Kleben nach dem Schweißen die bevorzugte Fügeart, während Löten nur in besonderen Ausnahmefällen angewendet werden sollte.

Bei beiden Verbindungsarten ist aus hygienischer Sicht die Eignung des Bindematerials entscheidend, das bei Anwendung im Produktbereich die An-

forderungen bezüglich Produktverträglichkeit erfüllen muss. Zusätzlich ist die hygienegerechte Gestaltung der Verbindung an der Stoßstelle wichtig.

1.3.1

Löten

Unter Löten versteht man das Verbinden erwärmter, nicht schmelzender Metallbauteile durch schmelzende Lote, d. h. metallische Zusatzwerkstoffe. An der Lötstelle müssen die zu lögenden Werkstücke während des Vorgangs mindestens die Bindetemperatur oder Benetzungsstemperatur erreichen. Damit flüssige Lote benetzen und fließen können, müssen die Werkstückoberflächen metallisch rein sein. Dicke Oxidschichten werden mechanisch entfernt. Dünne Oxidschichten, die zum Teil noch während der Erwärmung auf Löttemperatur entstehen, lassen sich durch Flussmittel lösen oder durch Flussmittel bzw. Gase reduzieren.

Die Bindung ist abhängig von den Reaktionen zwischen Lot und Grundwerkstoff sowie der Verarbeitungstemperatur. Neben der reinen Oberflächenbindung im Fall fehlender Legierungsbildung zwischen Grundwerkstoff und Lot tritt in den meisten Fällen Diffusion einer oder mehrerer Komponenten des Lots in den Grundwerkstoff und umgekehrt ein.

In Bezug auf die Verwendung von Lötverbindungen sagt DIN EN ISO 14 159 [27] aus, dass sie ebenso wie Press- und Schrumpfpassungen nur verwendet werden dürfen, wenn Schweißen oder Verkleben nicht möglich ist und es zwingende technologische Gründe erfordern. Wenn nicht vermeidbar, müssen Lötverbindungen ebenso wie andere Verbindungsarten fehlerfrei und ohne Überlappungen hergestellt werden. Zum Glätten von Verbindungen und zur Herstellung von Kehlungen, um die Mindestanforderungen an Ausrundungen zu erfüllen, dürfen Silberlote verwendet werden. Die Abb. 1.44 zeigt als prinzipielles Beispiel eine Lötverbindung zwischen zwei unterschiedlichen Metallen, von denen das dünne Blech z. B. eine Membran sein kann. Da an der Verbindungsstelle im Produktbereich eine scharfe innere Kante entstehen würde, muss die Ecke mit Silberlot ausgerundet bzw. gebrochen werden.

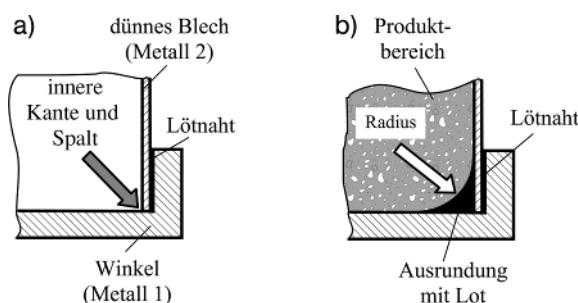


Abb. 1.44 Lötverbindung unterschiedlicher Metalle:

- (a) rechtwinklige innere Kante,
- (b) Ausrundung der inneren Kante mit Silberlot.

1.3.2

Kleben

Kleben wird zum einen bei Metallen angewendet, wenn eine unlösbare Verbindung notwendig ist, die zu fügenden Werkstoffe aber durch das Schweißen nachteilige Veränderungen ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften erfahren, wie z. B. bei sehr dünnen Blechen. Zum anderen dient es zum Fügen von Metallen mit Nichtmetallen, von Nichtmetallen untereinander oder von Kunststoffen. Charakteristische Eigenschaften sind der fehlende oder geringe Wärmeeintrag sowie die Aufrechterhaltung der stofflichen Struktur der zu klebenden Teile im makroskopischen Bereich [48].

Im Wesentlichen sind Adhäsion und Kohäsion für das Kleben verantwortlich. Die Bindefähigkeit gegenüber Materialien wird vorwiegend auf die Adhäsion zwischen Klebstoff und Oberfläche zurückgeführt. Eine Voraussetzung dafür ist, dass der Klebstoff die Oberfläche benetzt und sich ihr damit bis in den Nanobereich anpasst. Um dies zu gewährleisten, ist für die Benetzung eine geringe Viskosität des Klebers erforderlich. Außerdem müssen die Klebeflächen sauber und ausreichend glatt sein. Weiterhin werden zwischen der benetzten Oberfläche und dem benetzenden Klebemittel physikalische oder chemische Wechselwirkungen wirksam. Der mechanischen Haftung infolge mechanischer Verankerung wird weitaus geringere Bedeutung zugemessen. Sie spielt z. B. beim Kleben poröser Stoffe eine Rolle.

In der Schicht des Klebemittels wirkt als physikalischer Effekt Kohäsion, die die Festigkeit oder die Viskosität bewirkt. Eine Erhöhung der Kohäsion wird dadurch erreicht, dass der Klebstoff in der Klebefuge erstarrt oder aushärtet. Dies kann entweder durch eine chemische Reaktion bei Zweikomponentenklebstoffen oder durch einen physikalischen Vorgang, wie das Verdunsten des Lösungsmittels, erfolgen. Der Klebstoff sollte eine möglichst geringe Neigung zum Schrumpfen besitzen. In der Kleberschicht müssen Gas- oder Lufteinschlüsse vermieden werden.

Bei metallischen Werkstoffen eignen sich für Klebverbindungen besonders gut Leichtmetalle auf Aluminium- und Magnesiumbasis und Stahl, weniger gut dagegen Buntmetalle. Spezielle Anforderungen in Zusammenhang mit Klebeverbindungen bei Edelstahl werden in [49] diskutiert. Beim Verkleben von Kunststoffen spielt die Polarität eine besondere Rolle. So können z. B. im Allgemeinen nur polare Kunststoffe miteinander verklebt werden, während die Verbindung von Kunststoffen mit unterschiedlicher Polarität schwierig ist. Die Polarität des Klebemittels lässt sich häufig durch Weichmacher, Harze oder Säuren verändern.

Die hygienischen Anforderungen besagen nach DIN EN ISO 14 159 [27] zunächst, dass Klebstoffe und die daraus hergestellten Verbindungen mit den Oberflächen, Produkten und den Reinigungs- und Desinfektionsmitteln verträglich sein müssen, mit denen sie in Kontakt kommen. Ausführungen über die zulässige Zusammensetzung von Klebstoffen sowie die Anwendung im Lebensmittelbereich finden sich außerdem in [50]. Alle Verbindungen müssen

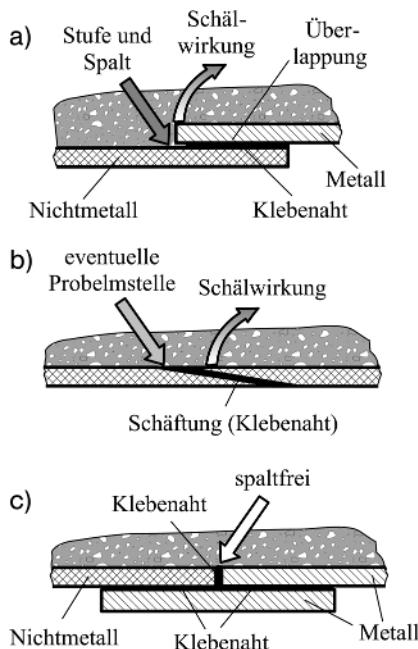


Abb. 1.45 Klebeverbindungen:
 (a) unzulässige Überlappung im Produktbereich, (b) Schäfung,
 (c) außenliegende Überlappung mit spaltfreier Klebung des
 Stumpfstoßes im Produktbereich.

durchgehend und vollständig verklebt sein, sodass sich die Klebstoffe nicht von den Werkstoffen ablösen können. Außerdem müssen die zu verklebenden Oberflächen bündig sein. Da Klebeverbindungen aus Gründen der Festigkeit hauptsächlich in tangentialer Richtung belastet werden sollten, ergibt sich dadurch eine Beeinflussung der konstruktiven Gestaltung. Die Abb. 1.45a zeigt zunächst eine unter Gesichtspunkten von Hygienic Design nicht zulässige überlappende Klebeverbindung, da neben der Stufe im Produktbereich die nicht bündig endende Naht als Risiko zu beachten ist. In Abb. 1.45b sind die zu verbindenden Elemente geschäftet. Diese Art der Verbindung wird dann angewendet, wenn z. B. wie bei Transportbändern beiderseits der Verbindung keine Stufe entstehen darf. Als Problemstelle ist das Nahtende im Produktbereich zu betrachten, da hier durch Beschädigungen oder Beanspruchungen ein Ablösen der geklebten Teile erfolgen kann. Vor allem sogenannte Schälbeanspruchungen unterstützen diesen Vorgang. Eine hygienegerecht ausgeführte Klebeverbindung ist in Abb. 1.45c dargestellt. Im Produktbereich stoßen die verklebten Enden der Bauteile stumpf aneinander und ergeben eine bündige Verbindung. Zu beachten ist dabei, dass der Klebstoff am Stumpfstoß die Fuge völlig bis zur Blechoberfläche füllt. Die eigentliche Klebestelle, die der Kraftübertragung dient, wird zwischen den Bauelementen und dem überlappenden Blech außerhalb des Produktbereichs gefügt.

1.4

Gestaltung von Dichtungen

Produktberührte Dichtungen sind häufig die hygienisch sensibelsten Elemente im Hinblick auf reinigungsgerechte Gestaltung. Die Rekontamination von Produktchargen durch nicht hygiengerechte Dichtstellen ist in der Praxis oft latent vorhanden, selbst wenn eine Validierung der Reinigung vorgenommen wurde oder wenn auf eine In-place-Reinigung ein Sterilisationsprozess folgt. Die Risiken werden häufig mit zunehmender Betriebszeit größer und können sich in hohen Kosten, z. B. durch Rückrufaktionen von kontaminierten Produkten, niederschlagen. Ausführlichere Grundlagen über die Gestaltung von hygiengerechten Dichtungen finden sich in [1].

Dichtungen haben die Aufgabe, Bereiche mit ungleichen Bedingungen voneinander dicht abzutrennen. Diese können z. B. durch unterschiedliche Drücke (Überdruck, Vakuum), chemische Medien (Laugen, Säuren, Produkte), Zustandsformen von Materialien (Feststoffe, Flüssigkeiten, Gase), Prozesszustände (Produktion, Reinigung/Sterilisation), Hygienezustände (rein, unrein oder verkeimt, keimarm, keimfrei) oder Luftzustände (feucht, trocken) vorgegeben sein. Dabei sollen Stoffverluste oder Vermischung von Medien vermieden, Kontamination (z. B. aus der Umgebung) und Rekontamination (z. B. unterschiedlicher Chargen) von Produkten durch Mikroorganismen verhindert oder die Umwelt vor dem Austritt toxischer Medien geschützt werden.

Im allgemeinen Maschinenbau bewährte und sichere Lösungen für Dichtungen können in Hygienebereichen nicht akzeptiert werden, wenn sie besondere hygienische Problemstellen enthalten, die von der Art des Werkstoffs, der porösen Oberflächenstruktur oder der Geometrie der Dichtstelle verursacht werden. An hygiengerecht gestaltete Dichtstellen werden spezielle Anforderungen dadurch gestellt, dass z. B. Mikroorganismen zusammen mit Produktresten in nicht visuell feststellbare Dichtspalte und Fehlstellen von Dichtungen eindringen, sich dort vermehren und anschließend neue Produktchargen kontaminieren können. An solchen Problemstellen entfalten Reinigung und Sterilisation oft nicht ausreichend zuverlässig ihre Wirkung. So kann z. B. durch die Pressung zwischen Dichtung und Dichtfläche durch die Verdrängung von Wasser ein Milieu mit reduzierter Feuchte entstehen, in dem Mikroorganismen die üblichen temperaturbedingten Sterilisationsverhältnisse überleben. Viele Kontaminationen in der Praxis werden auf nicht erfolgreiche Reinigung von Spalten und Toträumen von Dichtstellen und in Rissen von verschlossenen Dichtungen oder das Nickerreichen von Desinfektionstemperaturen an „kalten“ Stellen zurückgeführt [51].

1.4.1

Statische Dichtungen

Bei statischen Dichtungen führen die abzudichtenden Bauelemente keine Relativbewegung zueinander aus. Dazu gehören zum einen Dichtstellen mit nach Montage relativ zueinander feststehenden Bauteilen, wie z. B. lösbarer Flansch,

Schraub- oder Klemmverbindungen von Rohrleitungen oder Behältern. Meist werden aber auch Dichtstellen dazu gezählt, bei denen die Bauelemente bis zum Dichtzustand aufeinander zu bewegt werden, wie es z. B. bei Tellerdichtungen von Ventilen oder Abdichtungen von schwenkbaren Behälter-Mannlöchern der Fall ist.

Bei *berührenden* Dichtstellen können die Bauteile entweder unmittelbar oder mittelbar über ein zusätzliches Dichtelement abgedichtet werden, das als Zwischenglied fungiert. Die zur Abdichtung notwendige Vorspannung der Dichtelemente erfolgt bei Montage oder nach Betätigung durch äußere Kräfte, die im Wesentlichen vom Verformungswiderstand der Werkstoffe und von den Abmessungen sowie der Gestaltung der Dichtfläche abhängen. Der Einsatz von weichen, elastischen Dichtelementen wird dann gewählt, wenn die Vorspannkräfte nicht zu hoch werden dürfen. Zusätzlich zu diesen werden die Dichtflächen im Betriebszustand z. B. durch Über- oder Unterdruck und Temperaturen der vorhandenen Medien be- oder entlastet. Die im Folgenden verwendeten Darstellungen sind in den meisten Fällen keine Konstruktionszeichnungen, sondern sollen als Skizzen lediglich das Wirkprinzip verdeutlichen.

Theoretisch sind absolut glatte und ebene Dichtflächen nicht poröser Werkstoffe in unmittelbarem Kontakt absolut dicht. Praktisch sind solche Verhältnisse jedoch nicht erreichbar, da Dichtflächen sowohl eine Mikrostruktur in Form ihrer Oberflächenrauheit gemäß Abb. 1.46 als auch eine Makrostruktur durch sichtbare Unebenheiten und Formfehler besitzen (s. auch [1]). Beide Größen sind abhängig vom verwendeten Dichtwerkstoff sowie der Qualität (z. B. Struktur, Bearbeitungszustand) seiner Oberfläche. Bei zunehmender Annäherung zweier Dichtflächen steigt die Dichtwirkung an. Dabei erfolgt ein Angleichen der Oberflächen durch elastische oder plastische Verformung ihrer Mikro- und Makrostrukturen. Gleichzeitig nimmt der als räumliches Spaltsystem ausgebildete Dichtspalt ab. Aufgrund von molekularen Kohäsions- und Kapillarkräften im Dichtspalt sowie der Oberflächenspannung ist eine „leckagefreie“ Abdichtung z. B. bei Flüssigkeiten trotz eines mikroskopischen Spaltes möglich. Für das Abdichten gegenüber Gasen, müssen die Dichtflächen entsprechend stark vorgespannt werden. Bei feuchten Gasen kann Kondensation im Dichtspalt auftreten, sodass ähnliche Verhältnisse wie bei Flüssigkeiten auftreten. Bei trockenen Gasen wird im Allgemeinen versucht,

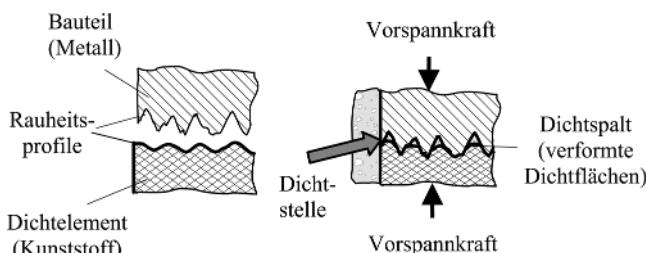


Abb. 1.46 Einfluss auf den Dichtspalt:
(a) Rauheitsprofile vor Abdichtung, (b) nach Montage.

eine geschlossene Dichtlinie bzw. einen durchgehenden Dichtbereich senkrecht zur Abdichtungsrichtung zu erzielen, der wesentlich von der Struktur (z. B. Bearbeitungsrollen der Dichtflächen) abhängt. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass manche Polymere und Elastomere selbst eine gewisse Gasdurchlässigkeit aufweisen. Die Vorspannung muss in diesen Fällen so hoch gewählt werden, dass ein Schließen der Mikroporen erreicht wird. Die Gasdurchlässigkeit von Dichtstellen wird üblicherweise mit dem Heliumtest überprüft.

Eine Reinigung mikroskopisch enger Spalte nicht hygienegerecht gestalteter Dichtstellen ist ohne Zerlegen, d. h. Entfernen der Dichtung von den Dichtflächen, nicht möglich. Außerdem kann bei flächenartigen Dichtflächen mit konstanter Anpressung, wie z. B. bei Flachdichtungen, die Mikrostruktur des Dichtspalts aufgrund der Rauigkeiten und geometrischen Formfehler nicht genau definiert werden. Das bedeutet, dass in solchen Fällen zwar ausreichend abdichtende Dichtstellen erzeugt werden, örtlich aber trotzdem Mikroorganismen unterschiedlich weit eindringen können. Hygiedichtungen sollten daher so gestaltet werden, dass die höchste Anpressung und damit die stärkste Verformung der Dichtung möglichst in einer definierten Zone unmittelbar am mediumberührten Rand der Dichtfläche entsteht. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme kann mithilfe besonders kleiner und mobiler Bakterien überprüft werden, die auch zum Testen der Bakteriendichtheit [52] von Abdichtungen verwendet werden.

Zusammengefasst lassen sich folgende Anforderungen an die hygienegerechte Gestaltung von statischen Dichtungen definieren:

- Die Dichtstelle muss unmittelbar und möglichst bündig an der produktberührten Oberfläche liegen.
- Die Dichtstelle sollte „spaltfrei“ sein (Berücksichtigung makroskopischer und mikroskopischer Einflüsse).
- Es ist eine definierte Pressung der Dichtstelle bzw. des Dichtelements erforderlich (z. B. durch Anschlag der zu dichtenden Bauteile).
- Die größte Pressung des Dichtelements muss unmittelbar an der produktberührten Oberfläche liegen, um das Eindringen von Mikroorganismen in Spalte zu vermeiden.
- Die abzudichtenden Bauteile und die Dichtelemente müssen an der produktberührten Oberfläche fluchten (Zentrierung oder Versatz).
- Für die Dichtelemente muss eine Dehnungs- bzw. Kontraktionsmöglichkeit zur Kompensation bei Temperaturänderung ohne Bildung eines Wulstes oder einer Vertiefung gegenüber dem Produktraum gegeben sein (Elastomere sind volumenkonstant).
- Das Einziehen von Dichtelementen in den Produktraum bei Vakuum ist zu verhindern.
- Die Dichtelemente sollten unverlierbar sein (Fixierung in einem der abzudichtenden Bauteile).

Allgemeine Anforderungen bezüglich richtiger Werkstoffwahl und rechtlicher Voraussetzungen müssen zusätzlich in folgender Hinsicht erfüllt werden:

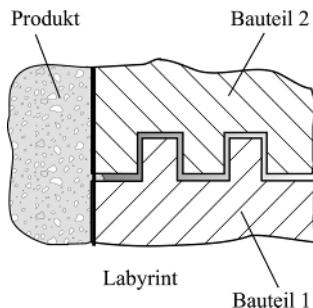


Abb. 1.47 Prinzipdarstellung einer berührungslosen Dichtung.

- Die physikalischen Anforderungen an die Dichtstellen und Dichtelemente wie z. B. Festigkeit, Dehnung oder Temperatur müssen berücksichtigt werden.
- Chemische Beständigkeit gegen Produkt, Reinigungs- und Desinfektionsmittel ist erforderlich.
- Physiologische Unbedenklichkeit ist nachzuweisen (Erfüllung rechtlicher Vorgaben bezüglich Produktverträglichkeit z. B. nach LFBG [53–56] in der Nahrungsmittelindustrie bzw. allgemein nach FDA (CFR [57]).
- Die funktionellen Anforderungen müssen erfüllbar sein.

Bei *berührungslosen* Dichtungen werden die Dichtflächen einander nur so weit angenähert, dass es zu keiner Berührung kommt. Der in diesem Fall auftretende, möglichst geringe Spalt sowie die damit verbundene Undichtheit werden dabei in Kauf genommen. Der Spalt wird deshalb so gestaltet, dass ein möglichst hoher Durchflusswiderstand entsteht, wie Abb. 1.47 am Beispiel einer Labyrinth-Abdichtung zeigt. Auf der Produktseite sind berührungslose Dichtungen für hygienegerechte Abdichtungen nicht einsetzbar, da im montierten Zustand keine Reinigungsmöglichkeit besteht.

Die überwiegende Mehrheit von Dichtungen wird für rotationssymmetrische Anwendungen eingesetzt, wo bereits bewährte hygienegerechte Lösungen zur Verfügung stehen. Im Bereich linearer Dichtungen fehlen entsprechende Konstruktionen noch weitgehend, wenn aus technischen Gründen die Erfahrung mit Runddichtungen nicht übernommen werden kann.

1.4.1.1 Metallische Dichtungen

Im Maschinenbau sind berührende metallische Dichtungen durchaus üblich. Sie nutzen die elastische Materialverformung unter mechanischer Vorspannung zur Dichtwirkung aus. Bei Anwendung im Hygienebereich sind sie notwendig, wenn aufgrund des Produkts Elastomerdichtungen nicht einsetzbar sind. Nach Stand der Technik wird in solchen Fällen die Dichtung direkt durch den Werkstoff Edelstahl gebildet. Eine konstruktiven Lösung für rotationssymmetrische Bauteile verwendet z. B. eine konische Dichtfläche in Form eines Kegelsitzes gemäß Abb. 1.48. Der innere Konus besitzt eine geringfügig steilere Neigung als der äußere. Bei axialem Vorspannen wird die Berührfläche (Dichtfläche) unmittelbar auf der Produktseite in einem geringen Bereich teilplastisch verformt, wobei die stärkste Verformung am Umfang des kleinsten Durchmessers vorliegt.

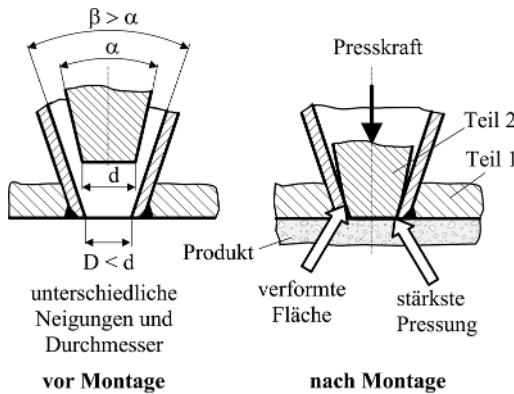


Abb. 1.48 Prinzip einer metallischen Dichtung mit unterschiedlich geneigten Dichtflächen (höchste Pressung unmittelbar an Produktseite).

Eine andere für Rohrverbindungen eingesetzte Konstruktion [58] verwendet gemäß Abb. 1.49 eine frontbündige definiert vorgespannte, etwa sinusförmige Dichtkontur, deren Reinigbarkeit von der EHEDG zertifiziert wurde (s. auch Abschnitt 2.2). Aufgrund der zentrischen Führung sowie des metallischen Anschlags werden die Hygieneanforderung an die Dichtstelle erfüllt.

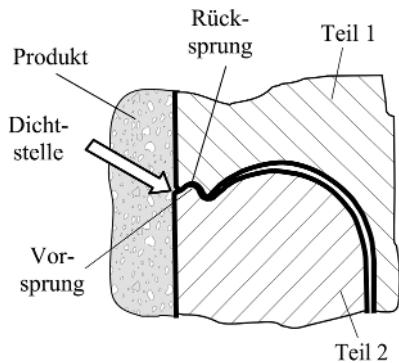


Abb. 1.49 Gestaltung der metallischen Dichtstelle für eine Flanschverbindung [58].

1.4.1.2 Elastomerdichtungen

In den weitaus überwiegenden Fällen werden als berührende Dichtelemente Elastomer- oder Thermoplastdichtungen verwendet. Neben ihrer hohen elastischen Verformbarkeit ist die Oberflächenstruktur hygienisch maßgebend, die durch die Bearbeitungsgüte der Form sowie die beim Extrudieren entstehende dichte Oberflächenhaut festgelegt wird. Bei bearbeiteten Polymeren sind die Bearbeitungsqualität sowie die Dichtheit des Werkstoffss entscheidend. Der Dichtspalt zwischen dem Dichtelement und den Metall- oder Kunststoffgegenflächen wird bereits bei relativ geringer Anpresskraft durch elastische Verformung soweit vermindert, dass Dichtheit erreicht wird.

Nach [59] kann davon ausgegangen werden, dass man z. B. bei einer Elastomer-Flachdichtung mit einer Härte von 70 Shore A eine Zusammenpressung von

$$\alpha = 0,15 \cdot t$$

d. h. etwa 15 % der ursprünglichen Dicke t benötigt, um Dichtheit gegen Bakterien zu erreichen. Bei freier Ausdehnung ist mit der Kompression gleichzeitig eine Querdehnung verbunden, die sich mit der Poisson'schen Konstanten ν gemäß

$$q = \nu \cdot \alpha$$

bestimmen lässt. Für eine praktisch volumenbeständige Elastomerdichtung ist $\nu = 0,5$, sodass sich für das vorliegende Beispiel eine Ausdehnung der Dichtung von 7,5 % der ursprünglichen Dicke ergibt. Abb. 1.50a soll diese Verhältnisse für eine quaderförmige Flachdichtung verdeutlichen, die sich in einer Richtung bei Vernachlässigung der Reibung an der Dichtungsoberfläche ergeben würde. Würde man die Dichtung gemäß Abb. 1.50b allseitig pressen, so wäre keine Verformung möglich. Die Dichtung würde sich wie ein starrer Körper verhalten.

Aufgrund ihrer einfachen Form wird die *Rundringdichtung* (O-Ring) entsprechend ISO 3601 [60] bzw. DIN 3771 [61] in der Praxis bevorzugt eingesetzt. Die im Maschinenbau herkömmliche Form der Dichtstelle mit rechteckförmiger Nut nach Abb. 1.50c lässt zwar Raum für die freie Verformung des Dichtrings, erfüllt aber nicht die Voraussetzungen eines hygienischen und reinigungstechnischen Einsatzes, wenn keine Zerlegung erfolgt. Aufgrund der Nutform kann die Dichtung nicht direkt an der abzudichtenden Produktseite liegen. Es entsteht

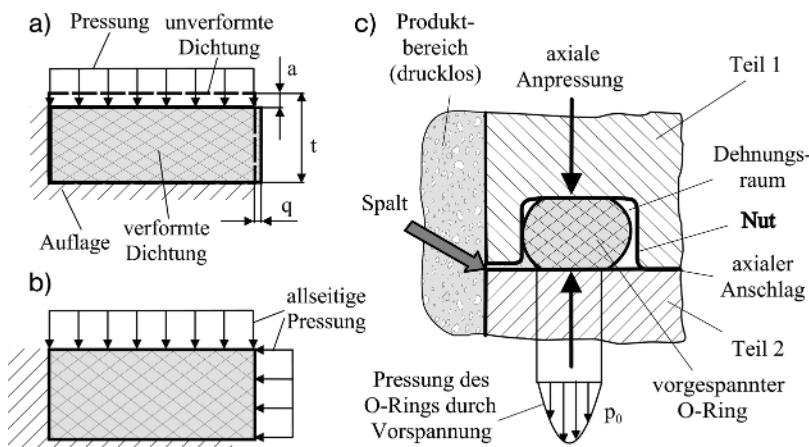


Abb. 1.50 Prinzipien bei Elastomeredichtungen:
 (a) Flachdichtung bei freier Dehnungsmöglichkeit,
 (b) allseitig gepresste Flachdichtung (Volumenkonstanz),
 (c) O-Ringdichtung mit Rechtecknut.

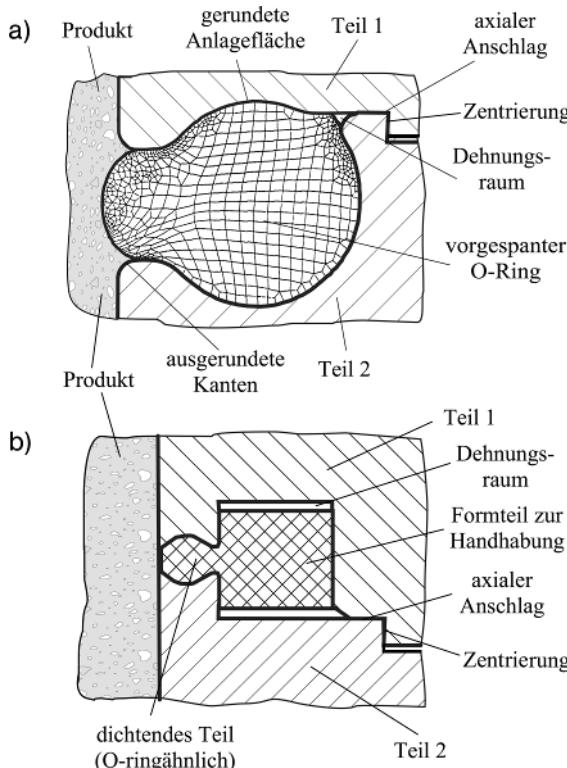


Abb. 1.51 Optimierte hygienegerechte O-Ring-Abdichtung mit axialem Anschlag und Zentrierung nach DIN 11 864 [62]:
 (a) O-Ringnut nach Form A (FE-Darstellung nach [59]),
 (b) Formdichtung nach Form B.

eine metallische Kontaktfläche mit einem engen mikro- oder makroskopischen Spalt. Untersuchungen zeigen, dass solche Dichtstellen stets eine Kontaminationsgefahr bedeuten.

Um eine optimierte hygienegerechte O-Ringdichtung zu verwirklichen, wurde in Zusammenarbeit zwischen EHEDG [59] und DIN eine Lösung mit Hilfe finiter Elemente gemäß Abb. 1.51a erarbeitet und getestet, die zu DIN 11 864 [62] für Schraub-, Flansch- und Klemmverbindungen geführt hat. Die der Rundung angepasste Nut umfasst den O-Ring weitgehend. In der Praxis zeigt sich, dass zur hygienegerechten Funktion der Dichtung eine Auswahl der O-Ring-Abmaße sinnvoll ist.

Eine zweite hygienegerechte Dichtung stellt Form B nach DIN 11 864 entsprechend der Prinzipdarstellung nach Abb. 1.51b dar. Sie besteht im produktberührten Bereich aus einem O-ringähnlichen Teil mit kleinem Querschnitt, um eine kleine Oberfläche zum Produkt hin zu erreichen und das Expansions- und Kontraktionsverhalten bei Temperaturänderungen zu vermindern. Zur leichteren Handhabung ist an den O-ringförmigen ein größerer rechteckiger Querschnitt

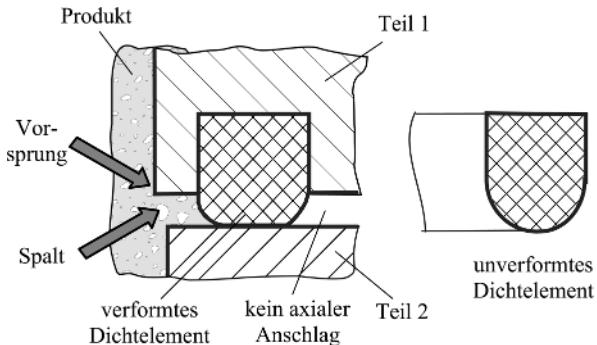


Abb. 1.52 Elastomer-Formdichtungen der Milchrohrverschraubung nach DIN 11 851 [63] mit Spalt an Dichtstelle (ohne Zentrierung und axialem Anschlag).

angeschlossen. Für diesen ist in der Nut seitlich ein Dehnungsraum vorgesehen, der eine Expansion zulässt. Entscheidend ist, dass in jedem Fall ein ausreichend großer, richtig angeordneter Dehnungsraum verhindert, dass die gesamte Verformung zum Produktraum hin erfolgt.

Eines der am weitesten verbreiteten Dichtelemente ist der Profilring der Verschraubung nach DIN 11 851 [63] gemäß Abb. 1.52. Das Dichtelement ist gegenüber dem Produktraum zurückversetzt und aufgrund eines fehlenden Anschlags nicht definiert gepresst, sodass ein mehr oder minder weiter Spalt entsteht. Außerdem fehlt eine Zentrierung, sodass die zu dichtenden Bauteile nicht fluchtend, d. h. mit einer Stufe, montiert werden können. Außerdem wird durch die mögliche Bewegung der zu verbindenden Elemente der Dichtring durch Scherbeanspruchung relativ rasch beschädigt. Die Dichtung wird wegen ihrer Einstellbarkeit und Beweglichkeit, die zulasten der hygienegerechten Gestaltung geht, vor allem in der Lebensmittelindustrie häufig verwendet. Bei Einsatz in Hygienebereichen muss die Dichtstelle bei der Reinigung zerlegt werden, wenn Kontaminationen vermieden werden sollen.

Um CIP-Verfahren anwenden zu können, wurden Verbesserungen in Form von Kombinationsringen aus einem Elastomer und Edelstahlteil (s. Abschnitt 2.2) entwickelt, die bei Beibehaltung der Nut die Problemstellen beseitigen, indem das Dichtelement den Spalt zur Produktseite hin ausfüllt und das Edelstahlteil für axialen Anschlag sowie Zentrierung sorgt.

Für Klemmverbindungen nach ISO 2852 (Zollmaße) [64] und DIN 32 676 (Millimetermaße) [65] ist die Formdichtung gemäß Abb. 1.53a so gestaltet, dass sie zum Produkt hin als Flachdichtung ausgeführt ist und über das O-ringförmige Mittelteil sowie den außenliegenden Ring die beiden zu dichtenden Teile zentriert soll. Die Dichtung ist nicht definiert gepresst und die Zentrierung durch die weiche Dichtung zumindest fraglich. Eigene Versuche sowie Hygienetests zeigten, dass bei höheren Belastungen (z. B. Biegebeanspruchung) einseitige Spalte an der Dichtstelle entstehen, die zu Kontaminationen führen können. Eine definierte Pressung und Zentrierung ist z. B. durch die Kombinations-

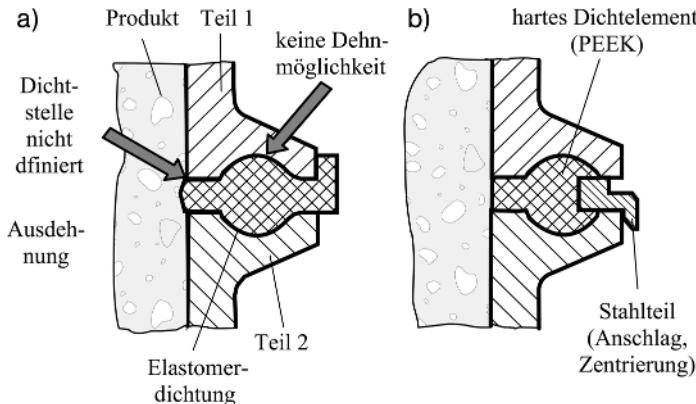


Abb. 1.53 Elastomerdichtung für Klemmverbindung:
 (a) übliche Elastomer-Formdichtung (Zentrierung durch Dichtelement, keine definierte Pressung) nach DIN 32 676 [65],
 (b) Kombinationsdichtung mit Edelstahlring (Zentrierung und definierte Pressung der Dichtung) [66].

dichtung nach Abb. 1.53b möglich, die aus einem Dichtelement aus Kunststoff (PEEK) und einem Edelstahlring besteht [66]. Der Dichtring wurde mittlerweile weiterentwickelt.

Flachdichtungen werden aus Tradition wegen der einfachen Fertigung der Dichtflächen (z. B. Drehen, Schmieden) sowie der günstigen geometrischen Form der Dichtelemente für Flansche von Apparaten, Behältern und Rohrleitungen verwendet. Das Dichtelement muss unmittelbar an der produktberührten Oberfläche montiert sein. Bei großen Abmessungen runder Bauteile (Behälterdeckeldichtungen) werden Flachdichtungen meist aus Bandmaterial mit Rechteckquerschnitt ausgeschnitten und der kreisförmigen Dichtstelle ohne Nut mehr oder minder gut angepasst (Abb. 1.54a). Nur durch Zentrierung oder Versatz können Vor- bzw. Rücksprünge der abzudichtenden Bauteile vermieden werden. Aufgrund von Formfehlern und Rauheitsunterschieden ist die Dichtstelle bei parallelen Dichtflächen jedoch nicht ausreichend definiert, wodurch Mikroorganismen wie z. B. Sporen vom Produktbereich her in die Dichtstelle eindringen, die beim Erhitzen Wasser aufnehmen [51].

Durch z. B. eine einseitige Abschrägung der Dichtungsnut gemäß Abb. 1.54b kann erreicht werden, dass aufgrund der Verformung die stärkste Pressung und damit die Dichtstelle unmittelbar an der Produktseite liegt [2]. Außerdem muss ein Dehnungsraum vorgesehen werden, damit sich die Dichtung nicht völlig zum Produktraum hin ausdehnt. Durch die resultierende Radialkraft aufgrund der Abschrägung wird die Expansion in einen im Rückraum liegenden Dehnungsraum unterstützt.

Werte für die Abmessungen solcher Dichtelemente sind in [1] zusammengestellt. Um Probleme im Betrieb auszuschalten, muss das Dichtelement im Verhältnis zu seiner Nut mit Dehnungsraum richtig dimensioniert werden.

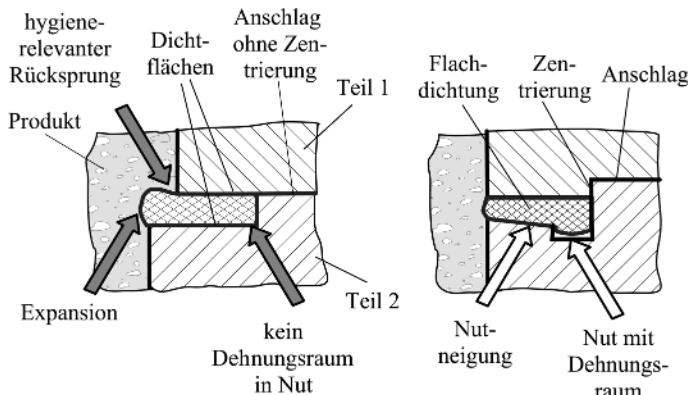


Abb. 1.54 Gestaltung von Flachdichtungen: (a) Dichtstelle mit parallelen Dichtflächen mit Anschlag, ohne Zentrierung (Hygienerisiko durch Vorsprung), (b) Prinzip einer hygienegerechten Dichtstelle mit axialem Anschlag und Zentrierung: Nut auf einer Seite geneigt, Expansionsraum für Dichtung.

Membranen z. B. von Membranventilen oder -pumpen werden häufig an den Rändern im Hauptschluss eingespannt. Entsprechend Abb. 1.55a entstehen an der Einspannstelle unmittelbar am Produktraum dieselben Probleme wie bei Flachdichtungen mit Rechteckquerschnitt, d. h. mit parallelen Flächen. Hinzu kommt, dass die Membran eine Bewegung durchführt, wodurch an der Einspannstelle vor allem durch Dehnung und Durchbiegung der Membran ein Spalt entstehen kann. Um eine definierte Anpressung der Membran unmittelbar am Produktbereich zu erzielen, wird bei manchen Konstruktionen entweder an der Membran (Einzelheit Z₁) oder am Gehäuserand (Einzelheit Z₂) eine wulstartige Verdickung vorgenommen.

Druckluftbeaufschlagte Dichtungen in Form schlauchförmiger Dichtelemente können entsprechend Abb. 1.56 mit innerem Überdruck beaufschlagt und damit zum Abdichten gegenüber einer Dichtfläche gebracht werden. Die Dichtelemente

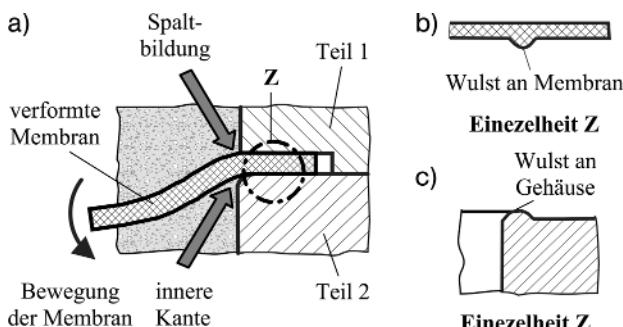


Abb. 1.55 Dichtstelle von Membranen:
(a) Prinzip mit Problemstellen, (b) Wulst an Membran zur definierten Dichtwirkung, (c) Wulst am Gehäuse zur Reduzierung der Spaltbildung.

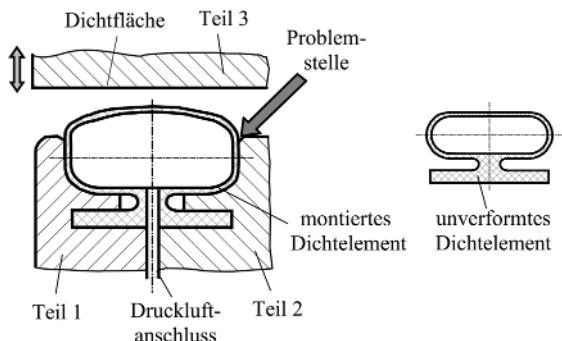


Abb. 1.56 Prinzipbeispiel einer Dichtung mit Druckbeaufschlagung.

werden als Hoch- oder Niederdruckprofile in sehr unterschiedlichen Formen hergestellt und lassen sich der abzudichtenden Fläche beliebig anpassen. Sie werden z. B. zum Abdichten von Ventilen für Trockenprodukte, Kühlkammern, Trockenschränken und Reinraumschleusen verwendet. Einwandfreie Reinigung ist nur bei zugänglicher Dichtfläche möglich.

1.4.2

Dynamische Dichtungen

Dynamische Dichtungen dichten relativ zueinander bewegte Bauteile gegeneinander ab. Eine wichtige Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit einer hygienegerechten Dichtung ist, dass eine einwandfreie Lagerung mit geringen Toleranzen für die bewegten Elemente vorliegt. Neben den bei statischen Dichtstellen aufgezeigten Hygienierisiken besteht das Hauptproblem im Eindringen von Schmutz und Mikroorganismen in den Dichtspalt sowie deren aktiven Transport durch die Dichtstelle hindurch. Generell unterscheidet man zwischen Abdichtungen für geradlinig hin- und hergehende sowie drehende Relativbewegungen, für die es unterschiedliche Wirkprinzipien und Dichtelemente gibt.

1.4.2.1 Dichtungen für Längsbewegungen

Bei relativer Längsbewegung zweier gegeneinander abgedichteter Bauteile (z. B. Ventilstange – Gehäuse) wird an dem bewegten Teil anhaftendes flüssiges Medium (Produkt, Schmutz), das einen Schmierfilm bildet, an der Dichtstelle vorbei transportiert. Ursache ist das Anhaften eines dünnen Films aufgrund der Rauheiten, der zunächst zu sogenannten Mischreibung führt. Darüber hinaus kann je nach Form des Dichtelements und Geschwindigkeit der Bewegung ein Schmierkeil mit hohem Druck entstehen, der einen deutlichen Spalt zwischen Dichtfläche und Dichtelement erzeugt. Auf diese Weise findet bei relativer Bewegung ein Transport eventuell kleinster Mengen durch die Dichtstelle statt, während sie im Ruhezustand völlig dicht ist. Aus hygienischer Sicht kann auf diese Weise trotz üblicher Dichtheit die Kontamination eines reinen Bereichs durch einen unreinen erfolgen.

Abdichtung mit elastischen Dichtelementen

Die Abb. 1.57a verdeutlicht die Transportverhältnisse durch den Dichtspalt in prinzipieller Form am Beispiel der hygienisch nicht akzeptablen O-Ringdichtung. Die Dicke des Spalts zwischen Dichtung und bewegtem Element hängt im Wesentlichen von den Rauigkeitsverhältnissen an der Dichtfläche, der Zähigkeit der anhaftenden Schicht sowie der Anpressung (Vorspannung) des Dichtelements ab. Neben der Kontaminationsgefahr durch den Transport können ange trocknete Filme oder auskristallisierte Bestandteile die Dichtung beschädigen. Beim Rücktransport wird gemäß Abb. 1.57b der kontaminierte Film in den Produktraum zurücktransportiert, wenn nicht besondere Maßnahmen getroffen werden.

Eine Minimierung des transportierten Films lässt sich z. B. durch Dichtelemente mit Dichtlippe durch „Abstreifwirkung“ gemäß Abb. 1.58a erreichen, die außerdem bündig zur Produktseite gestaltet werden können. Ein Werkstoff mit gutem Gleitverhalten wie PTFE kann diese Wirkung unterstützen. Die Lippe wird außerdem durch den produktseitigen Druck zusätzlich angepresst. In diesem Fall muss wegen des Fließverhaltens von PTFE ein elastisches Element z. B. in Form eines Elastomers entsprechend der Kombinationsdichtung nach Abb. 1.58b durch elastische Vorspannung das Dichtelement anpressen und nachstellen. Um Verschleiß zu vermindern, kann die Dichtung auf der Produktseite „druck kompensiert“ ausgeführt werden.

Hygienegerechte Verbesserungen sind in verschiedenen Stufen möglich. So zeigt Abb. 1.59a zunächst eine doppelt wirkende Lippendichtung. Gemäß Abb. 1.59b kann zwischen den Dichtungen ein Spülraum angeordnet werden,

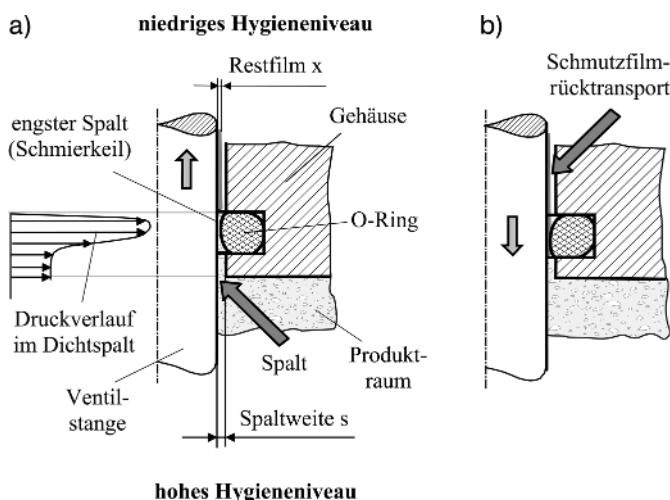


Abb. 1.57 Prinzipielle Darstellung des Hygienerisikos bei dynamischen Dichtungen für hin- und hergehende Bewegungen am Beispiel des O-Rings:
 (a) Spalte und Filmtransport bei Bewegung aus dem Produktraum,
 (b) Schmutzrücktransport bei Rückbewegung.

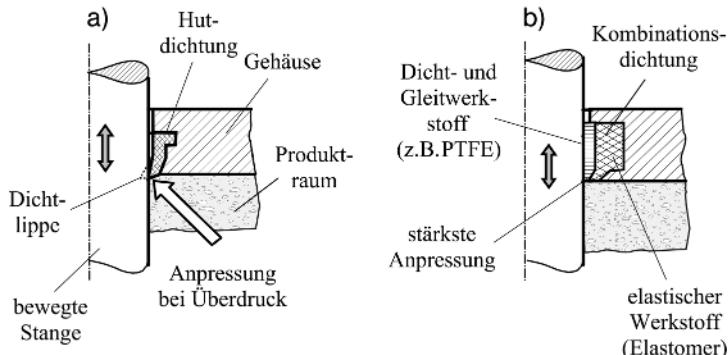


Abb. 1.58 Prinzipien dynamischer Dichtungen für keimarme Verhältnisse:
 (a) Elastomerdichtung mit Lippe, Anpressung durch Betriebsüberdruck,
 (b) Prinzip einer Kombinationsdichtung mit stärkster Anpressung
 an Produktseite.

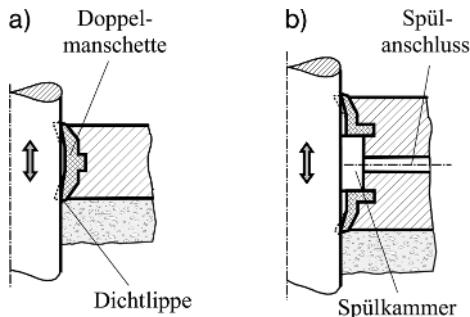


Abb. 1.59 Prinzipien der hygienegerechten Gestaltung dynamischer Dichtungen für unterschiedliche Anforderungen: (a) doppelte Lippendichtung, (b) zwei Lippendichtungen mit dazwischenliegender Spülkammer.

der von einem Spülmedium wie z. B. Kondensat oder Heißwasser durchflossen wird. Die Kammerhöhe muss dabei größer als der Hub des bewegten Elements sein, um transportierte Haftfilme lediglich in den Spürraum eintreten zu lassen. Der Spürraum muss auch einer In-place-Reinigung sowie eventuell einer Sterilisation unterzogen werden.

Bei speziellen Abdichtungen wie z. B. von Kolben wird das Dichtelement meist im bewegten Teil untergebracht. Zur Führung im Zylinder kann der Kolben z. B. mit Gleitelementen aus PTFE gelagert werden. Für keimarme Verhältnisse können Edelstahlkolben mit Kunststoffummantelung oder Vollkunststoffkolben gemäß Abb. 1.60 jeweils mit Dichtlippen ausgestattet werden, die wegen leichter Reinigbarkeit unmittelbar an der produktberührten Seite anzubringen sind. Eine sichere Reinigung ist zu erreichen, wenn der Kolben in eine spezielle Reinigungsposition gebracht werden kann, in der eine völlige Umspülung der Lippen gewährleistet ist.

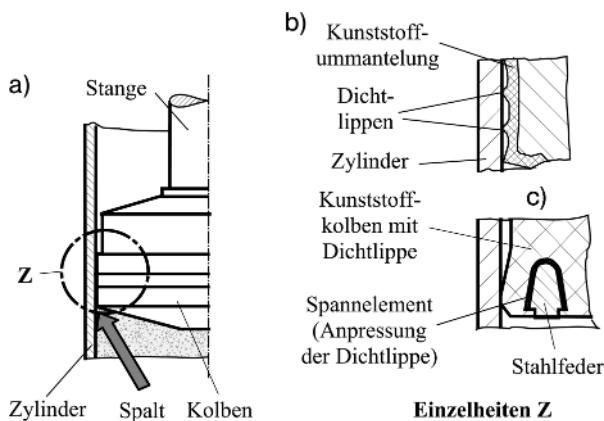


Abb. 1.60 Beispiele von Kolbendichtungen:
(a) Prinzipdarstellung, (b) Kolben mit Kunststoffbelag,
(c) Kunststoffkolben mit Dichtlippe.

Hermetische Abdichtungen

Hermetische Abdichtungen werden in Form von elastischen Elementen, die an den relativ zueinander bewegten Elementen befestigt oder statisch abgedichtet werden und aufgrund ihrer Gestaltung bzw. ihres Materials die Bewegung ermöglichen, zum völligen Ausschluss von Kontaminationen durch Transport von Haftfilmen z. B. bei Sterilprozessen verwendet. Die Abb. 1.61 zeigt das Prinzip einer solchen Abdichtung in Form eines Faltenbalgs. Problematisch bei der Reinigung können die Falten im Strömungsschatten sein. Bei der Lösung nach Abb. 1.61b wird eine Membran als Abdichtung verwendet.

1.4.2.2 Dichtungen für drehende Bewegungen

Bei der Abdichtung rotierender Bauteile wird das Kontaminationsrisiko durch Transport im Allgemeinen geringer eingeschätzt als bei hin- und hergehend bewegten Konstruktionen. Dies hängt damit zusammen, dass der Transport durch den Dichtspalt senkrecht (radial) zur abzudichtenden Bewegung (Rotation) liegt

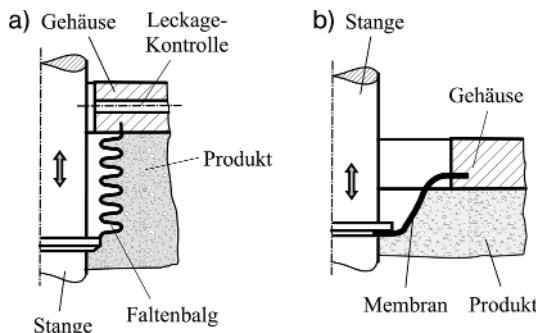


Abb. 1.61 Prinzipien hermetischer Abdichtungen: (a) Faltenbalg, (b) Membran.

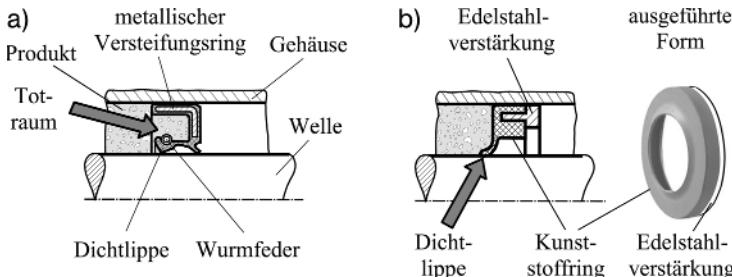


Abb. 1.62 Abdichtung einer Rotationsbewegung:

- (a) Wellendichtring (Hygienerisiko),
- (b) Prinzip eines bündigen Kunststoffrings mit Edelstahlverstärkung [68].

und damit nicht durch die Bewegung unterstützt wird. Hinzu kommt, dass der abzudichtende, hygienisch sensible Bereich häufig unter Überdruck steht, sodass ein Druckgefälle von der „reinen“ zur „unreinen“ Seite hin vorhanden ist, was eine Kontamination in umgekehrter Richtung verhindert, aber nicht ausschließt.

Wellendichtringe

Im Maschinenbau werden bei drucklosen Verhältnissen, geringen Drücken oder langsamem Bewegen radiale Wellendichtringe für die Abdichtung rotierender Maschinenteile (z. B. Wellen) verwendet, da sie als funktionsfähige Dichteinheiten gemäß Abb. 1.62a zur Verfügung stehen und in den gebräuchlichsten Ausführungen z. B. in DIN 3760 [67] genormt sind.

Aus hygienischer Sicht können sie bei In-place-Reinigung im Produktbereich nicht eingesetzt werden, da sie einen deutlichen Totraum zur Produktseite hin bilden, der nicht ausreichend reinigbar ist. Dagegen sind sie häufig im nicht produktberührten Bereich zur Abdichtung von Motoren, Getrieben usw. zu finden. Hygienisch verbesserte Konstruktionen gemäß dem Prinzip nach Abb. 1.62b oder 1.62c müssen frontbündig gestaltet werden. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass ein Transport durch die Dichtstelle hindurch stattfindet, mit dem Kontaminationsgefahren verbunden sind.

Gleitringdichtungen

Bei Gleitringdichtungen, die hauptsächlich für Fluide vom Vakuum- bis zum Hochdruckbereich eingesetzt werden, erfolgt die dynamische Abdichtung gemäß Abb. 1.63a zwischen einem mit dem rotierenden Bauteil umlaufenden Gleitring und einem feststehenden Gegenring [69]. Zum Vorspannen der Gleitringle werden Federn verwendet, die in offenliegender, produktberührter Ausführung ein Hygienerisiko darstellen. Durch Verwendung von abgedichteten Schutzhülsen kann dieses Problem beseitigt werden (s. auch [70]). Die statischen Dichtstellen müssen ebenfalls hygienegerecht gestaltet werden.

Bei hohen Hygieneanforderungen kann gemäß Abb. 1.64 eine doppelte Gleitringdichtung mit Spülkammer [71, 72] verwendet werden. Durch Spülen mit Kondensat oder Reinwasser wird ein direkter Kontakt zwischen Außen- und In-

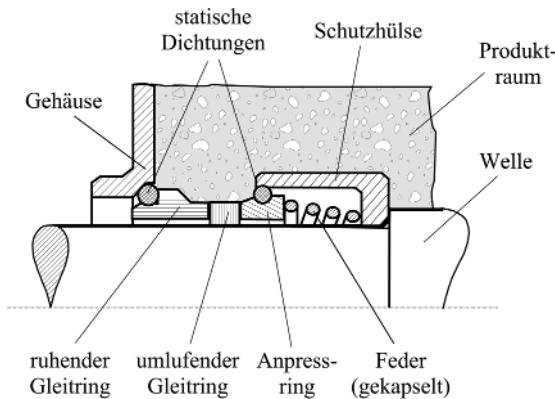


Abb. 1.63 Prinzip einer leicht reinigbaren Gleitringdichtung mit abgedeckter Feder.

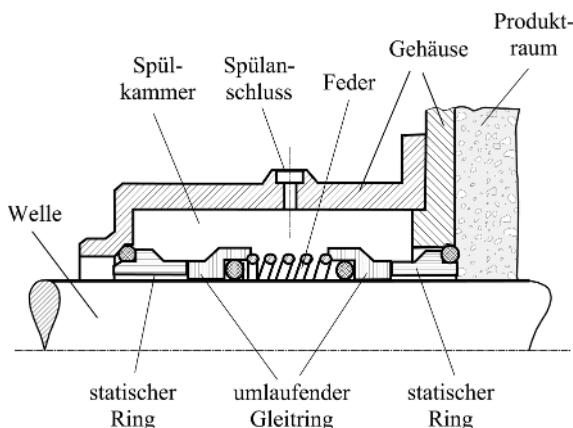


Abb. 1.64 Doppelte Anordnung von Gleitringdichtungen mit Außenliegender Spülkammer für höhere hygienische Anforderungen.

nenbereich und damit die Kontamination der Produktseite durch den Dichtspalt hindurch verhindert bzw. vermieden. Auch in diesem Fall sollte der Federbereich hygienegerecht gestaltet, d. h. gekapselt werden.

Hermetische Abdichtungen

Bei rotierenden Bewegungen ist eine hermetische Trennung von Produktraum und Umgebung durch einen Magnetantrieb gemäß Abb. 1.65 möglich. Aus hygienischer Sicht ist dabei die Lagerung des angetriebenen Elements im Produktbereich zu lösen, da sich zwischen der Welle und der als Lager dienenden Trennwand ein enger Spalt ergibt. Durch Nuten im rotierenden Teil des Lagers lässt sich jedoch eine gute Reinigungswirkung erzielen. Außerdem ist auf Entleerbarkeit im Produktbereich zu achten.

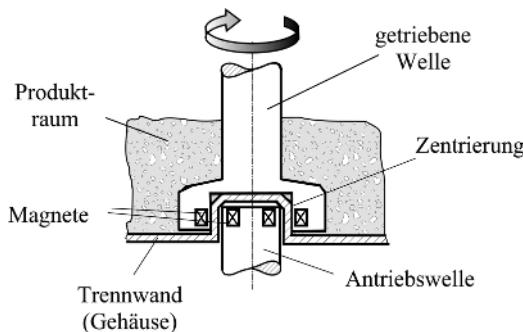


Abb. 1.65 Prinzip einer hermetischen Abdichtung mit einem Magnetantrieb.

1.5 Schraubenverbindungen

Schraubenverbindungen gehören zu den lösbareren Verbindungen. Sie sollten nur eingesetzt werden, wenn das Lösen bzw. Demontieren von Bauelementen unbedingt erforderlich ist. Die zur Verbindung dienenden Schrauben können unterschiedliche Funktion und Gestalt haben. Beim Anziehen von Befestigungsschrauben wie z. B. Durchsteckschrauben entsteht durch Drehen der Mutter eine Vorspannkraft, die eine Dehnung der Schraube und ein Zusammendrücken der verschraubten Bauteile bewirkt.

Aus hygienischer Sicht ergeben sich bei Befestigungsschrauben gemäß Abb. 1.66 eine Reihe von Problemstellen, die mit der Verbindung der Bauteile, den Formen von Schraubenkopf und Mutter sowie den Toleranzen in den Gewinden bzw. Bohrungen zusammenhängen. Metall-Metall-Kontaktflächen an der Auflage der Muttern auf den Blechen sowie der Auflage der Bleche auf dem überlappenden Blechteil, Spalte zwischen aneinander angrenzenden Blechen und offene Gewinde ergeben gravierende Hygieneprobleme, wenn sie im Produktbereich angeordnet sind.

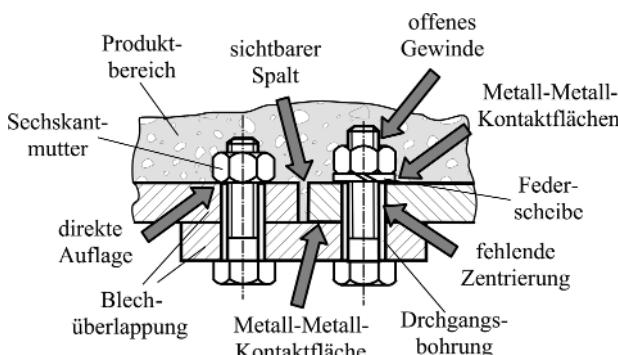


Abb. 1.66 Hygienische Problembereiche an einer herkömmlichen Schraubenverbindung.

Anhand der aufgezeigten Problemzonen kann man die Anforderungen an die hygienegerechte Gestaltung in produktberührten Bereichen allgemein folgendermaßen formulieren:

- Schraubenverbindungen sollten im Produktbereich nur in Fällen verwendet werden, wo dies wegen erforderlicher Zerlegbarkeit der Bauelemente unumgänglich ist.
- Offene Gewinde sind zu vermeiden.
- Aneinander stoßende Bauteilenden müssen hygienegerecht abgedichtet werden (Gewinde von Schrauben zentrieren im Allgemeinen nicht).
- Kontaktflächen von Metallen sind zu vermeiden bzw. hygienegerecht abzudichten.
- Sicherungselemente mit Spalten sind zu vermeiden.

Bei Apparaten für trockene Produkte, die auch trocken gereinigt werden, sind metallische Berührflächen zulässig, wenn eine definierte Anpressung garantiert ist.

Schrauben werden auch häufig zur Umsetzung einer Drehbewegung in eine Längsbewegung oder umgekehrt eingesetzt, um eine Relativbewegung zwischen den Bauteilen zu erzeugen. Bewegungsschrauben werden dabei wie bei Maschinenspindeln zur Erzeugung einer Bewegung verwendet, während bei Stellschrauben die Bewegung zum Einstellen einer bestimmten Lage der Bauteile zueinander wie z. B. an Maschinenfüßen genutzt wird. In der eingestellten Lage befinden sich die Bauelemente dann in Ruhe. In beiden Fällen muss bei der hygienegerechten Gestaltung darauf geachtet werden, dass vor allem in Muttern geführte Gewindeteile im Produktbereich vermieden werden.

1.5.1

Hygienegerechte Schrauben und Muttern

Die Benennung von Schrauben, Muttern und Zubehör ist in [73, 74] international festgelegt. Die meisten Ausführungen sind im Produktbereich wegen Hygienerisiken zu vermeiden. Eine leicht reinigbare Lösung bieten Hutmuttern [75, 76], wenn sie gemäß Abb. 1.67a das Gewinde abdecken und an der Auflage abgedichtet sind. Um eine Beschädigung der Dichtung beim Anziehen (Drehbewegung) zu vermeiden, sollten nur Muttern mit Bund eingesetzt werden. Der dargestellte Dichtring mit Metallanschlag wurde von der EHEDG empfohlen und in DIN EN ISO 14 159 [27] übernommen. In [26] wird der Einsatz von nicht genormten Hutmuttern empfohlen, die mit unterschiedlichen Ansätzen an der Auflage ausgeführt werden können, wie z. B. die in Abb. 1.67b dargestellte Mutter mit konischer Kopfform und zwei ebenen Flächen als Schlüsselweite. In Verbindung mit einer hygienegerecht gestalteten Abdichtung, deren Nut direkt in die Mutter integriert werden kann, sind auch solche Formen als hygienegerecht einzustufen.

Sechskantschrauben nach DIN EN ISO 4014 [77] sind ebenfalls leicht reinigbar, wenn sie mit Bund und Abdichtung zwischen Schraubenkopf und Auflage ver-

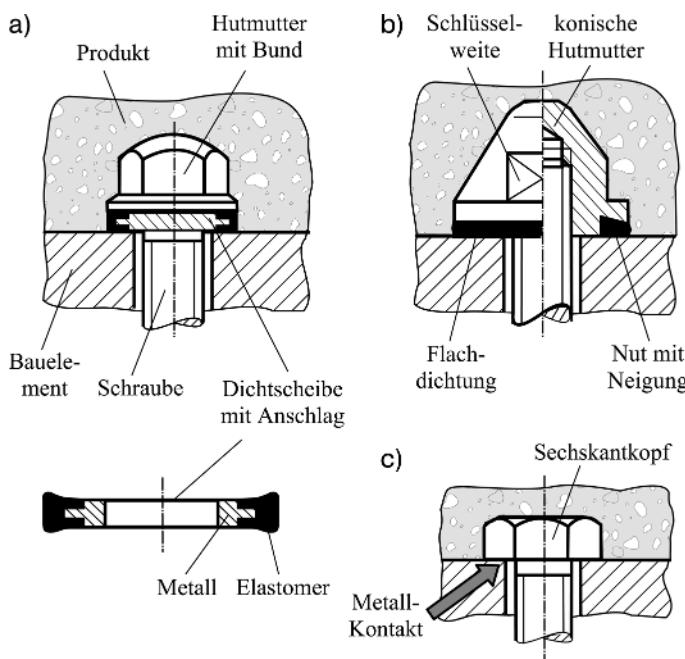


Abb. 1.67 Beispiele für hygienegerechte Schraubenköpfe bzw. Muttern:

- (a) Hutmutter mit kombinierter Elastomer-Metall-Beilagscheibe,
- (b) konische Hutmutter,
- (c) Schraubenkopf mit Metallkontakt bei Trockenprodukten.

wendet werden. In der in Abb. 1.67c gezeigten Form sollten Sechskantschrauben nur für Trockenprodukte eingesetzt werden. Ein geringes Hygienerisiko besteht bei Queranströmung im Strömungsschatten hinter den abgebildeten Köpfen (Vorsprung), das sich jedoch durch wechselnde Reinigungsrichtung weitgehend beseitigen lässt.

1.5.2

Gestaltung der Verbindung

Bei der Gestaltung von Schraubenverbindungen wird davon ausgegangen, dass im Produktbereich in-place gereinigt wird. Bei Reinigung im zerlegten Zustand gelten vereinfachte Anforderungen.

Nach DIN EN 1672-2 [26] müssen lösbare Verbindungen „*eine bündige und hygienische einwandfreie Passung haben*“. DIN EN ISO 14 159 [27] fordert darüber hinaus, dass sie „*an der produktberührten Oberfläche bündig und hygienisch abgedichtet*“ werden müssen. Den gleichen Standpunkt nimmt die EHEDG [3] ein, die ebenfalls grundsätzlich eine Abdichtung fordert. Zu den bereits in Abb. 1.66 aufgezeigten Hygienerisiken zeigt Abb. 1.68 als weitere Problembereiche die durch die Überlappung der Bleche entstehende Stufe sowie die Metallkontakte

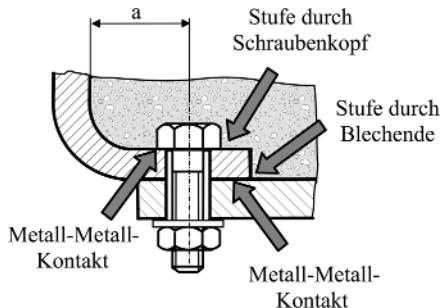


Abb. 1.68 Problembereiche einer überlappenden Schraubenverbindung.

mit eventuellem Spalt am Blechende und am Schraubenkopf. Hinzu kommt, dass ein zu geringer Abstand a zur Seitenwand die Reinigung behindert.

Bei nicht vermeidbaren Überlappungen muss das überstehende Blechende hygienegerecht abgedichtetet und bei dickeren Blechen zusätzlich abgeschrägt werden. Die Schraubenverbindung sollte außerdem weit genug von der inneren Kante entfernt sein. Generell sollten sich mehrere Stellen mit Hygienesikten nicht in einem engen Bereich häufen.

Bei bündigen Blechen müssen die Enden abgedichtetet werden, um Spalte zu vermeiden. Da Durchsteckschrauben (linke Seite von Abb. 1.69a) aufgrund der größeren Bohrung keine einwandfreie Pressung der Dichtung am Stoß der Bleche ermöglichen, kann dies nur durch eine definierte Fixierung der Bauteile z. B. durch Zylinder- oder Kegelstifte erreicht werden. Obwohl Stifte eine Presspassung erhalten, werden sie im Produktbereich wegen eventueller mikroskopischer Spalte nicht überall akzeptiert. Außerdem sind sie bei häufigem Zerlegen der Verbindung problematisch. Bei Montage ist die Dichtung quer zur Verschraubungsrichtung vorzuspannen.

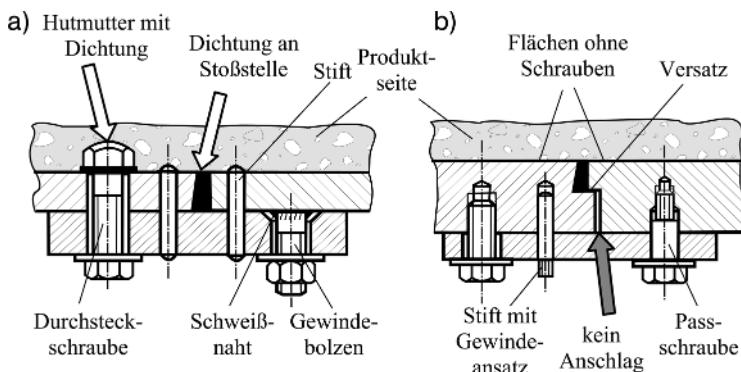


Abb. 1.69 Prinzipien hygienegerechter Schraubenverbindungen mit abgedichteten Blechenden:

- (a) Stifte zur Festlegung der Bleche mit Durchgangsschraube bzw. außerhalb des Produktbereichs angeschweißtem Gewindegelenk,
- (b) Anordnung von Schrauben außerhalb des Produktbereichs.

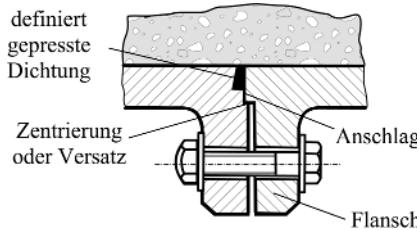


Abb. 1.70 Flanschverbindung mit hygienegerechter Abdichtung.

Durch Anschweißen von Gewindegelenken an der Nicht-Produktseite der Bleche (rechte Seite von Abb. 1.69a) können Schraubenköpfe im Produktbereich vermieden werden (siehe auch [3]). Aber auch im Nicht-Produktbereich sollte eine Abdeckung des offenen Gewindes mithilfe einer Hutmutter vorgenommen werden, um die Reinigung solcher Stellen zu ermöglichen.

Bei dickeren Wandstärken der Bleche lassen sich Schrauben und Stifte in Sackbohrungen von der Nicht-Produktbereich aus montieren (linke Seite von Abb. 1.69b), sodass die produktseitige Oberfläche frei von Schraubenköpfen oder Muttern bleiben kann. Die definierte Lage der Bleche zueinander kann nicht nur durch Stifte, sondern auch durch Passschrauben gemäß der rechten Seite von Abb. 1.69b festgelegt werden.

Auch Flanschverbindungen lassen sich sowohl bei rotationssymmetrischen als auch bei flächigen Bauteilen hygienegerecht einsetzen. Von Vorteil ist, dass in diesem Fall die Dichtung an den Blechenden durch die Schraubenkraft bis zum Anschlag entsprechend Abb. 1.70 definiert gepresst werden kann. Das Fluchten der Bleche wird durch eine Zentrierung oder einen Versatz gewährleistet.

Es ist noch darauf aufmerksam zu machen, dass an offenen Apparaten sowie in hygienerelevanten Räumen (z. B. Reinräumen) auch die Außenseiten von Schraubenverbindungen eventuell zum Produktbereich zu zählen sind. Das Beispiel nach Abb. 1.70 lässt erkennen, dass in diesem Fall nicht nur Schraubenkopf und Mutter hygienegerecht zu gestalten sind, sondern auch der Spalt zwischen den

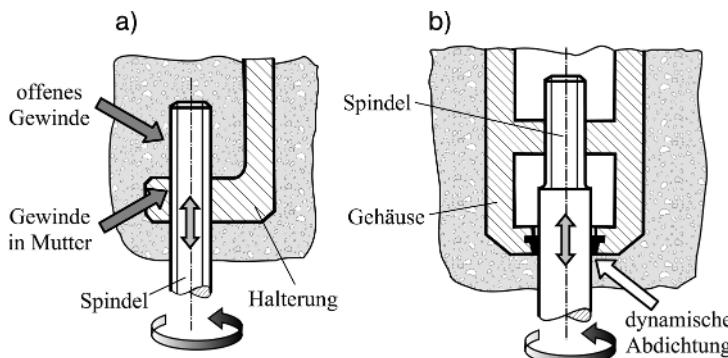


Abb. 1.71 Prinzip der Gestaltung von Gewindeständeln:
(a) hygienische Gefahrenstellen, (b) hygienegerechte Gestaltung.

Flanschen sowie das Gewinde der Verschraubung in diesem Bereich Hygienerisiken ergeben und deshalb vermieden werden müssen. Dies wäre bei runden Teilen z. B. durch eine zusätzliche hygienegerechte Dichtung am äußeren Spaltende des Flansches möglich, wie es ein Beispiel von abgedichteten Kupplungsflanschen nach Abb. 1.76 zeigt.

Im Produktbereich liegende offene Gewindespindeln von Bewegungsschrauben gemäß Abb. 1.71a müssen wegen des Gewindes und des spiralförmigen, nicht reinigbaren Spalts zwischen Spindel und Mutter vermieden werden. Um diese Hygienerisiken auszuschalten, muss das Gewinde entsprechend Abb. 1.71b in den Nicht-Produktbereich verlegt und zum Produktbereich hin hygienegerecht abgedichtet werden. Bei Bewegungsschrauben sind dafür dynamische Dichtungen erforderlich, während bei selten verstellten Stellschrauben, hygienegerecht gestaltete, statische Dichtungen mit guten Gleiteigenschaften ausreichen können.

1.6

Achsen und Wellen

Achsen dienen zur Lagerung von Bauteilen und können ruhend oder umlaufend verwendet werden. Wellen übertragen ein Drehmoment und führen meist eine Drehbewegung oder Teile davon aus.

Im Allgemeinen werden im Produktbereich nicht rostende Edelstähle eingesetzt, die in manchen Fällen bzw. Bereichen härtbar sein müssen. Bei der Oberflächenqualität sollten die empfohlenen Anforderungen an Rauheit und Struktur eingehalten werden. Höhere Qualitäten wie z. B. Polieren oder Läppen müssen bei der Art der Bearbeitung entsprechend berücksichtigt werden. Soweit möglich sollten Wellen mit gleich bleibendem Durchmesser verwendet werden. Notwendige Wellenabsätze sind gemäß Abb. 1.72 ausreichend auszurunden, Wellenenden abzuschrägen oder zu runden.

Spezielle Wellenausführungen im Produktbereich erfordern zusätzliche hygienegerechte Gestaltungsmaßnahmen. So müssen z. B. biegsame Wellen, die gemäß Abb. 1.73 aus mehreren Lagen schraubenförmig gewickelter Drähte bestehen, mit einem hygienegerechten Schutz (z. B. Schutzschlauch) aus einem zugelassenen Material ummantelt werden, der an den Enden hygienegerecht abzudichten ist. Eine erheblich einfachere Hygienelösung stellen glatte Biegestäbe dar, die sich bei geringen Durchbiegungen und entsprechender Länge einsetzen lassen.

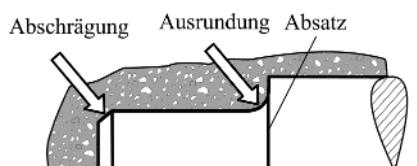


Abb. 1.72 Gestaltung von Wellen (Wellenende und Absatz).

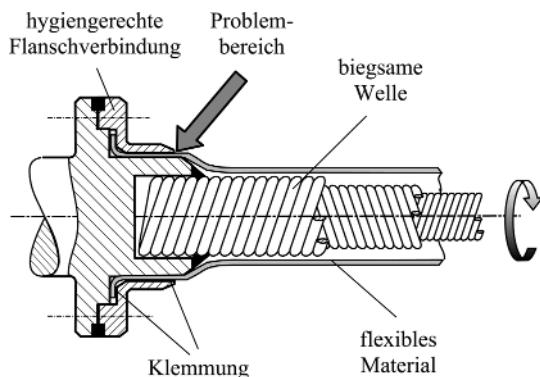


Abb. 1.73 Biegsame Welle mit Schutzhülse.

Teleskopwellen für notwendige Längsbewegungen von Antrieben im Produktraum, bei denen zur Übertragung des Drehmoments z. B. ein Vielnutprofil oder eine Gleitfederverbindung benutzt werden, können am Problembereich der Verbindungsstelle nach Abb. 1.74a mit einer hygienegerecht gestalteten dynamischen Dichtung ausgestattet werden. Dabei ist jedoch durch den möglichen Transport durch den Dichtspalt zwischen Innen- und Außenraum ein Kontaminationsrisiko verbunden (s. auch Abschnitt 1.4.2). Eine hygienegerechte Lösung kann durch ein hermetisch dichtendes Schutzelement wie z. B. einen Faltenbalg gemäß der Prinzipdarstellung nach Abb. 1.74b erreicht werden.

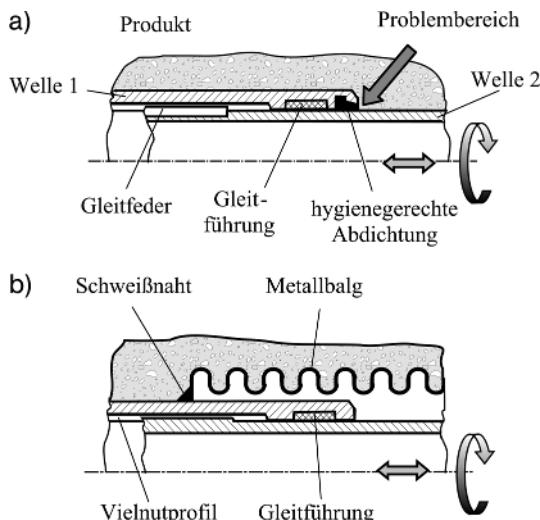


Abb. 1.74 Detail einer Teleskopwelle:
(a) mit dynamischer Dichtung, (b) mit Faltenbalg.

1.7

Wellen-Naben-Verbindungen

Wellen-Naben-Verbindungen dienen zur Übertragung von Drehmomenten und axialen Kräften zwischen Welle und Nabe und können durch Formschluss, vorgespannten Formschluss, Reibschluss oder Stoffschluss realisiert werden. In produktberührten Bereichen müssen auch im Detail die essenziellen Anforderungen von Hygienic Design erfüllt werden. Während Abb. 1.75a das Übertragungsprinzip an einer üblichen Passfederkonstruktion zeigt, sind bei der hygienegerecht verbesserten Gestaltung nach Abb. 1.75b metallische Kontaktflächen sowie die Passfeder in der Nabe abzudichten. Die Dichtung sollte auch im Bereich der Nut definiert gepresst werden. Das bedeutet, dass ihr innerer Durchmesser außerhalb der Nut liegen muss. Auf die Vielfalt der Verbindungsarten sowie auf Einzelheiten von Konstruktionsmöglichkeiten wird in [1] ausführlich eingegangen.

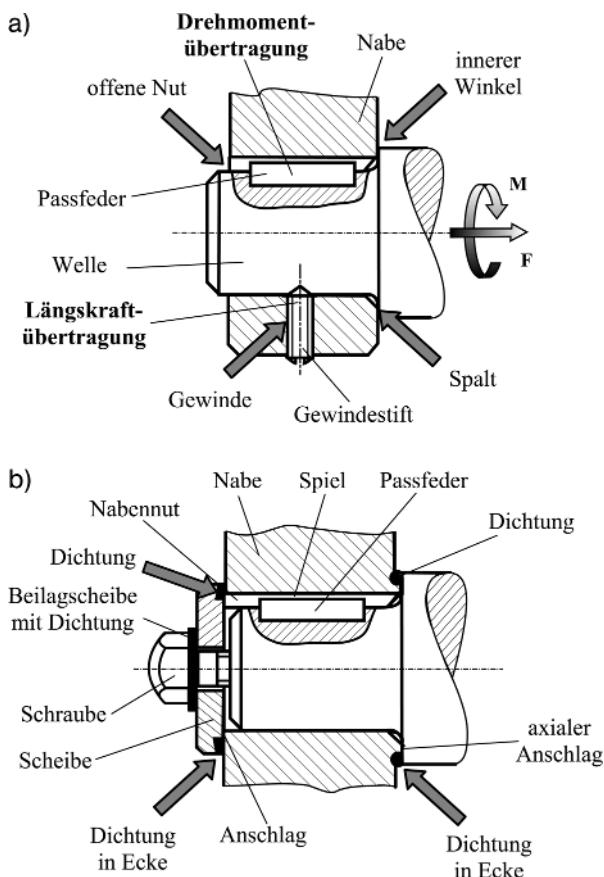


Abb. 1.75 Beispiel einer formschlüssigen Wellen-Naben-Verbindung:
(a) Problemstellen, (b) hygienegerechte Verbesserung.

1.8

Wellenkupplungen

Kupplungen haben die Aufgabe, Wellen miteinander zu verbinden, um Drehmomente ohne Wandlung zu übertragen. Das heißt, dass sie im stationären Zustand gleich große Drehmomente am Ein- und Ausgang aufweisen. Grundsätzlich können Kupplungstypen verwendet werden, bei denen die zu verbindenden Wellen entweder fluchten müssen oder zur Kompensation axialer bzw. winkeliger Abweichungen gegeneinander speziell konstruiert sind. Außerdem können bestimmte Kupplungen zum „Schalten“, d. h. zum Verbinden und Trennen von zwei Wellen verwendet werden.

Als Beispiel für die Verwendung in produktberührten Hygienebereichen ist in Abb. 1.76 eine einfache elastische Scheibenkupplung dargestellt. Sie ist durch eine hygienegerechte Abdichtung der Flansche mit Zentrierung und axialem Anschlag, Ausrundung innerer Ecken, geneigte horizontale Flächen sowie eine hygienegerecht gestaltete Schraubenverbindung gekennzeichnet. Die Elastomeroberfläche muss porenfrei sein. Eine Problemstelle kann der Rand der Vulkanisierung darstellen, die sich ablösen kann, wenn sie nicht entsprechend geschützt ist. Weitere Kupplungen werden in [1] diskutiert.

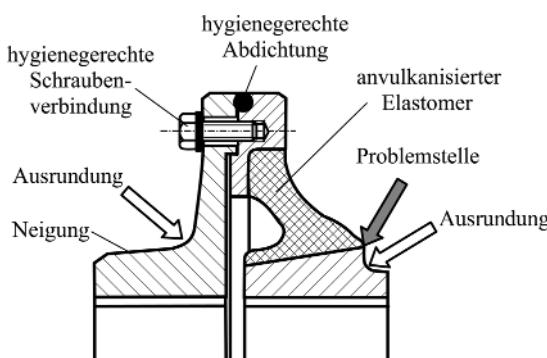


Abb. 1.76 Beispiel einer hygienegerecht gestalteten elastischen Kupplung.

1.9

Lager

Lager dienen zum Führen von Maschinenelementen, die eine drehende Bewegung wie z. B. Wellen, Achsen und Bolzen oder eine hin- und hergehende Bewegung wie z. B. Ventil- oder Kolbenstangen ausführen. Gleichzeitig müssen sie die Belastungen der zu lagernden Bauteile aufnehmen. Unter hygienischen Aspekten ist eine exakte Lagerung, die möglichst statisch bestimmt ausgeführt werden sollte, eine wesentliche Voraussetzung für die Funktion dynamischer Dichtungen.

Im Allgemeinen sollten Lagerstellen von bewegten Bauelementen in den Nicht-Produktbereich verlegt werden und soweit erforderlich durch dynamische Dichtungen wie Gleitringdichtungen oder vorgespannte Lippendichtungen zum Produktraum hin abgedichtet werden. Nach DIN EN ISO 14 159 [27] müssen geschmierte Lager einschließlich solcher Lagertypen, die rundherum abgedichtet sind, außerhalb der produktberührten Oberfläche angeordnet werden. Zwischen Lager und der produktberührten Oberfläche sollte ein angemessener Abstand für Kontrollzwecke offen sein. Für Fälle, in denen sich aus funktionellen Gründen eine Lagerung direkt im Produktbereich nicht vermeiden lässt, müssen hygienegerechte Konstruktionen eingesetzt werden, um Kontaminationsgefahren auszuschließen.

Bei Gleitlagern wird bei Drehbewegungen der Wellenzapfen der Welle oder bei hin- und hergehender Bewegung die Stange bzw. der Kolben unmittelbar im Lager axial oder radial geführt. Der direkte Kontakt zwischen Lager und Bauteil führt bei Bewegungsbeginn jeweils zu fester Reibung und damit Verschleiß, der durch geeignete Werkstoffwahl herabgesetzt werden kann. Im Betriebszustand sollte flüssige Schmierung stattfinden. Da Edelstahl bei Kontakt mit Edelstahl zum Fressen neigt, werden entsprechende Lagerwerkstoffe mit guter Gleitfähigkeit wie Legierungen aus Zinn, Nickel und Silber oder Auskleidungen mit geeigneten PTFE-Werkstoffen eingesetzt. Zugelassene Schmierstoffe wie z. B. H1-Schmiermittel [78, 79] dürfen nur bei abgedichteten Lagern verwendet werden.

Die Prinzipdarstellung eines produktgeschmierten radialen Gleitlagers ohne axiale Führung nach Abb. 1.77 veranschaulicht, dass axiale Nuten mit großen Ausrundungen im Wellenzapfen eine ausreichende Produktschmierung sowie eine leichte Reinigung gewährleisten [3, 26, 27, 80]. Nutfreie Wellen und Lager bilden einen engen Spalt, der sich nicht reinigen und daher nicht im Produktbereich einsetzen lässt.

Für Drehbewegungen eingesetzte Wälzlager sind entsprechend Abb. 1.78 im Allgemeinen einbaufertige Maschinenelemente, die wegen ihres komplizierten Aufbaus nicht direkt für produktberührte Bereiche geeignet sind. Für hygienische Anforderungen muss der Lagerbereich durch eine Doppeldichtung eventuell mit

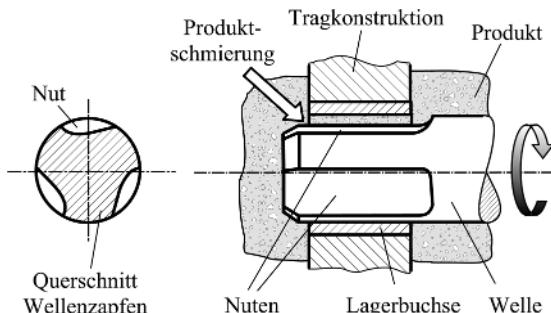


Abb. 1.77 Reinigbar gestaltetes radiales Gleitlager (nach [80]).

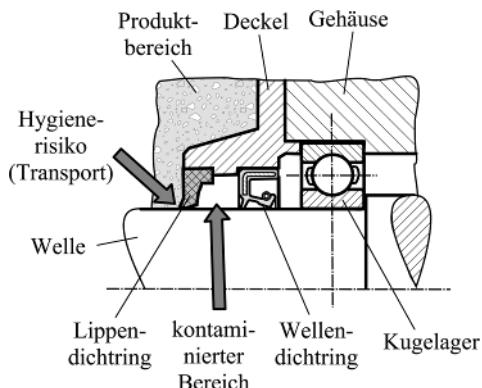


Abb. 1.78 Prinzip einer hygienegerechten Abdichtung von Wälzlagern für keimarme Einsatzfälle.

dazwischenliegendem Spülraum sowohl gegenüber dem Produktraum als auch dem Lager wegen Fettaustritts abgedichtet werden. Das Prinzipbeispiel zeigt die Abdichtung durch einen Wellendichtring zum Lager hin, während die Produktseite durch einen bündigen Elastomerring mit Lippe (siehe auch Abschnitt 1.4.2.2) abgedichtet wird. Auf das Hygienerisiko durch den Transport dünner Filme durch den Dichtspalt wurde im Abschnitt 1.4 bereits hingewiesen.

Durch Reinigbarkeitstests konnte die leichte Reinigbarkeit von direkt durchströmten Kugellagern z. B. aus Keramik nachgewiesen werden. Allerdings liegen bei solchen Konstruktionen nur Betriebserfahrungen mit Wasser vor.

1.10 Getriebe

Getriebe wie z. B. Riemen-, Ketten-, Reibrad- oder Zahnradgetriebe dienen zum Wandeln von Drehzahlen und Drehmomenten zwischen Wellen. In dieser Funktion handelt es sich um Maschinenelemente, die nicht im Produktbereich eingesetzt, sondern in getrennten Gehäusen oder gekapselten Bereichen von Maschinen und Apparaten untergebracht werden sollten. Eine Abdeckung z. B. von Keil-, Flach- oder Kettenantrieben durch Schutzbretter oder andere Schutzworrichtungen in hygienerelevanten Produktionsräumen, in denen Produkte in offener Weise hergestellt oder abgepackt werden, ist im Allgemeinen keine ausreichende Maßnahme, um Kreuzkontamination durch Schmiermittel und Schmutz einschließlich Mikroorganismen zu vermeiden. In Sonderfällen (z. B. Orbital-Reinigungsgeräte) werden Getriebe offen gestaltet und in die Reinigung einbezogen.

1.11

Elektromotoren

Meist werden Elektromotoren im Nicht-Produktbereich eingesetzt, in dem übliche Ausführungen den Anforderungen genügen. Sie unterliegen auch nicht der Maschinenrichtlinie [25], sondern der sogenannten Niederspannungsrichtlinie [81]. Bei Einsatz in Hygienebereichen oder bei Produktkontakt ist jedoch eine hygienegerechte Ausführung unbedingt notwendig. Problematische Bereiche wie z. B. Vertiefungen im Gehäuse, schlecht zugängliche Bereiche der Kühlrippen, nicht selbsttätig ablaufende Stellen, Wellenenden mit Passfeder, Gehäuseschrauben sowie Klemmkästen mit elektrischem Anschluss müssen dann hygienegerecht ausgeführt werden. Ventilatoren zur Belüftung und Kühlung gemäß Abb. 1.79 sind in solchen Fällen zu vermeiden. Außerdem können Einbauort und -lage im Fall offener Prozessanlagen hygienische Probleme bereiten.

Hauben aus Edelstahl zur Motorabdeckung sollten in Hygienebereichen im Allgemeinen nicht verwendet werden. Wenn sie dennoch eingesetzt werden, müssen sie einfach zu entfernen sein, um eine regelmäßige Reinigung der abgedeckten Bereiche zu ermöglichen.

Für die Standardausführung von Elektromotoren wird meist eine Innenbelüftung durch Axial- oder Radiallüfter zur Kühlung verwendet, die eine wesentliche Ursache für Staub- und Schmutzansammlungen gemäß Abb. 1.80 sowie Kontaminationen darstellt.

Bei dem hygienegerecht gestalteten Motor ohne Lüfter und Rippen mit geneigten Flächen und abgerundeten Kanten entsprechend Abb. 1.81, der von der EHEDG zertifiziert wurde, erfolgt die Kühlung direkt über die Gehäuseoberfläche [82].

Für Anwendungen mit hoher Leistung in hygienerelevanten Produktionsräumen wie z. B. Reinräumen stellen Elektromotoren mit Flüssigkeitskühlung oftmals eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Lösung dar. Der Einsatz ist auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen wie bei Staub, Wärme oder Kälte möglich.

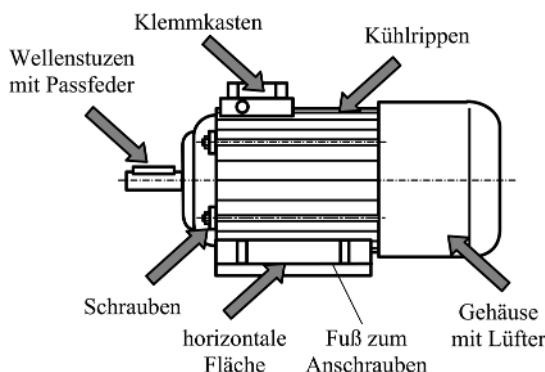


Abb. 1.79 Hygienische Problembereiche von Elektromotoren.

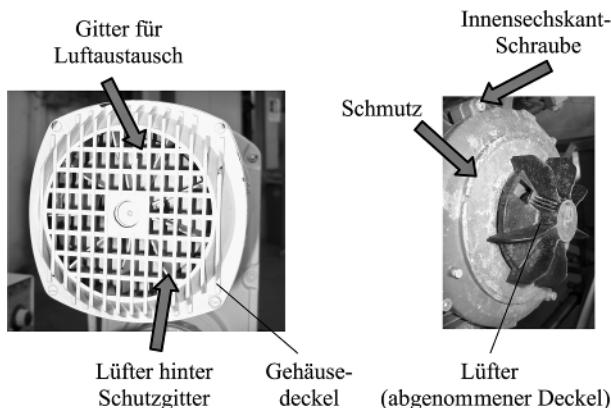


Abb. 1.80 Kontaminationsgefahr durch Motoren mit Lüftern in Hygienebereichen:
(a) Schutzgitter, (b) schwer reinigbare Schmutzstellen im Ventilatortyp.

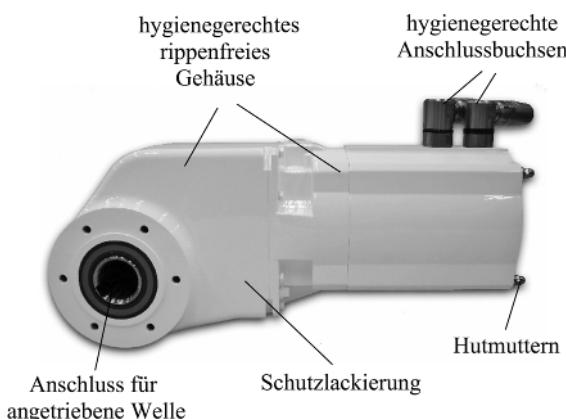


Abb. 1.81 Hygienegerecht gestalteter Motor ohne Ventilator [82].

Um Hygienerisiken auszuschließen, sollten Antriebe auch bei offenen Prozessen möglichst in den Nichtproduktbereich verlegt werden.

Ein Beispiel für die Gefahr von Kontaminationen zeigt die Anordnung eines herkömmlichen Motors mit Lüfter gemäß Abb. 1.82a in unmittelbarer Nähe eines Transportbandes mit gereinigten Flaschen zum Abfüllen. Die Luft des Lüfters kann unmittelbar die Flaschenmündung kontaminiieren. Bereits durch Änderung der Anordnung entsprechend Abb. 1.82b kann die Situation erheblich verbessert werden.

Bei Antrieben über Produkten kann eine Verbesserung der Hygienesituation z. B. durch Schutzabdeckungen und andere Hygienemaßnahmen erfolgen (siehe z. B. [3]). Beim Einsatz über Behältern lässt sich der Antrieb gemäß Abb. 1.83 auf einen Deckel montieren, sodass Prozess und Reinigung geschlossen ablaufen.

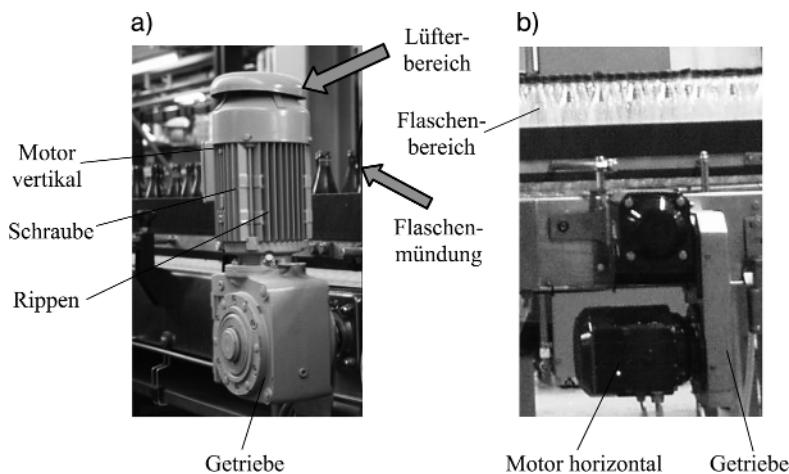


Abb. 1.82 Anordnung von Motoren in offenen Bereichen des Transports gereinigter Flaschen:

- (a) Kontaminationsgefahr durch Motorventilator im Flaschenhalsbereich,
- (b) Anordnung des Motors unterhalb der Flaschenöffnungen.

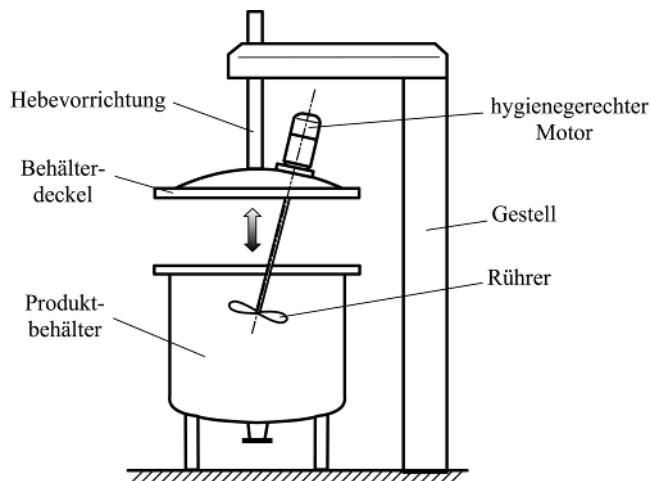


Abb. 1.83 Beispiel für die Verlegung des Motors während der Produktion in den Nicht-Produktbereich.

Wenn z. B. zum Befüllen der Behälter geöffnet wird, muss eine Kontamination aus der Umgebung auszuschließen sein, was eine hygienegerechte Gestaltung und Reinigung des gefährdenden Umfelds erfordert.